Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…… ..... ……..7

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 19

1.1 Объекты контроля……...…….19

1.2 Средства комплексного контроля геометрических параметров изделий 29

1.2.1 Контроль стекол……..... 40

1.2.2 Контроль тел вращения……..……42

1.2.3 Контроль параметров положения……..……52

1.2.4 Контроль положения оси и плоскости вращения……57

1.2.5 Определение объемов…….59

1.3 Оптико-электронные системы контроля……..……..63

1.3.1 Классификация оптических методов контроля……..…….….63

1.3.2 Обобщенная схема получения измерительной информации в оптических системах контроля геометрическим методом с пространственным разрешением…….……..66

1.3.3 Системы формирования исходной информации……..……...….70

1.3.4 Оптические преобразователи ……75

1.3.5 Устройства считывания информации……...……78

1.3.6 Программное обеспечение……..……84

1.4 Выводы по Главе 1……...……87

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМАМИ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ……90

2.1 Сущность получения измерительной информации геометрическим методом с пространственным разрешением ……90

2.2 Моделирование отображения точек пространства системами контроля, реализующими геометрический метод с пространственным разрешением..92
2.3 Оптические системы пассивного типа…….94
2.4 Оптические системы активного типа……..…...…100
2.5 Моделирование действия оптических зеркальных преобразователей …106
2.5.1 Зеркальные преобразователи на основе вращающихся зеркал…….109
2.6 Энергетические аспекты передачи измерительной информации……117
2.7 Выводы по Главе 2…….……122
ГЛАВА 3 ПОГРЕШНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ И СПОСОБЫ ИХ КОМПЕНСАЦИИ……..124
3.1 Основные источники погрешностей оптических систем контроля…….124
3.1.1 Основные источники погрешности пассивных оптических систем контроля……125
3.1.2 Основные источники погрешности активных оптических систем контроля геометрических параметров ……134
3.2 Коррекция искажений изображения пассивной оптико-электронной системы контроля геометрических параметров…….……146
3.2.1 Тест-объекты для калибровки систем контроля ……146
3.2.2 Модели коррекции изображения при калибровке…….……149
3.3 Коррекция искажений, основанная на использовании алгоритма дискретизации пространства изображения…….155
3.3.1 Методика коррекции……..…155
3.3.2 Реализация методики ДПИ калибровки на основе операции морфинга изображений…….160
3.4 Компенсация погрешностей фоновой засветки…….……...164
3.5 Оценка погрешностей рефракции оптической среды…….……168
3.6 Методика компенсации погрешностей оптических систем комплексного контроля изделий и технологического оборудования геометрическим

методом с пространственным разрешением для фиксированного положения объекта контроля……..170
3.7 Выводы по Главе 3……174
ГЛАВА 4 НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ……..…..…176
4.1 Контроль геометрических параметров листовых объектов……..176
4.1.1 Задача контроля изделий из листовых материалов……..176
4.1.2 Контроль качества листового стекла……..182
4.2 Контроль геометрии изделий типа «тело вращения»…….……197
4.2.1 Особенности контроля изделий типа «тел вращения» цифровой камерой с объективом с фиксированным фокусным расстоянием……..199
4.2.2 Особенности калибровки проекционной системы контроля изделий типа «тела вращения» 207
4.2.3 Компенсация погрешности положения объекта контроля……...……....211
4.2.4 Алгоритм комплексной компенсации погрешностей системы контроля осесимметричных изделий……221
4.3 Контроль параметров положения……223
4.3.1 Контроль прямолинейности…….……223
4.3.2 Контроль положения плоскости……..225
4.3.3 Контроль положения плоскости вращения……230
4.4 Контроль объема брикетированных материалов оптическим геометрическим методом с пространственным разрешением в процессе их перемещения……..248
4.5 Контроль технологического оборудования в металлургии…….…..253
4.6 Выводы по Главе 4……256
ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ КОМПЕНСАЦИИ

ПОГРЕШНОСТЕЙ И СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ……258

5.1 Экспериментальное исследование алгоритма компенсации погрешностей систем контроля размеров листовых изделий оптическим геометрическим методом с пространственным разрешением …….258

5.2 Сравнительная оценка надежности выявления пороков стекол автоматизированной системой и визуальным контролем……..……266

5.3 Экспериментальные исследования погрешности определения положения тест-объекта……..…..…….276

5.4 Исследование алгоритма компенсации погрешностей системы контроля деталей типа «тела вращения»……..……..285

5.5 Экспериментальные исследования устройства контроля положения вращающейся плоскости……307

5.6 Выводы по Главе 5…….312

ГЛАВА 6 ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ……..……..…314

6.1 Схемы контроля геометрических параметров осесимметричных изделий……..……..314

6.2 Оценка метрологических характеристик систем оптического контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением ……321

6.2.1 Оценка погрешностей системы контроля токоподводящих штырей электролизеров при размещении на кране в электролизном цехе ……324

6.2.2 Оценка погрешностей системы контроля токоподводящих штырей электролизеров при размещении на участке их очистки……...332

6.3 Система контроля углов установки колес автомобилей ……...…335

6.4 Выводы по Главе 6……...…..337

ЗАКЛЮЧЕНИЕ……..……..……...…..339
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ…….....343
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……...344
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в АО "Энертек" ……..381
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ»…….382

ВВЕДЕНИЕ

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. Использование параллельных измерений при комплексной оценке геометрических параметров изделий на ранних стадиях изготовления позволяет за счет интенсификации операций выходного контроля существенно сократить его время, тем самым обеспечивая возможность перейти от выборочного к сплошному контролю и реализовать оперативный контроль, управляя качеством продукции и уменьшая влияние технологической наследственности, свойственной наиболее распространённому способу обработки материалов – резанием.

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 являются актуальными 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, однако в целом использование оптических систем контроля с регистрацией результатов измерений цифровой камерой представлено отдельными частными решениями и не имеет единой теоретической базы.

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. Современной тенденцией является увеличение разрешения цифровых камер до 16…25 Мп, что позволит 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, использующих 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 разаботанного 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.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием строгих теоретических подходов геометрической оптики, адекватных математических моделей передачи измерительной информации, подтверждённых в ходе исследований численными и графическими методами, результатами экспериментальных исследований, разработанных систем контроля и алгоритмов компенсации и сравнений результатов измерений с опорными значениями, полученными средствами более высокого класса точности согласно методикам их применения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: VIII научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, СПбГТУ и ЦНИИиОК РТК, 16-17 апреля 1997 г.); IX научно-техническиой конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург,

СПбГТУ и ЦНИИиОК РТК, 14-15 апреля 1998 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы управления техническими, информационными и транспортными системами» (Санкт-Петербург, СЗПИ, 15-17 мая 2007 г.); Второй всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» (Санкт-Петербург, СЗПИ, 18-20 ноября 2008 г.); Третьей всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» (Санкт-Петербург, СЗПИ, 21-23 ноября 2009 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию вуза «Системы и процессы управления и обработки информации» (Санкт-Петербург, СЗТУ, 15-17 марта 2010 г.); II международной научно–практической конференции «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении», (Санкт-Петербург, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 24 апреля 2014); Международной научно-практической конференции «Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки» (Санкт-Петербург, 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.); I–ой Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика современной науки» (Москва, 23 октября - 01 ноября 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 (Санкт-Петербург - Красноярск, 04 марта 2020 г.); XXIII международной научной

конференции «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (Санкт-Петербург, 1-5 июня 2020 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе существующих решений и теоретических положений в зарубежной и отечественной научной литературе; разработке моделей передачи измерительной информации и методик компенсации погрешностей. Используя результаты геометрического моделирования и численные методы теоретически обосновал предложенные методики. Непосредственно участвовал в разработке программного обеспечения, экспериментальных стендов и опытных образцов средств измерений, планировании исследований и получении экспериментальных данных; провел обобщение результатов исследования и сформулировал выводы.

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 150304 «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Современные системы контроля в металлургии» по направлению подготовки 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» направленности

«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**.**

Объем и структура. 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

1.1 Объекты контроля

Объектами контроля оптических систем могут быть геометрические параметры изделия (или изделий) и состояние технологического оборудования. Объединяет эти объекты преобразование внешней оптической энергии или излучение собственной.

В зависимости от способа трансформации внешнего светового потока объекты контроля можно разделить на прозрачные и непрозрачные. Прозрачными считаются объекты контроля, в которых большая часть энергии светового потока проходит через объект с минимальным ее поглощением, а их поверхности отражают или поглощают меньшую часть энергии. В зависимости от соотношения прошедшей, поглощённой и отразившейся части световой энергии говорят о прозрачности объектов [23, 158, 83].

Для оптически прозрачных объектов можно контролировать параметры, характеризующие как поверхностные свойства, так и внутренние. Примером контроля таких объектов можно рассмотреть задачу оценки качества листовых стекол, которые могут иметь как поверхностные пороки (например: царапины или сколы), так и внутренние (трещины, пузыри, камни и др.) [50, 44, 49, 30]. Всего ГОСТом определен 51 тип пороков. Основные виды пороков представлены на рисунке 1.1.

Соответственно задача контроля качества листовых стекол и изделий из них сводится к следующим последовательно выполняемым действиям: идентификация порока, подсчет количества, определение его (их) размеров и логическое сопоставление с допустимыми значениями для формирования заключения о соответствии/несоответствии продукции нормативному документу.

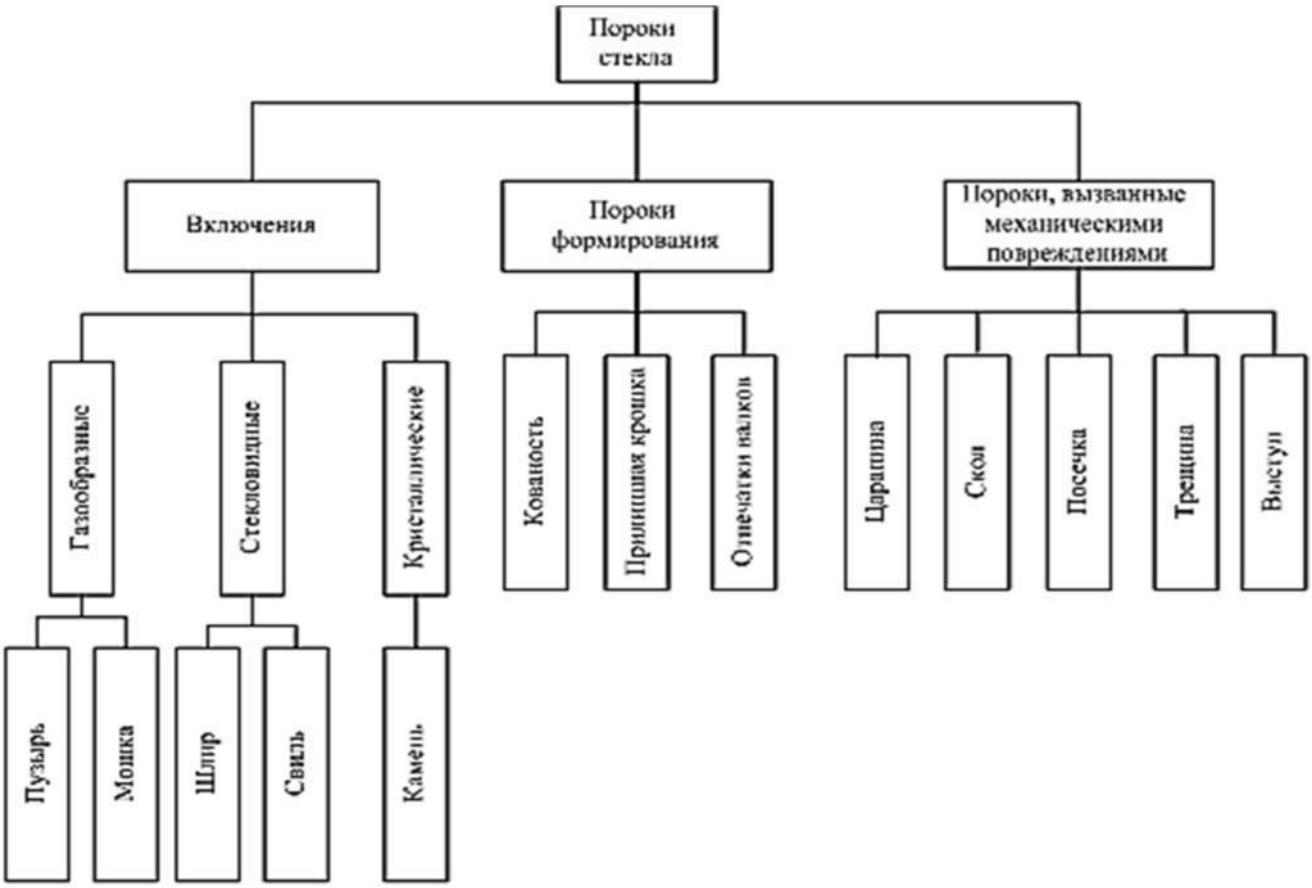


Рисунок 1.1 – Классификация пороков стекла в соответствии с российскими стандартами

Для непрозрачных объектов возможно контролировать только поверхностные свойства. На основе [143] геометрические параметры принято классифицировать, как это показано на рисунке 1.2.

Реальная поверхность объекта контроля всегда отличается от номинальной поверхности (рисунок 1.3) [47]. Для нормирования поверхности и в последующем для ее оценки используются количественные показатели, которые можно сгруппировать и задать им стандартные значения.

Поэтому сложную поверхность изделия оценивают отдельными составляющими по укрупненной классификации. Так например геометрию тел вращения можно оценить параметрами макрогеометрии: Δd – отклонение размера, Δp – отклонение расположения поверхностей, $\Delta \varphi$ – отклонение формы

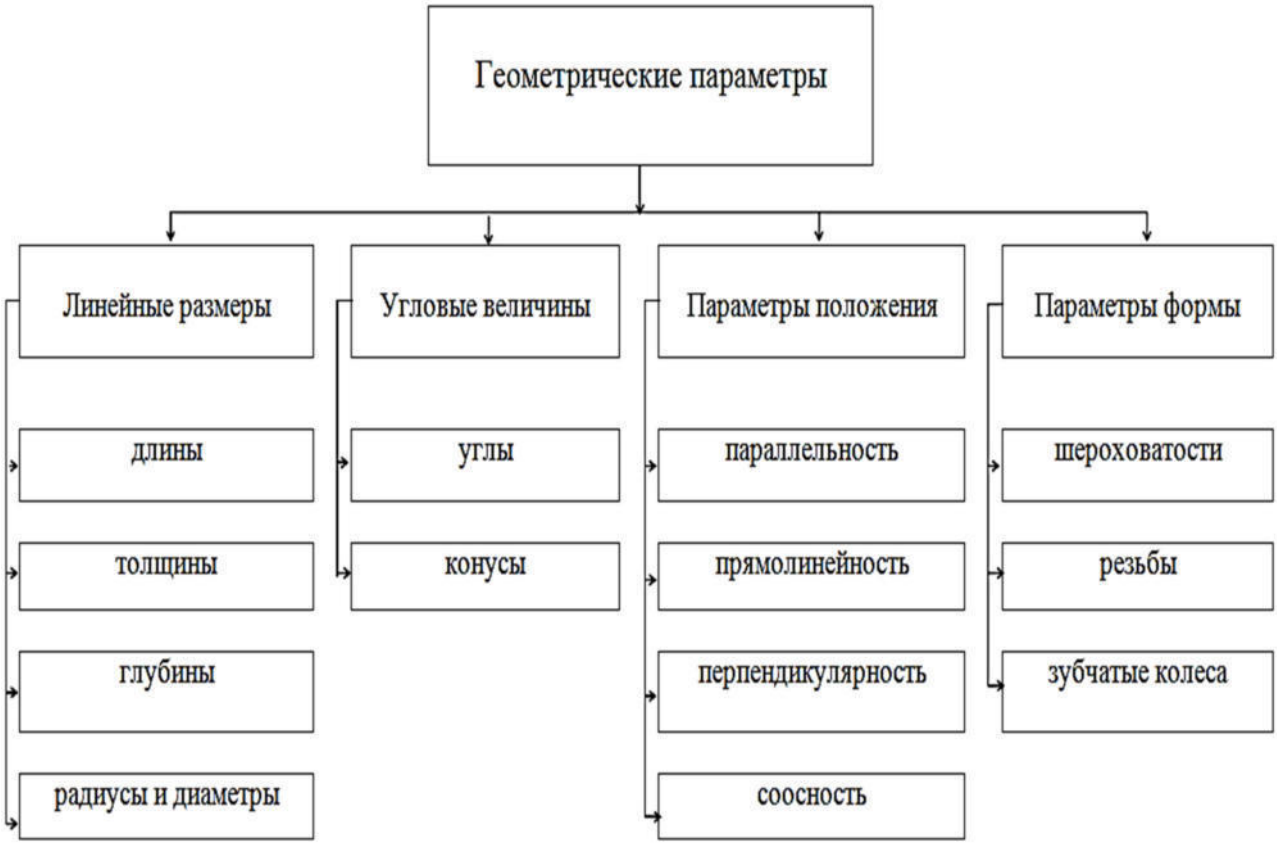


Рисунок 1.2 – Классификация геометрических параметров

поверхности (например, в поперечном сечении отклонение круглости – наибольшее расстояние от точки реального профиля до прилегающей окружности); $\Delta\beta$ – волнистость поверхности и микрогеометрии – параметром $\Delta\psi$, характеризующим – шероховатость поверхности.

При решении задач контроля изделий требуется установить взаимосвязь элементов изделий номинальных и реальных (рисунок 1.4). Их разница и определяет погрешность изготовления. Аналогичную связь можно установить для определения изменения состояния изделия во время эксплуатации – износ.

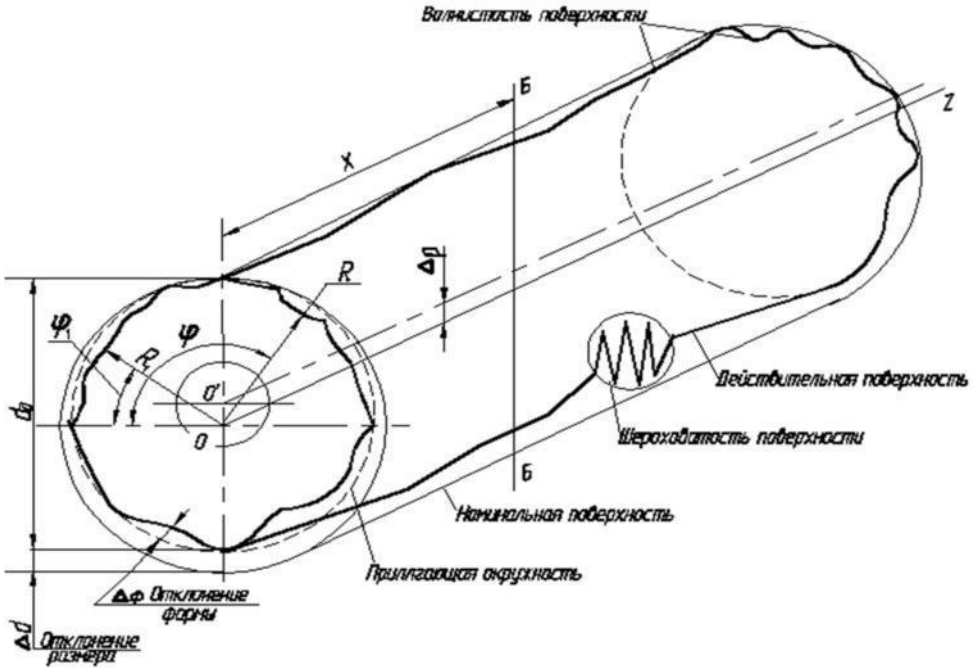


Рисунок 1.3 – Отклонения геометрических параметров различных порядков

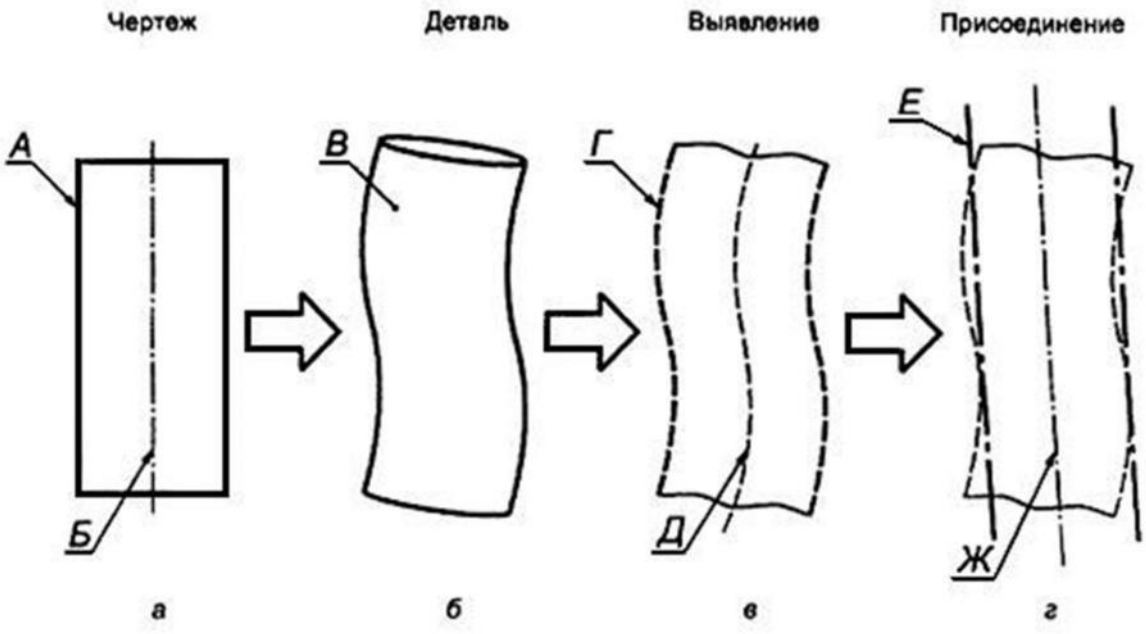


Рисунок 1.4 – Взаимосвязь определений геометрических элементов

На рисунке 1.4 наглядно показана взаимосвязь определений геометрических элементов, обозначенных в ГОСТ 31254-2004 «А – номинальный полный элемент; Б – номинальный производный элемент; В – реальный элемент; Г – выявленный

полный элемент; Д – выявленный производный элемент; Е – присоединенный полный элемент; Ж – присоединенный производный элемент» [47].

По ОК 021-95 классы деталей содержат следующую номенклатуру:

– класс 71 - детали - тела вращения типа колец, дисков, шкивов, блоков, стержней, втулок, стаканов, колонок, валов, осей, штоков, шпинделей и др.;
– класс 72 - детали - тела вращения с элементами зубчатого зацепления; трубы, шланги, проволочки, разрезные сектора, сегменты; изогнутые из листов, полос и лент; аэрогидродинамические; корпусные, опорные; емкостные, подшипников;
– класс 73 - детали - не тела вращения корпусные, опорные, емкостные;
– класс 74 - детали - не тела вращения: плоскостные; рычажные, грузовые, тяговые; аэрогидродинамические; изогнутые из листов, полос и лент; профильные; трубы;
– класс 75 - детали - тела вращения и (или) не тела вращения, кулачковые, карданные, с элементами зацепления, арматуры, санитарно-технические, разветвленные, пружинные, ручки, уплотнительные, отсчетные, пояснительные, маркировочные, защитные, посуды, оптические, электрорадиоэлектронные, крепежные;
– класс 76 - детали технологической оснастки, инструмента [154].

Из перечисленной номенклатуры изделий объектами оптического контроля геометрическим методом с пространственным разрешением средствами могут быть классы 71, 72, 74 и с оговорками 75.

Комплексный контроль размеров.

При оценке качества изделия требуется, как правило, определять значения совокупности независимых геометрических параметров, например линейных размеров [76].

Так, для листовых изделий это совокупность линейных (длин и радиусов), угловых размеров (углов), расположенных в одной плоскости. На рисунке 1.5 показан пример такого изделия – деталь пластина.

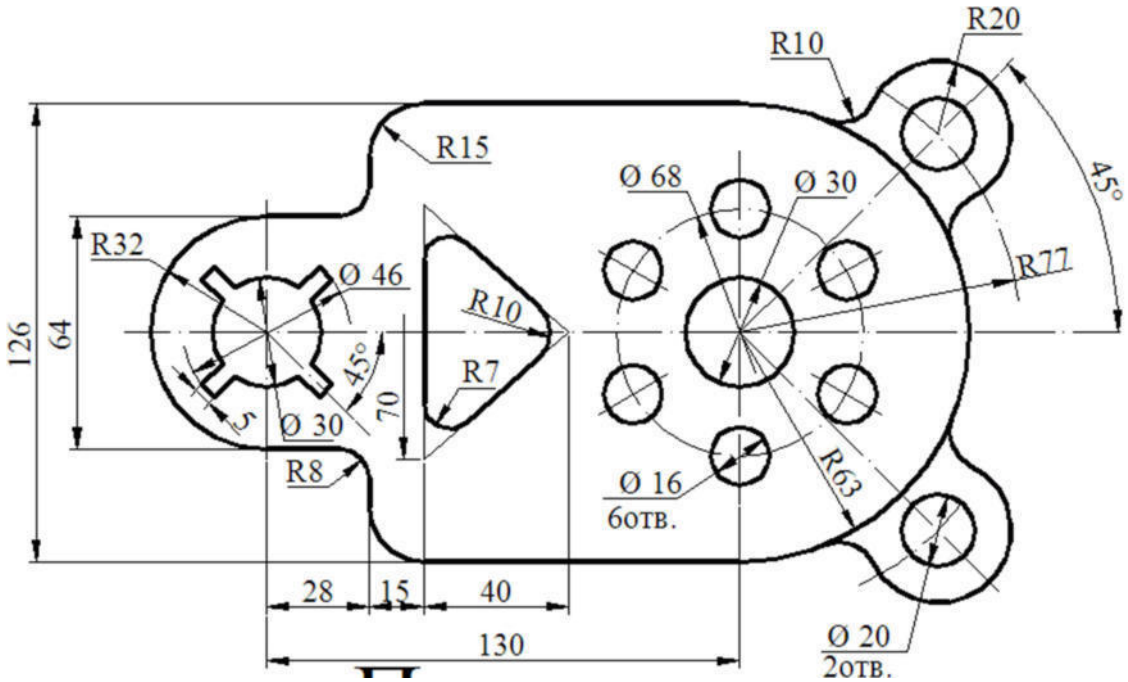


Рисунок 1.5 – Эскиз детали, подлежащей контролю

Детали, имеющие форму тел вращения (71 класс), можно разбить на три класса: валы, втулки и диски.

Детали класса «валы» образуются в основном наружной поверхностью вращения – цилиндрической или конической – и несколькими торцовыми поверхностями. Их размеры в осевом направлении превосходят диаметральные.

Детали класса «втулки» характеризуются наличием наружной и внутренней цилиндрических поверхностей. Линейные и диаметральных размеры не сильно различаются.

Характерным признаком деталей класса «диски» является то, что их длина значительно меньше диаметра.

На рисунке 1.6. показан эскиз осесимметричной детали. Размеры ее основных формообразующих элементов можно фиксировать в плоскости, проходящей через ось симметрии.

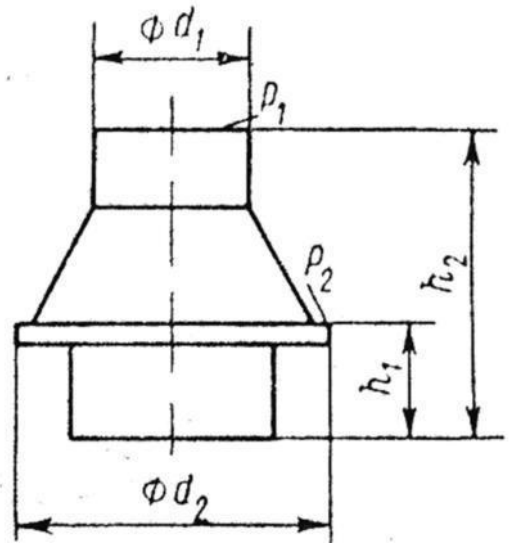


Рисунок 1.6 – Эскиз осесимметричной детали

К телам вращения можно отнести и элементы технологического оборудования. В качестве примера рассмотрим токоподводящий штырь электролизера С8-БМ(Э), который представляет стержень изготовленный из стального проката марки Ст3сп ø140 мм, и верхней части имеет цилиндрическую форму переходящую в конусную в нижней части (рисунок 1.7).

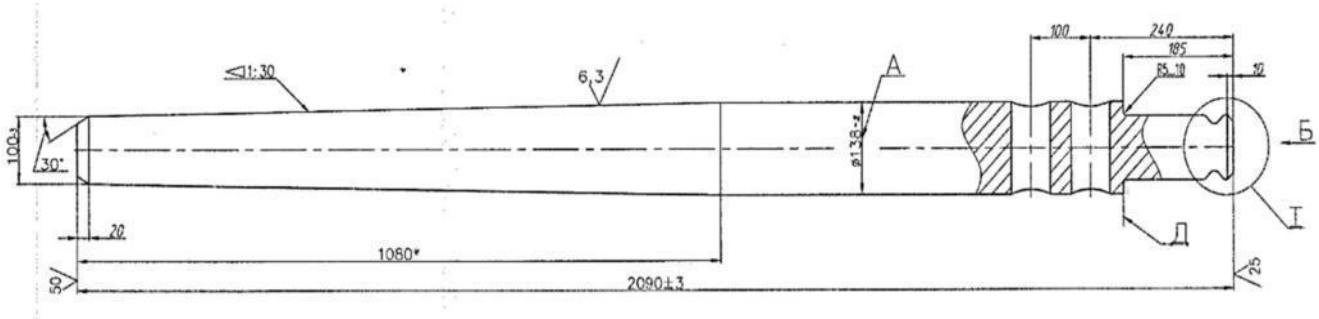


Рисунок 1.7 – Токоподводящий штырь

Необходимость контроля токоподводящих штырей связана с тем, что в процессе эксплуатации, в результате взаимодействии с анодной массой при высокой температуре, они подвергаются интенсивной коррозии. Изменение геометрии токоподводящих штырей может привести к увеличению расслоения анода и негативно сказывается на формировании конуса спекания, что в целом ухудшает энергетическую эффективности процесса электролиза.

Контроль прямолинейности

Для функциональных элементов металлорежущего технологического оборудования одним из основных требований является требование прямолинейности направляющих. Прямолинейность движения рабочих органов определяет точность формы и взаимное расположение обрабатываемых на станке поверхностей, точность координатных и расчетных перемещений, точность установки переставляемых деталей, узлов и механизмов, взаимодействие механизмов, соединяющих подвижные и неподвижные части станка [58]. Согласно ГОСТ Р ИСО 230-1-2010 «линия в пространстве считается прямой на данной длине, если каждая из ее проекций на две взаимно перпендикулярные плоскости, параллельные общему направлению контролируемой линии, находится между двумя прямыми линиями (рисунок 1.8.). При этом допуски в каждой из плоскостей могут быть разными» [20].

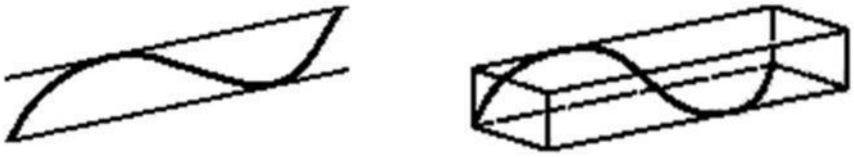


Рисунок 1.8 – Прямолинейность линии в плоскости (слева) и пространстве (справа)

«Общее направление контролируемой линии или представляющей ее расчетной линии определяется:

- двумя точками, выбранными у концов проверяемой линии (при этом крайними точками пренебрегают, поскольку они подвержены местным дефектам);

- прямой линией, рассчитанной и построенной по точкам (например, по методу наибольших квадратов)» [20].

Точность формы поверхностей функциональных элементов (направляющих) технологического оборудования характеризуют допусками прямолинейности и предельными отклонениями от прямолинейности (рисунок 1.9).

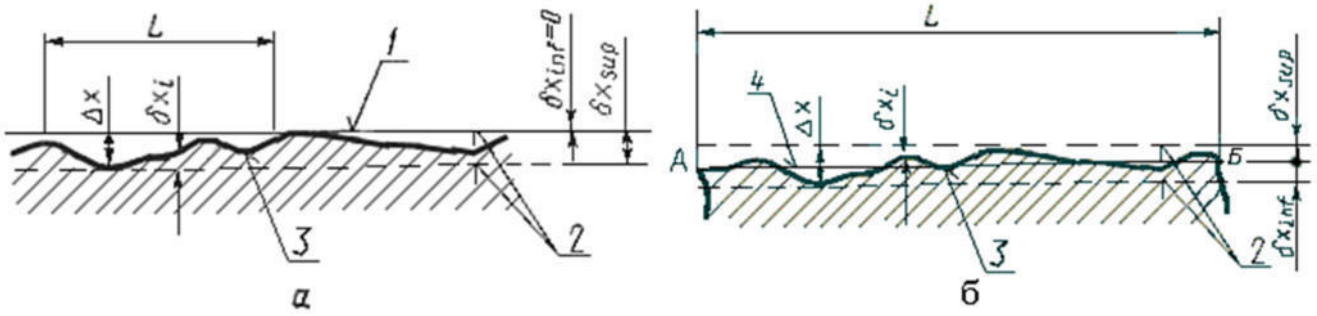


Рисунок 1.9 – Допуск и отклонение от прямолинейности при измерениях на заданной длине (а); – то же, при измерениях на всей длине (б)

Примечание. При измерениях на заданной длине $\delta x_{inf} = 0$ и $\delta x_{sup} = \Delta x;$ при измерениях на всей длине $\delta x_{inf} = \delta x_{sup} = 0{,}5\Delta x.$

На рисунке 1.9 обозначены: 1 – условная (прилегающая) прямая; 2 – прямые, ограничивающие поле допуска; 3 – реальный профиль; 4 – условная (проходящая через крайние точки) прямая

Данная задача является одной из основных при контроле качества металлорежущего технологического оборудования. Прямолинейность перемещения суппорта станка определяет не только возможность изготовить прямые или плоские поверхности на обрабатываемых изделиях, но и точность позиционирования точек обрабатываемого изделия.

Допуск устанавливает пределы допустимых линейных отклонений траектории прямолинейного перемещения представительной точки на движущемся элементе по отношению к расчетной линии (общее направление траектории). В качестве примера можно привести требования для токарных станков, где для проверки прямолинейности продольного перемещения суппорта в вертикальной плоскости определены следующие допуски, мм: на 1 м хода суппорта – 0,02; на всей длине хода суппорта: до 2 м – 0,04; до 4 м – 0,06 (допускается только выпуклость) [20].

Контроль положения плоскости в пространстве

Согласно рассмотренной ранее (рисунок 1.2.) классификации контроль положения плоскости в пространстве относится к задачам контроля геометрических параметров и, в общем случае, сводится к определению ее положения в заданной системе координат (рисунок 1.10).

При определении ее положения относительно оптической оси *x* ее ориентация характеризуется двумя угловыми координатами ε и ν.

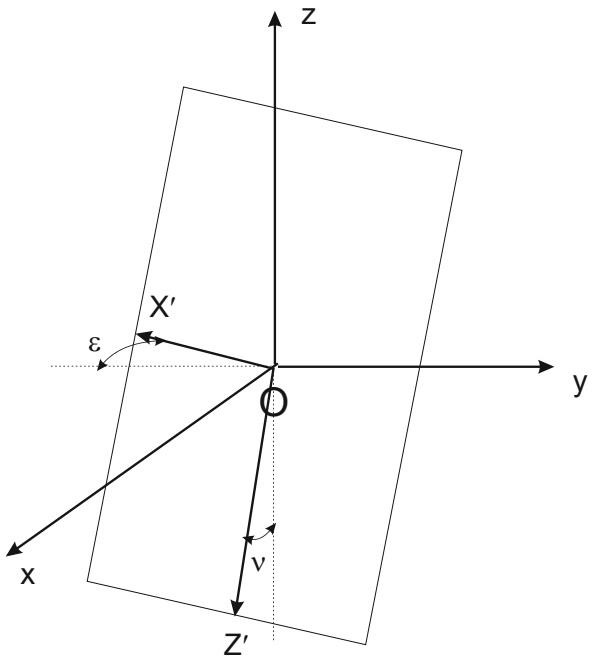


Рисунок 1.10 – Параметры, определяющие положение плоскости в пространстве

Контроль оси вращения

Наибольшую сложность для задач контроля представляет выявление производных элементов Д (рисунок 1.4). Ориентация оси вращения определяется двумя угловыми координатами ε и ν, а положение - линейными z_0 и y_0 (рисунок 1.11), предполагая, что система координат выбирается таким образом, чтобы ось вращения проходила через плоскость YOZ.

Примером этих задач может служить контроль установки управляемых колес автомобилей. Известны и другие примеры: контроль соосности валов трансмиссии в вертолетах, на кораблях.

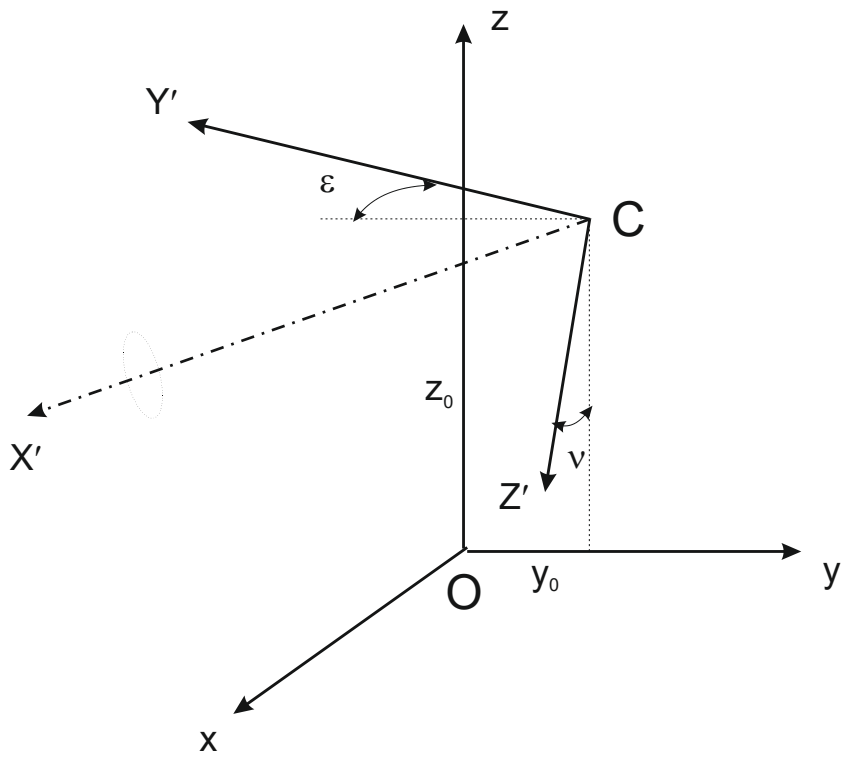


Рисунок 1.11 – Параметры, определяющие положение плоскости в пространстве

Контроль плоскости вращения

Задача контроля положения вращающейся плоскости является обобщением ранее рассмотренных задач определения положения плоскости в пространстве и контроля положения оси вращения (рисунок 1.12).

Положение плоскости на оси вращения определяется расстоянием *l*, углом наклона вектора нормали плоскости к оси вращения φ и углом поворота плоскости α. Ориентация оси вращения определяется двумя угловыми координатами ε и ν, а положение - линейными z_0 и y_0.

1.2 Средства комплексного контроля геометрических параметров изделий

Для решения задач автоматизированного контроля геометрических параметров разработано множество методов и средств измерений [148, 153, 178, 210, 218, 229], в том числе реализуемых бесконтактными средствами измерений [13, 35, 82, 156, 256].

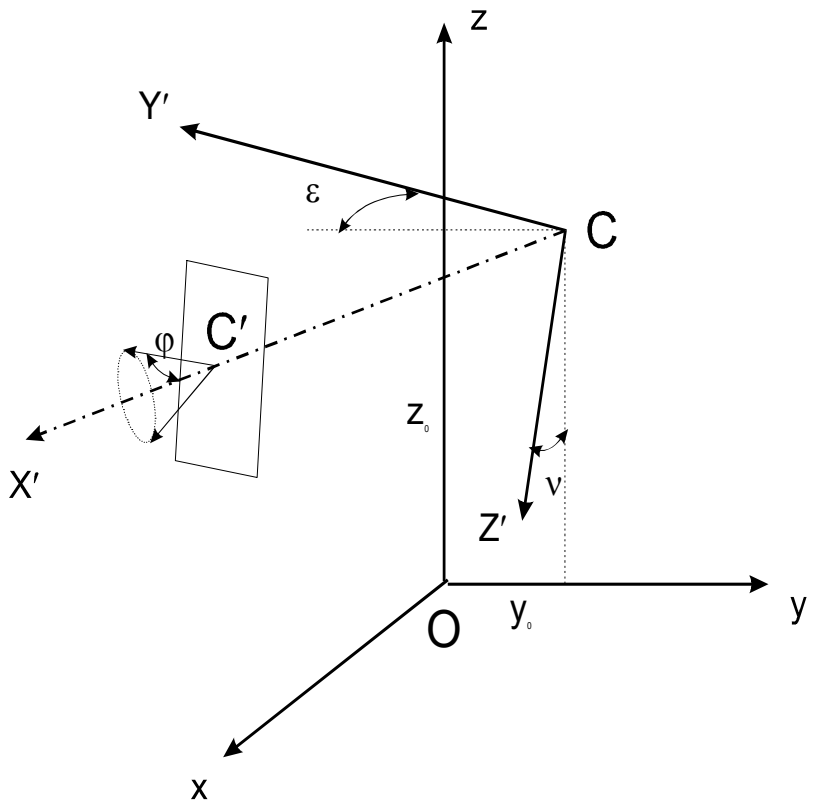


Рисунок 1.12 – Схема определения положения плоскости вращения

Наиболее распространенным в настоящее время для определения комплекса геометрических параметров объектов является координатно-измерительный метод контроля.

Сущность координатно-измерительного метода измерения состоит в том, что любой геометрический элемент (или элементы) можно представить состоящим из отдельных точек, и если определить координаты этих точек, то по соответствующим формулам (алгоритмам) можно рассчитать его геометрические параметры (размеры и отклонения формы), и узнать расположение этих элементов в пространстве, и между собой (координатные размеры и отклонения расположения) [193].

Измерения геометрических параметров координатными методами можно разделить на две стадии:

- собственно измерения – определения значения координат отдельных точек (точек измерения) относительно выбраненной системы координат,

- расчет на основе математических моделей и алгоритмов геометрических параметров деталей по полученным координатам точек измерения.

В работе [186] приведены значения минимального числа точек, по значениям координат которых могут быть определены размеры и положение геометрически идеальных базовых элементов: линий, плоских и пространственных фигур (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Минимальное число точек, по которым могут быть определены размеры и положения базовых элементов

Элемент	Минимальное число точек
Прямая	2
Окружность	3
Плоскость	3
Сфера	4
Цилиндр	5
Конус	6

Для измерения параметров реальных элементов, имеющих отклонения формы, количество точек выбирают на основании требуемой надежности и точности измерений. В работе [231] приведено рекомендуемое их количество, которое сведено в таблице 1.2.

Контрольно-измерительные машины

Основным средством контроля геометрии изделий координатно-измерительным методом являются контрольно-измерительные машины (КИМ) [40, 276].

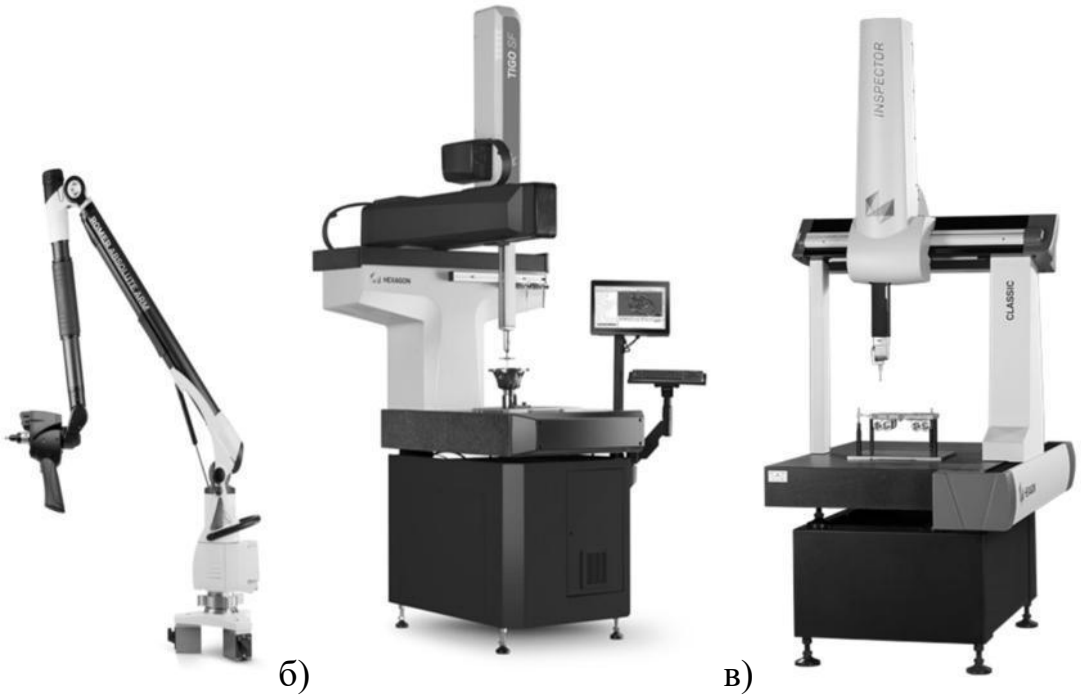
На основе значений координат точек, полученных КИМ, с использованием встроенного программного обеспечения (ПО), формируют числовую модель детали. Существенную роль при построении модели изделий имеют последовательно выполняемые расчеты, в результате которых устанавливающие взаимосвязь элементов изделий номинальных и реальных.

Таблица 1.2 – Рекомендуемое количество точек для определения параметров размеров и положения реальных элементов

Вид элемента	Отношении допустимого отклонения формы к допуску размера или расположения (в %)			Измерение отклонений формы элемента
	до 10	от 10до 50	свыше 50	
	Число точек измерения, не менее			
Прямая	3	10	30-50	30-50
Окружность	4	15	30-50	30-50
Плоскость	4	15	50-100	90-100
Сфера,	б	18	40-70	40-70
Цилиндр	8	25	40-80	40-80
Конус	12	36	50-100	50-100

В ходе этих расчетов проводится: определение геометрии заменяющих элементов (поверхностей и линий) идеальной формы, описывающие реальные элементы изделий; преобразование координат из системы измерительной машины в систему изделия; введение эквидистантной коррекции (для контактных измерительных головок) учитывающей геометрию щупа и направления нормали; вычисление расстояний и углов между элементами; расчет отклонений размеров, формы и расположения поверхностей и линий, а также суммарных отклонений формы и расположения.

В настоящее время разработана большая номенклатура КИМ, позволяющая измерять до 6000 мм и имеющая различные компоновочные решения, основные из которых представлены на рисунке 1.13.



а) б) в)

Рисунок 1.13 – Основные типы КИМ:

а) рычажные (измерительные руки), б) консольные (стоечные), в) портальные

Основные характеристики КИМ с контактной измерительной головкой (ИГ) представлены в таблице 1.3 [24, 57, 98, 246].

Недостатками координатно-измерительных машин являются: длительность процедуры контроля, которая является следствием низкой частоты сканирования (не более 100 Гц для механических систем) и последовательного получения координат измеряемых точек, методические погрешности, возникающие в процессе измерения сложных поверхностей [97, 146, 167, 213], высокая стоимость оборудования.

Современные КИМ используют как контактные измерительные головки (ИГ), так и бесконтактные оптические [264]. Использование оптических ИГ позволяет повысить скорость сканирования, уменьшить систематические погрешности, связанные с формой наконечника и траекторией сканирования, однако точностная надёжность измерений может снижаться, при этом стоимость возрастает.

Таблица 1.3 – Основные характеристики КИМ с контактными ИГ

Модель / Параметры	ALTERA M 8.7.6	MH3D 454	HC90 10.4.6 T	Mu1ti GAGE
Тип	портальная	портальная	консольная	рычажная
MPEE (мкм) (L в мм)	1,5 + L/375	3 + 4 L/1000	1,9 + L/250	5+L'/40<18
Повторяемость результата измерений, мкм	1,5	2,5	2	8
Диапазон измерений, мм	800x700x600	460x510x420	1000x400x600	10…1200
Max. скорость. мм/с	833	760	51	-
Max. вес изделия, кг	450	227	956	-
Габаритные размеры, мм	2083x1786x2702	970 x 930 x 1620	-	-
Вес брутто, кг	1739	300	-	12,85
Диапазон рабочих температур, °C	18-22°C	20±2	18-22°C	20±3
Стоимость,	-	36 270 Евро	-	-

В качестве примера в таблице 1.4 представлены основные характеристики КИМ с ROMER Absolute Arm [267].

Оптические средства комплексного контроля

Для измерения линейных размеров все шире применяются оптические системы контроля, поскольку этот метод позволяет проводить измерения с большей скоростью, чем механическое ощупывание. Другим преимуществом метода является возможность бесконтактного измерения размеров большого количества двумерных изделий, основные параметры которых определяются в плоскости или могут быть на нее спроектированы, то есть это листовые объекты и секущая формообразующая поверхность осесимметричных деталей типа «тела вращения» (контроль проекции), и для измерений объемных изделий, для которых основной характеристикой являются параметры профиля (например, определение вылета и контроль геометрии режущего инструмента).

Таблица 1.4 – Основные характеристики КИМ с оптическими ИГ

Модель / **Параметры**	ROMER Absolute Arm SE с внешним сканером, HP-L-20.8	ROMER Absolute Arm SI с внутренним сканером, RS4
Пространственная погрешность	от ± 0.033мм до 0.179 мм	от ± 0.033 мм до ±0.179 мм
Повторяемость	от ± 0.023 до 0.141 мм	от ± 0.023 мм до ±0.141 мм
Погрешность сканера	± 0.036 мм	± 0.028 мм
Погрешность сканирующей системы	от ± 0.046 до 0. 203 мм	от ± 0.050 до 0.214 мм
Макс. темп захвата точечных данных	150000 точек /с	752000 точек/с
Сканер	HP-L-20.8	RS4, встроенный
Точек на строку развертки	Макс. 4000	7250
Частота строк (развертки при сканировании)	Макс. 100 Гц	Макс. 100 Гц
Ширина линии развертки	20 мм - 231 мм	115 ± 35 мм
Расстояние до объекта	180 мм ± 40 мм	165 ± 50 мм
Расстояние между токами (мин.)	0.013 мм	0.011 мм (линия)
Контроль мощности лазера	Автоматический (по точкам)	Полуавтоматический - по строке развертки
Контроллер	нет	нет
Лазерная безопасность	Класс 2М	Класс 2М
Рабочая температура	0˚С - 50˚С, 10-42 ºС (Тр сканера)	0˚С - 50˚С, 5-40 ºС (Тр сканера)
Вес	от 7,9 до 9,8	от 8,3 до 10,1 кг

Профильные проекторы

Проекторы предназначены для проведения проверки правильности профиля изделия: «по его проекции в проходящем свете; проверки деталей, имеющих на поверхности разметку в виде точек, в отраженном свете» [172].

Проекторы обычно имеют несколько сменных объективов, позволяющих получать увеличения от 10^x до 200^x [45]. В зависимости от увеличения телецентрических объективов (от 10^x до 100^x) поле зрения проекторов составляет от 24,5-30 мм до 3 мм.

В качестве примера можно рассмотреть проектор измерительный ПИ 600ЦВ1 [172] с диаметром экрана 600 мм (рисунок 1.14), с цифровым

отсчетом на индикаторном табло, с расположением оптической оси объектива в вертикальной плоскости.

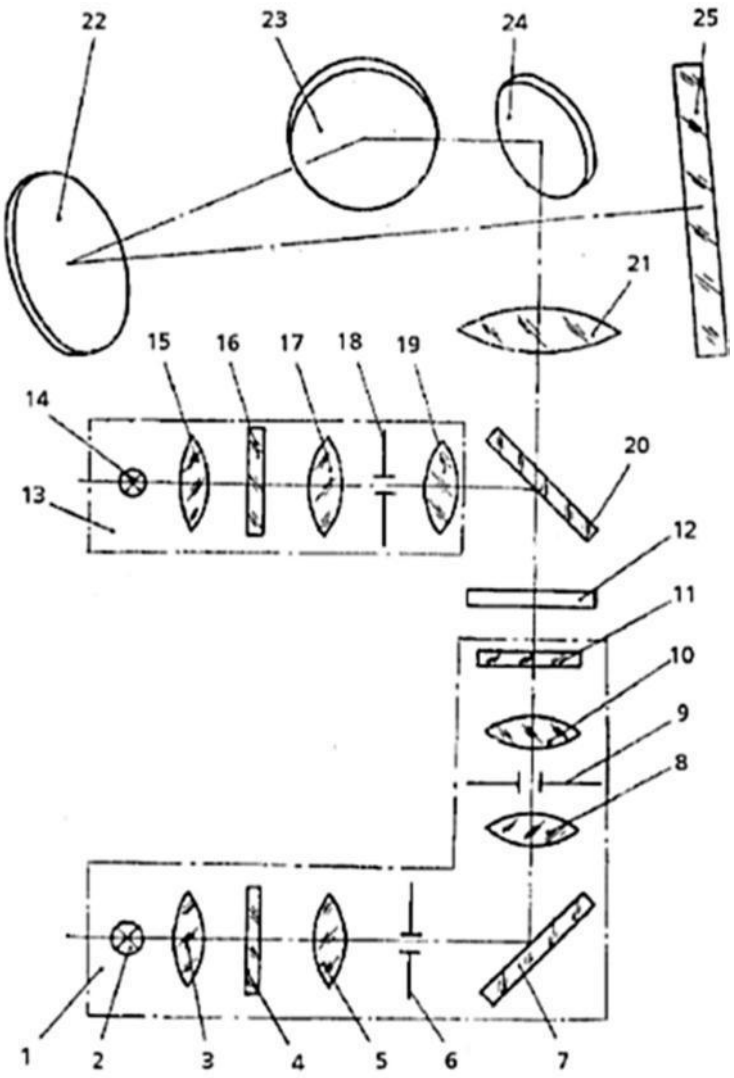


Рисунок 1.14 – Схема оптическая принципиальная проектора измерительного ПИ 600ЦВ1
Позициями на рисунке обозначены следующие компоненты проектора: 1 - осветитель проходящего света; 2 - лампа; 3 - линза коллектора; 4 - теплофильтр; 5 - панкратический блок линз; 6 - полевая пиафрагма; 7 - зеркало; 8 - коллективная линза; 9 - апертурная лиафрагма; 10 - линза коноенсора; 11 - светофильтр; 12 - прелметное стекло; 13 - осветитель отраженного света; 14 - лампа; 15 - линза коллектора; 16 - теплофильтр; 17 - панкратический блок линз; 18 - апертурная пиафрагма; 19 - линза коноенсора; 20 - зеркало; 21 - обьектив; 22. 23, 24 - зеркала; 25 - экран

К приборам проекционного типа можно отнести и средства настройки инструмента вне станка, например компании [274] *Elbo Controlli* (рисунок 1.15). Оптическая система включает: телецентрическую линзу, двухлинзовые объективы с малой диафрагмой F, эпископический осветительный прибор с круглой линзой и красными светодиодами, диаскопический осветительный прибор с красным светодиодами.

Рисунок 1.15 – Сканирующая головка проектора для контроля профиля *ELBO Larth*

3D системы сканирования

В работе [64] бесконтактные 3D-сканеры разделены на две группы – активные и пассивные (рисунок 1.16).

Рисунок 1.16 – Классификация измерительных 3D систем

Характеристики некоторых моделей 3D-сканеров [1] для измерения геометрических параметров изделий приведены в таблице 1.5. Рассматривались модели, способные контролировать изделие размером не менее 100 мм.

Большинство сканеров, обеспечивающих возможность контроля изделий с разрешением более ± 0,5 мм, выполнено по бинокулярной схеме со структурированной подсветкой [151].

Оптические 3D-сканеры весьма требовательны к освещению и к отражающей способности поверхности контроля [230]. При сканировании изделий, имеющих отражающую поверхность с явно выраженной индикатрисой отражения, ошибки оцифровки увеличиваются. Для их минимизации требуется применение специальных антибликовых спреев для матирования поверхности.

Таблица 1.5 – Основные характеристики 3D-сканеров

Модель 3D сканера		*Sense Next Gen*	*PRO 2M NEW*	*Capture*	*Go! SCAN 3D 50*	*FOCUS S70*
Производитель	-	*3D Systems*	*Range Vision*	*3D Systems*	*Creaform*	*FARO*
Дальность	м	0,2 – 1,6	-	-	0,3–3,0	0.6 – 70
Рабочее расстояние	мм	-	900	300	400	
Рабочая зона /размер объекта	мм	- /от 200 до 2000	460x345x345	276x74x49	-	-
Погрешность определения 3D точки	мм	-	0,06	0,08	до 0,1	± 1
3D разрешение мм	мм	± 0,9	±0,19	0,12	±0,5	на 10м: 0,3 мм [2]
Разрешение камер: глубина текстур	Pix/ Mp	240x320 1920 x 1080	2x1,3Мп/ 1.8	-	-	8 Мп
Технология	-	проекция точек	триангул. со структ. освещ.	триангул. со структ. освещ.	лазерная фазовая триангул.	лазерное фазовое скан.
Скорость, до	точек/с			985,000	550000	976000
Цена[3]	руб.	38 500	760000	1 113 000	2 192 000	2 500 000

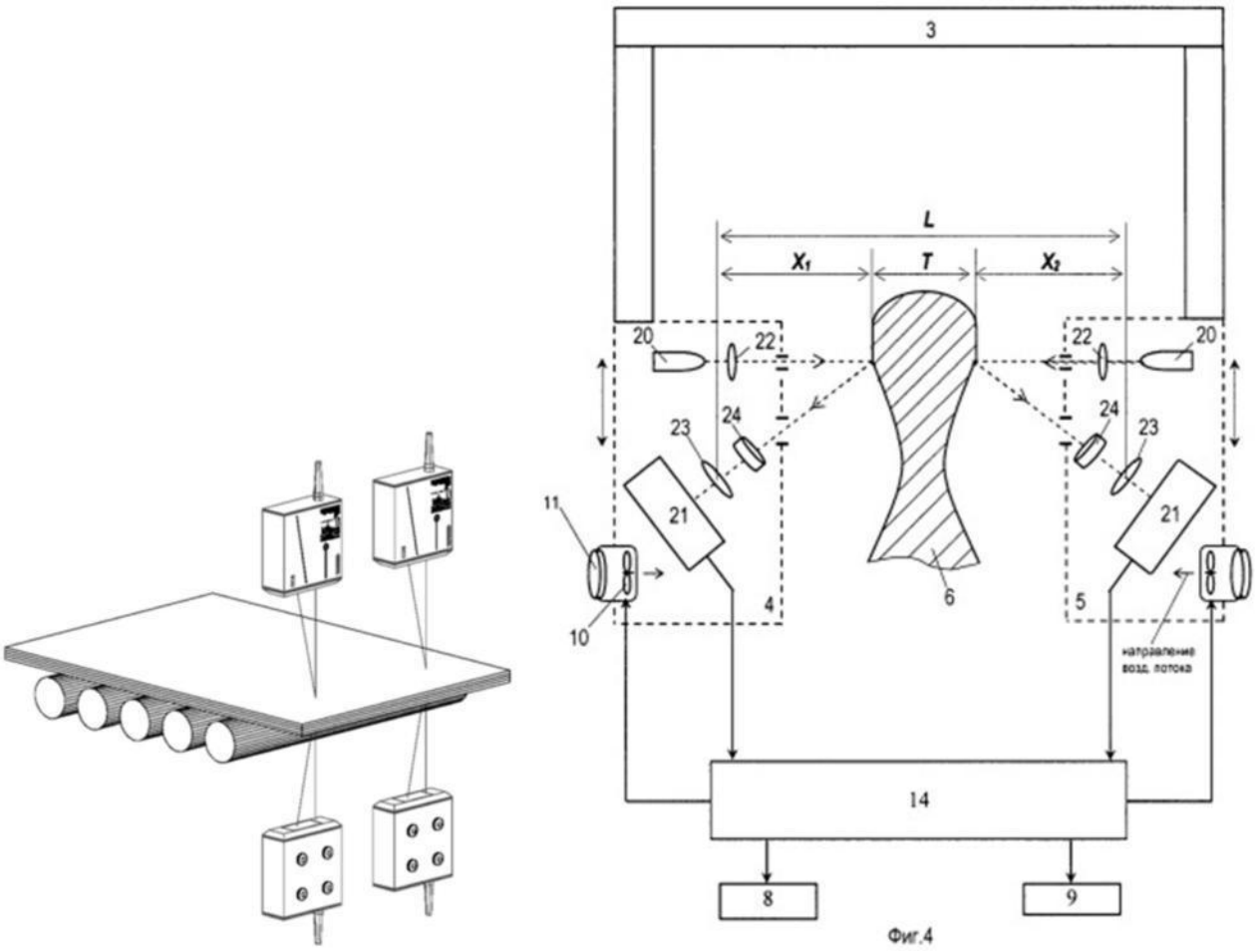
[1] – при коэффициенте отражения 10 – 90%

[2] – при альбедо 90%/ 0,4мм при альбедо 10%

[3] – на 11.2020

Контроль листовых изделий

Основными параметрами контроля листовых изделий обычно является их толщина, длина и ширина. Оптико-электронные системы чаще всего используют дискретные датчики расстояния, как правило, построенные на основе триангуляционного принципа измерения расстояния до объекта контроля. Такие системы измеряют параметры объекта контроля в движении в направлении, перпендикулярном его перемещению. В качестве примера систем с дискретными датчиками можно привести установку «*Croptimizer*» компании *Lap GmbH*, (Германия) и система компании "*Kawasaki Steel*" (Япония) [169] (рисунок 1.17а). Аналогичное решение использовано в патенте [63, 145] (рисунок 1.17.б).



а) б)

Рисунок 1.17 – Триангуляционный метод контроля толщины листовых материалов

Контроль сортового проката

В качестве примера оптико-электронной системы контроля сортового проката можно рассмотреть контроль рельс, описанный в работах [36, 75]. Схема расположения оптических элементов в системе контроля рельса приведена на рисунке 1.18.

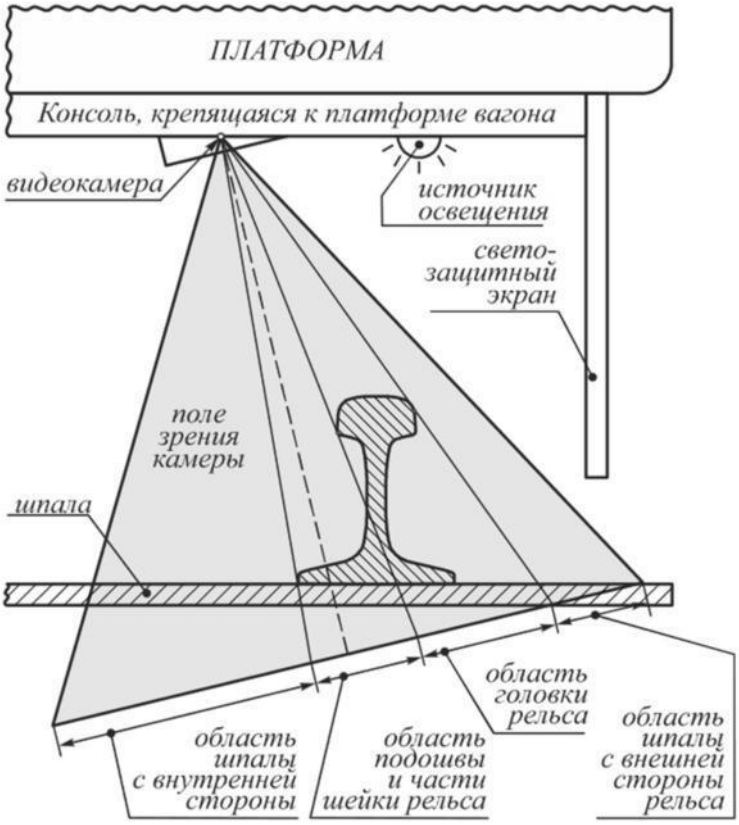


Рисунок 1.18 – Схема контроля рельса

1.2.1 Контроль стекол

Задача контроля стекла относится к задачам контроля листовых объектов с высокой степенью светопропускания (прозрачных). В задачи контроля входят выявление пороков, их классификация и определение геометрических параметров для сравнения с требованиями ГОСТа. Существующие в настоящее время методы контроля листового стекла можно классифицировать в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.19 [30].

В настоящее время основным методом на предприятиях, изготавливающих изделия из стекла, остается органолептический контроль пороков стекла. Метод

заключается в том, что стекло (или изделия из стекол) осматривается человеком, параметры найденных пороков оцениваются с применением следующих средств измерений по ГОСТ 32557-2013: «линейкой по ГОСТ 427 с ценой деления не более 1 мм, микрометром по ГОСТ 6507 с ценой деления не более 0,01 мм, штангенциркулем по ГОСТ 166-89 с ценой деления не более 0,1 мм, толщиномером индикаторный с ценой деления не более 0,01 мм, диаметр измерительного диска (50±5) мм, рулеткой по ГОСТ 7502 с ценой деления не более 1 мм, треугольником класса точности не ниже 2 по ГОСТ 3749, строительным уровенем по ГОСТ 9416, набором щупов класса точности не ниже 2, лупой по ГОСТ 25706 с ценой деления не более 0,1 мм.» [49].

Рисунок 1.19 – Классификация методов контроля пороков листового стекла

Ультразвуковая дефектоскопия применяется для выявления внутренних дефектов, позволяя определять глубины залегания пороков и их размеры.

Для предприятий, изготавливающих листовое стекло, разработаны системы контроля: *Fene Vision* и *Gognex* (США), *IRSA* и *Dr. Schenk* (Германия) (рисунок 1.20). Основные возможности данных систем представлены в таблице 1.6 [30].

Таблица 1.6 – Характеристики известных систем контроля листового стекла

Производитель / Параметры	*IRSA* (Германия)	*Dr. Schenk* (Германия)	*Fene Vision* (США)	*Gognex* (США)
Тип датчика	нет данных	CCD камеры	Лазерный сканер	нет данных
Система освещения	используется	Светодиодное освещение	отсутствует	используется
Контролируемые пороки	Пузыри, сколы, царапины	Пузыри, метал-лические включения; сколы, царапины	Пузыри, царапины, отпечатки валков	Пузыри, камни; сколы, царапины; оптические искажения
Классификация дефектов	нет	частичная	нет	присутствует (система классификации Smartlearn)
Минимальные размеры детектируемых дефектов	более 1 мм	нет данных	не менее 0,1 мм	нет данных
Конструктивные особенности	Специализа-ция на контроле лобовых стекол автомобилей	разделение дефектов и поверхност-ных загрязнений; 2D и 3D визуализация	скорость контроля 0,5 м/с; разрешение 400 точек на дюйм; вывод на дисплей интересующих областей контроля	SmartView Glass system базируется на платформе Windows

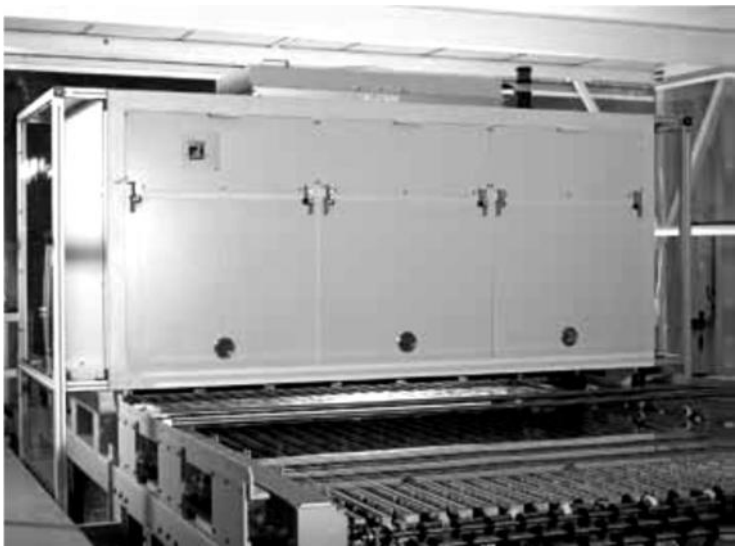


Рисунок 1.20 – Система контроля листового стекла фирмы *Dr. Schenk – Glass Inspect*

Недостатками систем *Dr. Schenk* и *Gognex* является то, что системы рассчитаны на высокую производительность предприятий изготовителей и имеют высокую стоимость, как начальную, так и эксплуатационную. Такие системы нецелесообразно устанавливать на предприятиях, использующих изделия из листового стекла в своей продукции. В системах *IRSA* и *Fene Vision* отсутствует система классификации объектов и не обеспечивается выявление всех видов пороков, определяющих качества стекла в соответствии с российскими стандартами. В системе *IRSA* минимальный размер распознаваемого дефекта превышает величину, требуемую по ГОСТ, в 2 раза.

1.2.2 Контроль тел вращения

Для автоматизированного контроля изделий типа «тела вращения» в настоящее время используются как контактные средства, так и бесконтактные.

Контактные средства контроля

Контактные средства контроля в основном представлены измерительными головками. В качестве примера таких систем можно представить изделия компании *Renishaw*.

Основными задачами решаемыми датчики *Renishaw* [212] являются:

- привязка систем координат заготовки и станка
- контроль размеров заготовки в процессе ее обработки на токарных и шлифовальных станках.

Контроль размеров выполняется между операциями технологического процесса, например, после предварительной обработки, для обеспечения необходимой точности последующей обработки и выявления ошибок до появлению бракованного изделия.

Кроме основных задач контактные датчики могут: «быть использованы для решения вспомогательных задач, таких как:

– идентификации заготовок при использовании гибких производственных систем (ГПС),
– определения положения заготовки, а также обнаружения ее неправильной загрузки с целью исключения брака,
– распределения припусков на обработку с тем, чтобы быстро и безопасно подвести режущий инструмент к заготовке» [212].

На рисунке 1.21 показан токарный станок с числовым программным управлением (ЧПУ), оснащенный контактным датчиком LP2 с оптической передачей сигнала LTO2, для которой прием оптического сигнала осуществляется с помощью приемника OMM [93].

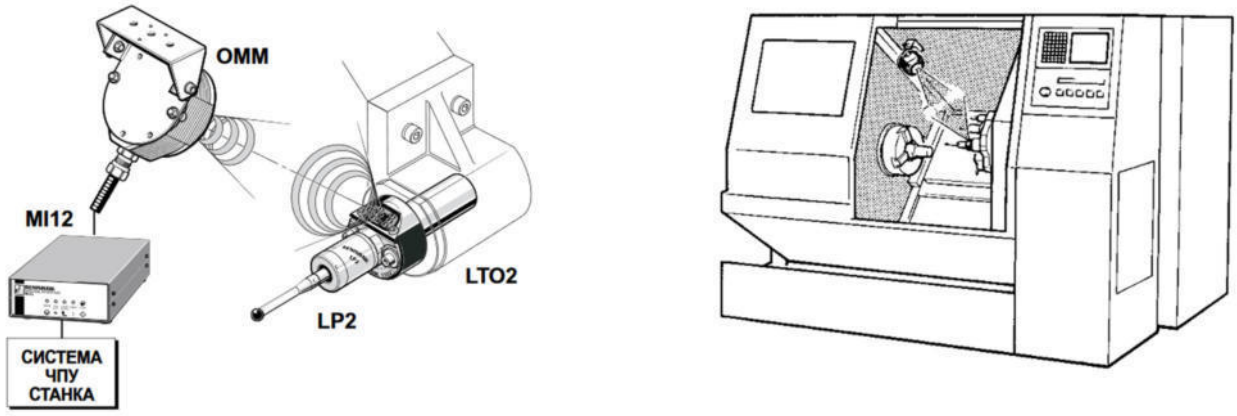


Рисунок 1.21 – Схема установки датчика LP2 с оптической передачей сигнала LTO2

Основные характеристики контактных датчиков компании *Renishaw* для токарных станков с ЧПУ представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Основные характеристики контактных датчиков *Renishaw*

Модель	LP2	LP2H
Область применения	Горизонтальные токарные станки	
Направление измерений	во всех направлениях: X, *Y, *Z	во всех направлениях: ± X. i Y. *Z
Однонаправленная повторяемость макс. (2σ) на наконечнике щупа ±	1,0 мкм	2,0 мкм
Вес	65 г	65г
Усилие срабатывания (заводская настройка), Н Плоскость XY - минимальное усилие Плоское ib XY - максимальное усилие В направлении +Z	Регулируется 0.50 0.90 5,85	Не регулируется 2 4 ЗО
Макс. Допустимое отклонение щупа плоскость xy в направлении +z	 ±12,5° 6,5 мм	 ±12.5° 5,0 мм
Стандартная длина щупа максимальная длина щупа	50 мм 100 мм	50 мм 150 мм
Степень защиты	IPX8	IPX8
Крепление	Резьбовое соединение M16 для подключения систем LTO, удлинители и переходники.	
Совместимые интерфейсы ¥	OMI или OMM / MI12 при использовании LT02S / LT02T / LT03T / LT02 MI5 / MI8 / MI8-4 при кабельном подключении	

MI5 при использовании индуктивной передачи сигналов

Из таблицы видно, что по точностным параметрам датчики такого типа перекрывают потребности текущего контроля изделий на станках, однако их использование невозможно в процессе обработки, что не позволяет оперативно диагностировать отклонения. Кроме того, как и для ранее рассмотренных КИМ процесс оценки геометрии изделия занимает достаточно много времени вследствие последовательного определения координат контролируемых точек, что уменьшает долю основного времени в технологическом цикле.

Основной проблемой контактных систем является то, что их точность зависит от состояния станочного оборудования и определяется его точностью. Информация о перемещениях измерительной головки снимается со штатных

датчиков станка и зависит от состояния направляющих технологического оборудования. Это приводит к дополнительным погрешностям и не позволяет вносить поправки на состояние металлорежущего оборудования.

Бесконтактные средства

Системы контроля геометрии основных формообразующих поверхностей осесимметричных тел, использующие оптический метод и определяющие их размеры на основе изображения проекции сечения (проекционный способ), позволяет измерять линейные размеры в диапазоне от 0,01 мм до 10^3 мм с погрешностью до ~ 0,001 мм – 0,1 мм [101].

В качестве примера таких систем можно представить измерительные системы *Vici Vision* [254], которые предназначены для контроля тел вращения, таких как: валы, ШРУСы, фитинги, клапаны, винты, болты и.т.п. Использование системы температурной компенсации, по диаметру и длине детали, позволяет повысить точность измерения в цеховых условиях. Изображение установки и схема контроля *Vici Vision* представлено на рисунке 1.22.

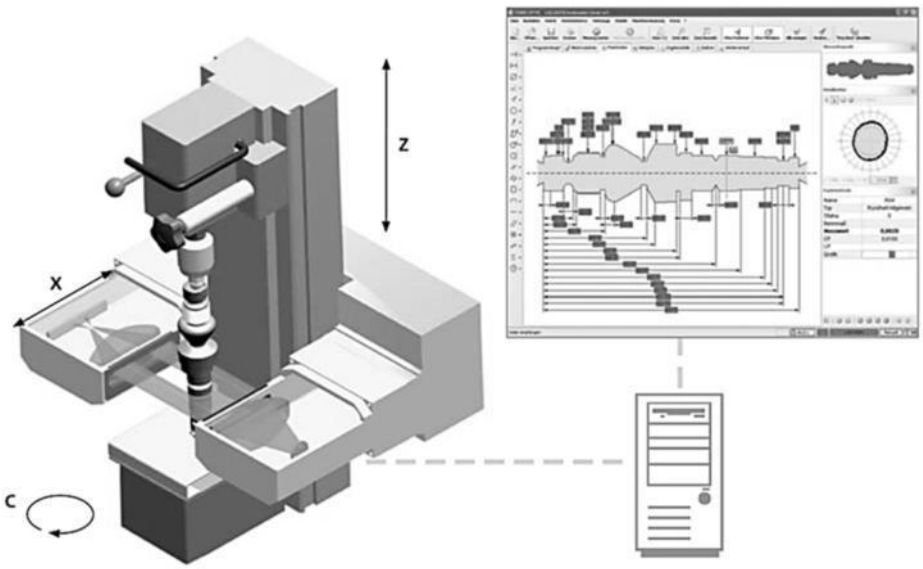


Рисунок 1.22 – Изображение установки и схема контроля *Vici Vision*

Принцип получения измерительной информации при контроле тел вращения показан на рисунке 1.23 и основан на получении и обработке проекции профиля детали в проходящем параллельном световом пучке. Оптический

измерительный блок состоит из источника света и видеокамеры с линейной ПЗС-матрицей, которые расположены с двух сторон от детали и перемещаются параллельно.

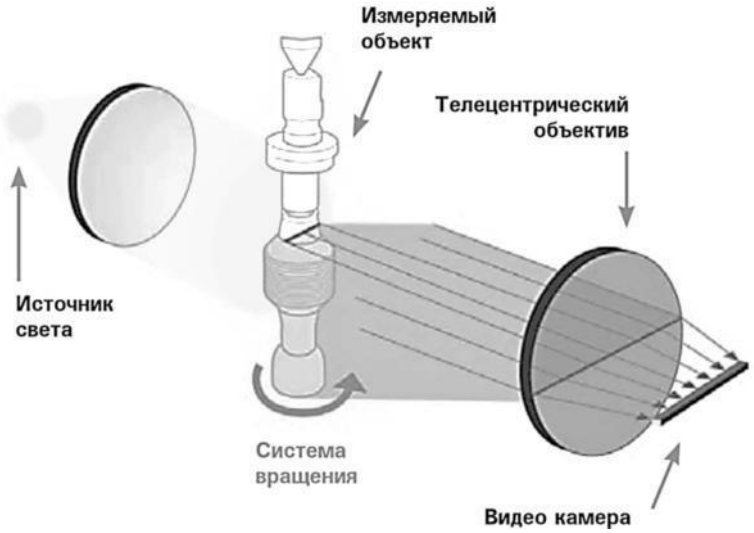


Рисунок 1.23 – Принцип получения измерительной информации системой *Vici Vision*

Измерительная система *Vici Vision* может осуществлять продольное сканирование детали для ее теневого изображения при перемещении оптического блока вдоль детали и круговое сканирование при установке оптического блока на заданной высоте и вращения детали в центрах на полный оборот для определения биения. Основные характеристики промышленных оптических измерительных систем *Vici Vision MT* представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Основные характеристики промышленных оптических измерительных систем VICIVISION MTL

	Ед.	MTL 500 Ergon X-Stream	MTL 850 Ergon X-Stream	MTL 1250 Ergon X-Stream
Диапазон измерений	мм	500 x Ø170	850 x Ø170	1250 x Ø170
Максимальный размер детали	мм	500 x Ø250	870 x Ø250	1270 x Ø250
Максимальный вес детали	кг	30	60	60
Погрешность измерений диаметра	мкм	2,5 + D[мм] / 100	2,5 + D[мм] / 100	2,5 + D[мм] / 100
Погрешность измерений по высоте	мкм	5 + L[мм] / 100	5 + L[мм] / 100	5 + L[мм] / 100
Электропитание	В	230	230	230

Вертикальная измерительная сканирующая видеосистема для контроля валов *WMM DR. SCHNEIDER MESSTECHNIK* предназначена для комплексного контроля линейных размеров и формы поверхностей валов сложной формы (кулачковых, распределительных, коленвалов и т.д.), а также симметричных и несимметричных тел вращения [37]. Измерительная система, может производить измерения тремя методами:

– обработки светового контура детали в проходящем параллельном свете;
– контроля поверхности в отраженном свете;
– контактного сканирования (щуп Renishaw SP25).

Автоматизированная система контроля линейных размеров в партии деталей показана на рисунке 1.24 [138, 141]. Система реализует проекционный метод и позволяет измерять диаметры изделий в диапазоне 2-3 мм. В системе используется комплект телецентрической оптики. Исследования показали возможность обеспечения динамического диапазона измерения и абсолютной погрешности 2.9±0.005 мм.

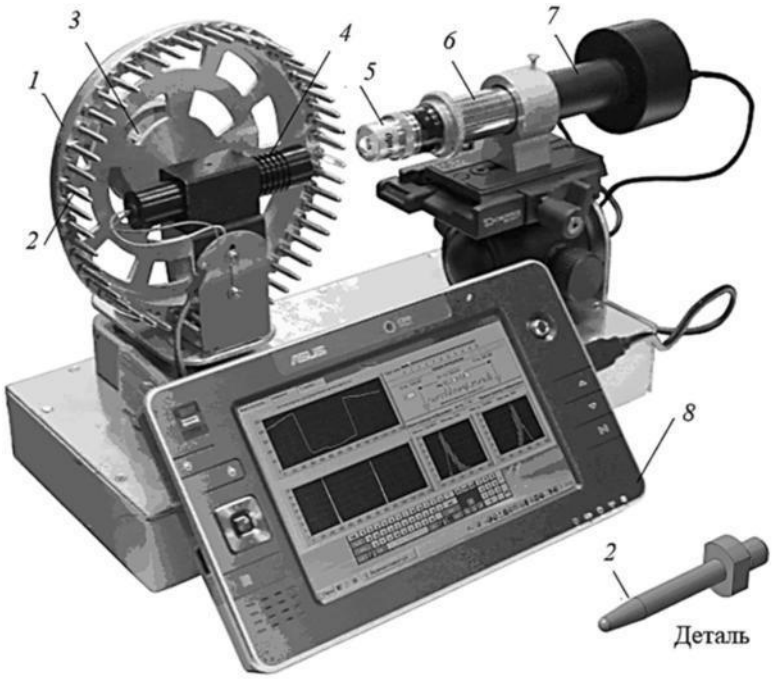


Рисунок 1.24 – Общий вид автоматизированной системы контроля линейных размеров партии деталей

Программная часть системы контроля реализована в среде *LabVIEW* в виде виртуальных приборов. Подача изделий в зону контроля осуществляется шаговым приводом.

Рассмотренные примеры показывают, что оптические системы контроля геометрических параметров тел вращения с телецентрическим объективом и коллиматорными осветителями получили достаточно широкое распространение. Основными ее недостатками являются: высокая стоимость оптической системы и ограниченные размеры объекта контроля (до 250…300 мм), определяемого размерами оптической системы.

Еще одним примером контроля осесимметричных изделий является контроль диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства. Использование оптикоэлектронной системы контроля проекционным методом в квазипаральнном пучке света рассмотрено в работах [222, 224], где предложено использовать две цифровые камеры как показано на рисунке 1.25.

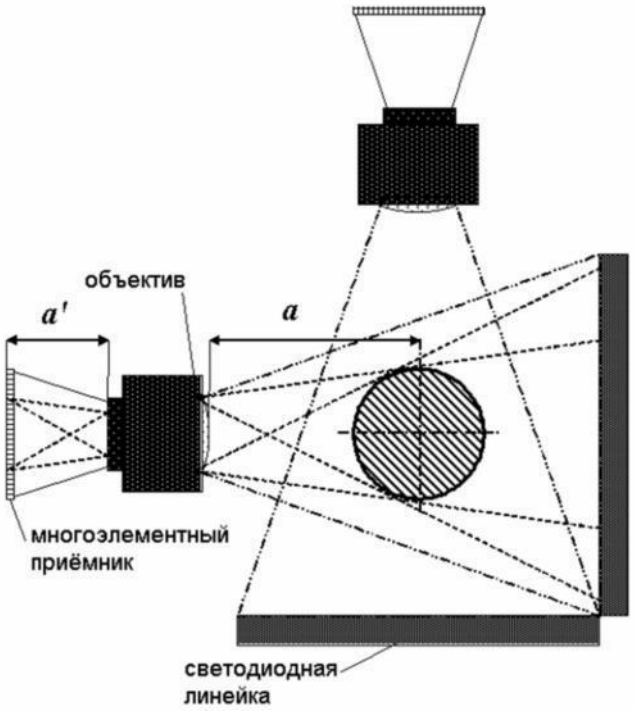


Рисунок 1.25 – Схема прибора для измерения овальности электрических кабелей в процессе их производства

Однако, как отмечено автором: «его применение для измерения больших диаметров затруднительно, так как требует использования высококачественной широкоапертурной, а следовательно, дорогостоящей оптики. Отсутствие представленных на российском рынке многоэлементных приемников соответствующей длины вынуждает использовать приёмники длиной до 30 мм, что делает реализацию описанного выше метода громоздкой и дорогостоящей» [221].

Использование не телецентрической оптики привело к необходимости решения проблем с калибровкой камер. Нерешенные проблемы с калибровкой цифровых камер в пространстве изображений привели к отказу от использования цифровых камер и переходу к схеме, которая: «содержит два измерительных канала, оси которых *X* и *Y* взаимно перпендикулярны (рисунок 1.26). В каждом канале имеется точечный излучатель (лазер), создающий расходящийся световой поток и многоэлементный линейный фотоприемник, измеряющий размер тени объекта» [221].

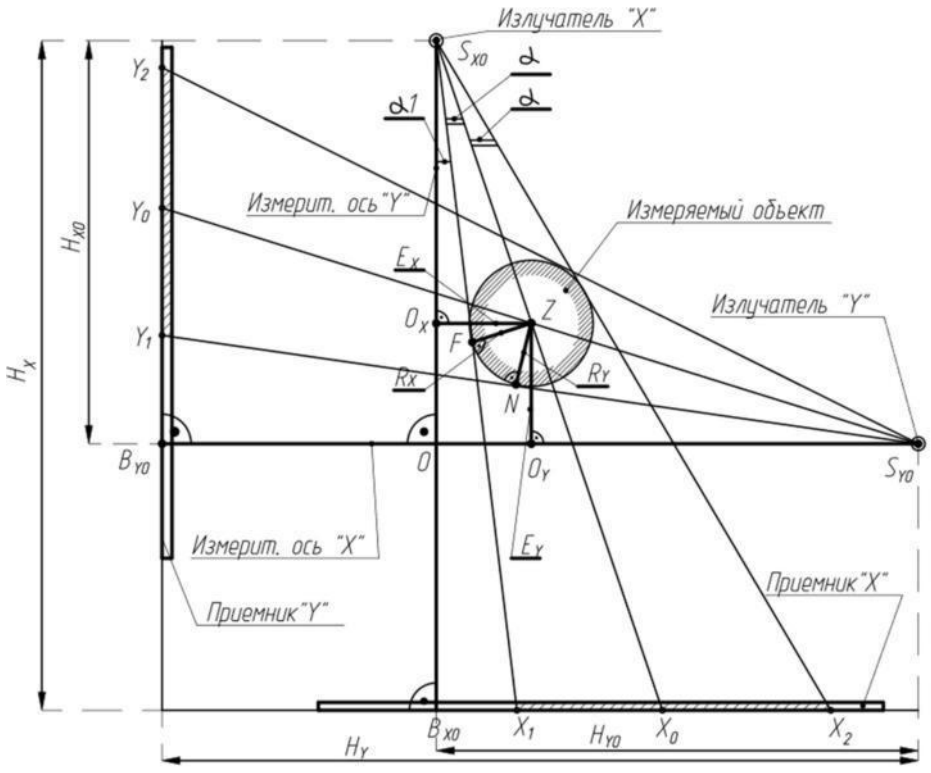


Рисунок 1.26 – Геометрическая схема использования двух точечных излучтелей и приемников с ПЗС

Недостатком двухкоординатной схемы измерений для оценки формы качества электрических кабелей является методическая ошибка оценки овальности, связанная с тем, что ее определяют исходя из разности диаметров по двум измерительным осям, значения которых напрямую зависят от ориентации объекта внутри измерительного поля. Использование трёхканальных систем [71, 223] (рисунок 1.27) может решить данную проблему.

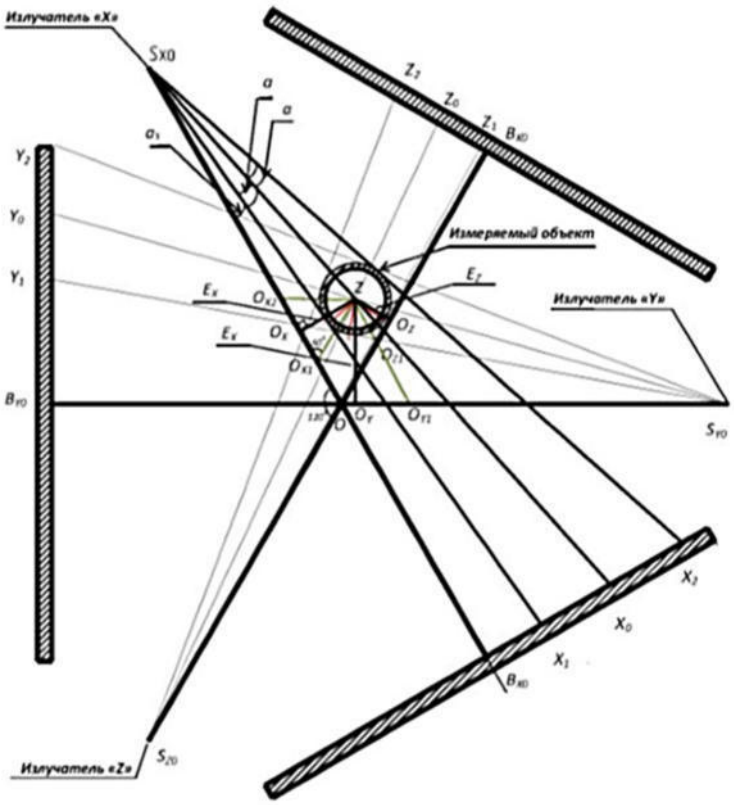


Рисунок 1.27 – Расчетная схема прибора с тремя измерительными осями

Кроме пассивных схем контроля для оценки геометрии осесимметричных тел используются и активные схемы. В работе [160] предложена концепция определения положения тел вращения для компенсации их смещения относительно цифровой камеры.

В работе [277] рассмотрена активная схема контроля тела вращения в процессе обработки, состоящая из лазерного линейного осветителя и цифровой камеры 1.3 Мп (рисунок 1.28). Недостатком данной схемы является возможность контроля изделий только в одном сечении изделия.

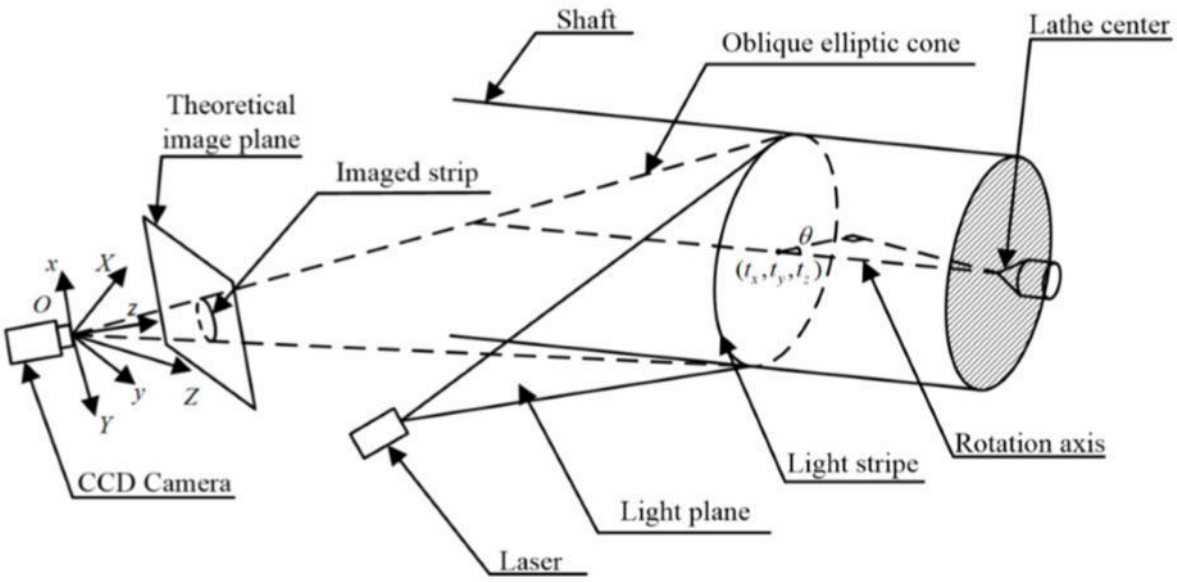


Рисунок 1.28 – Активная схема контроля тела вращения

1.2.3 Контроль параметров положения

Контроль прямолинейности.

Существующие методы и средства контроля станочного оборудования могут быть классифицированы согласно схеме рисунке 1.29 [88].

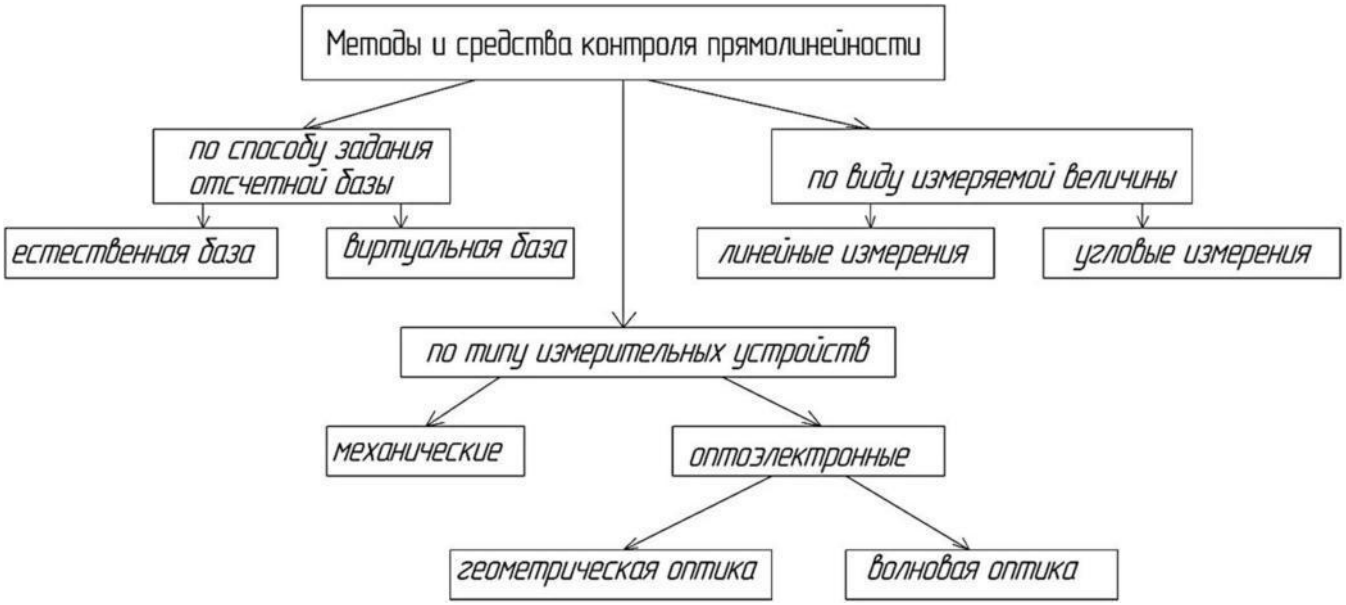


Рисунок 1.29 – Классификация методов и средств контроля станочного оборудования

Методы измерения прямолинейности могут быть основаны на линейных измерениях либо на угловых измерениях [58].

Сущность методов измерения линейных величин заключается в том, что непосредственным измерением определяется координата элементарной площадки относительно исходной прямой. По координатам крайних площадок устанавливаются относительно друг друга измеряемый объект и исходная прямая; измерения координат остальных площадок (не являющихся крайними) независимы друг от друга.

Результаты измерений наносятся на график (рисунок 1.30) для окончательной обработки. На рисунке обозначено: 1 – расчетная линия; 2 – эталон прямолинейности; 3 – отклонение от прямолинейности.

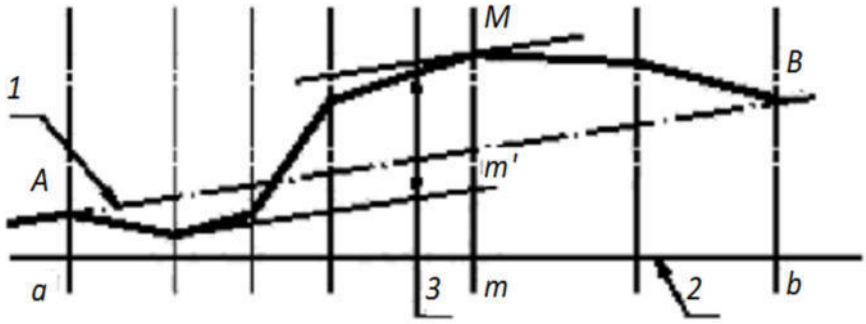


Рисунок 1.30 – Сущность методов контроля прямолинейности, основанных на линейных измерениях

Далее по графику фактических отклонений определяются верхний и нижний экстремумы, через которые проводятся прямые, параллельные расчетной линии. Расстояние между этими линиями определяет отклонение от прямолинейности (отрезок Mm’).

При этом эталон прямолинейности может быть как материальным (поверочная линейка, натянутая струна), так и задан в неявном виде виртуальной эталонной прямой линии (точный уровень, луч света).

Приведенные в стандарте [58] методы требуют наиболее простые средства измерения (поверочные линейки, поверочные угольники, контрольные оправки, уровни, индикаторы часового типа и т.п.), однако при этом являются трудоемкими и требуют больших затрат времени. Стандарт допускает

применение средств измерения, обеспечивающих точность измерений не ниже, чем средства, описанные в стандарте. Методы и средства, приведенные в стандарте, пригодны для оценки геометрической точности станков лишь в лабораторных условиях.

Известные приборы отечественных производителей: оптическая струна «ДП-477М» (рисунок 1.31), оптическая линейка «ИС-36М» и др. компании ГРАДАН для контроля формы и взаимного расположения поверхностей крупногабаритных изделий. Данные приборы не автоматизированы, громоздки, имеют сложное устройство [133].

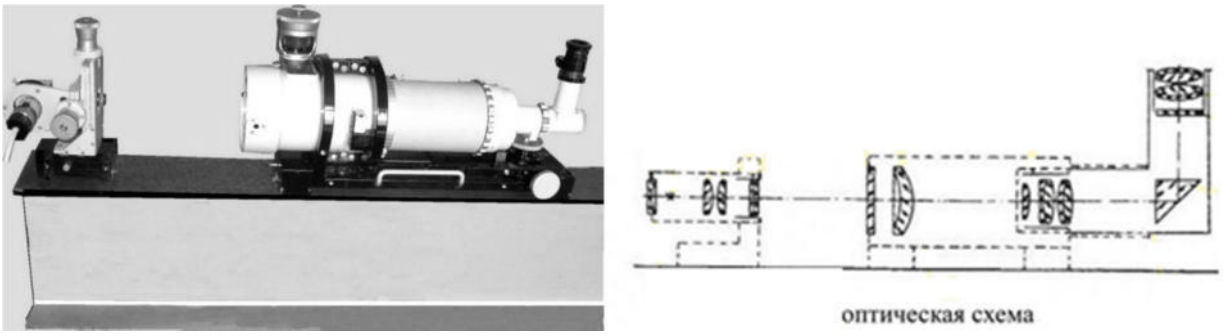


Рисунок 1.31 – Оптическая струна «ДП-477М»

Частично устранить данные недостатки можно с использованием системы с лазерным излучателем и фотоэлектрическим датчиком. Реализация данной схемы представлена на рисунке 1.32.

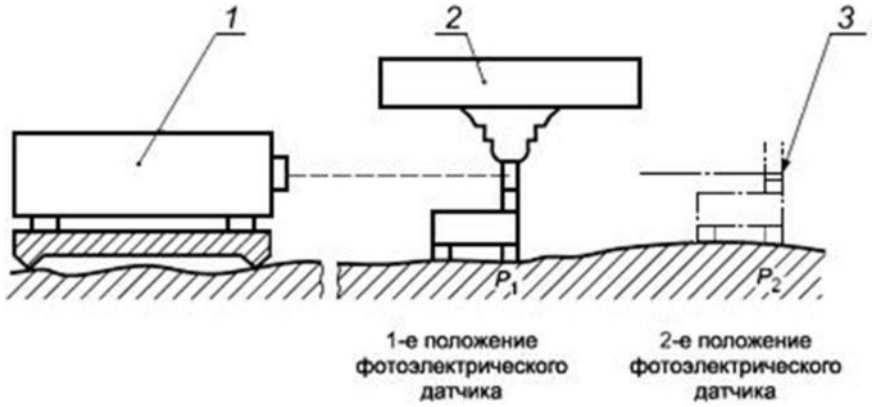


Рисунок 1.32 – Схема контроля прямолинейности с использование лазера и фотоэлектрического датчика: 1 - лазерный излучатель; 2 - регистрирующее устройство; 3 - фотоэлектрический датчик.

Луч лазерного источника направлен на позиционно чувствительный фотоэлектрический датчик с четырьмя секторами, который может перемещаться вдоль оси лазерного луча. Система может определять горизонтальные и вертикальные смещения луча относительно центра датчика. При измерении должно соблюдаться условие перпендикулярности датчика линии измерения.

Сущность оценки прямолинейности методом измерения угловых величин заключается в определении взаимного расположения двух соседних площадок последовательно по всей длине направляющей (рисунок 1.33).

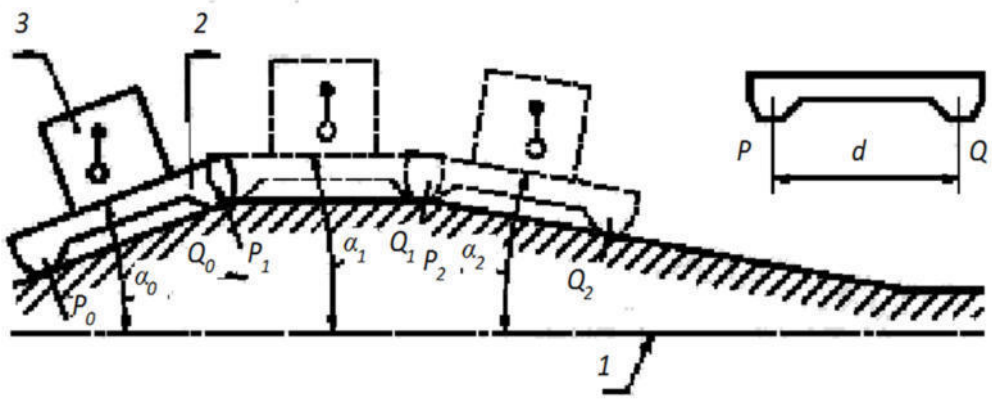


Рисунок 1.33 – Сущность методов, основанных на измерении угловых величин:
1 – эталонная линия; 2 – мостик; 3 – измерительный прибор

Затем результаты обрабатываются графически: по оси абсцисс откладывают расстояние d между опорами; по оси ординат – последовательность линейных приращений $E_{hi+1}=d \cdot tg\alpha_i$. По начальной и конечной точкам строится расчетная прямая; вся совокупность точек представляет собой кривую профиля. Величина отклонения определяется аналогично методам, основанным на линейных измерениях.

Метод с использованием лазерного интерферометра (режим угловых измерений) (рисунок 1.34). На рисунке обозначено: 1 - источник лазерного излучения; 2 - интерферометр; 3 - перемещаемый элемент.

При этом методе интерферометр должен быть жестко закреплен на элементе, на котором находится контролируемая линия. Этот метод наиболее

подходит для ответственных измерений, так как менее подвержен изменениям коэффициента преломления воздуха. База отсчета образуется двумя параллельными лучами F_1 и F_2, формируемыми лазерным интерферометром.

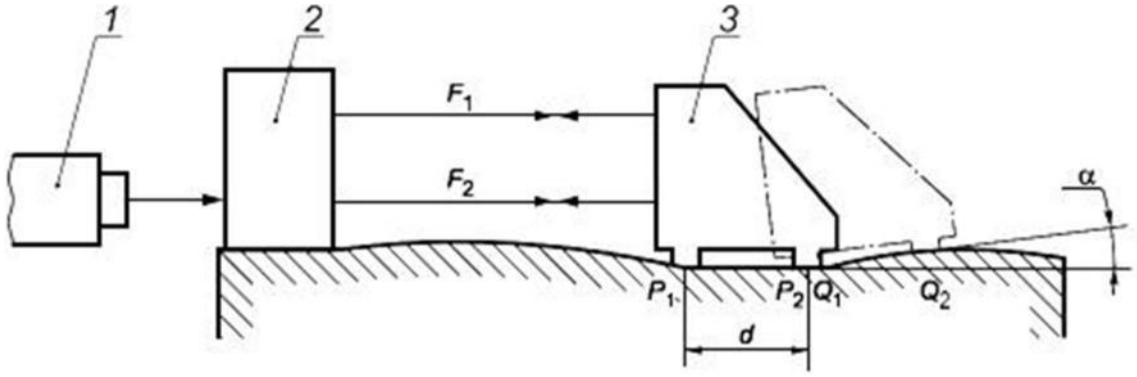


Рисунок 1.34 – Метод контроля прямолинейности с лазерным интерферометром в режиме угловых измерений

На сегодняшний день одними из наиболее точных средств определения прямолинейности являются лазерные интерферометрические системы. В качестве примера можно привести устройства *Renishaw* XL80 [130] (рисунок 1.35) и *Lasertex-Lasos* LL10.

Рисунок 1.35 – Лазерная интерферометрическая система *Renishaw XL80*

Необходимым условием корректной работы лазерного интерферометра является строгая компенсация воздействия изменений условий внешней среды, существуют решения, включающие в себя специализированный блок компенсации (*Renishaw XL*80). Сравнительные характеристики этих моделей приведены в [265]. Интерферометрические системы могут быть использованы в цеховых условиях, однако дороги в обслуживании.

1.2.4 Контроль положения оси и плоскости вращения

Контроль положения плоскости вращения до настоящего времени не выделен в отдельную задачу контроля геометрических параметров, рассмотрены только некоторые частные задачи, такие как контроль торцевого биения [74], контроль углового положения оси вращения [168], измерение углов поворота объекта относительно тройки ортогональных векторов [11, 94, 96].

Рассмотрим подробнее оборудование контроля положения оси вращения и плоскости на примере стендов контроля колес автомобилей. В зависимости от принципа работы стенды для проверки углов установки колес автомобиля классифицируют на статические и динамические. Первые предназначены для проверки углов установки колес, находящихся в состоянии покоя, вторые – для оценки тех же параметров на вращающихся колесах измерением прямых или косвенных параметров. Статические стенды можно классифицировать на: механические, оптические, электрические (электронные).

В основу всех стендов и приборов для проверки взаимного положения и углов установки колес автомобилей положен единый метод проверки геометрического положения плоскости колеса в прямоугольной системе координат. Различие большинства существующих конструкций стендов и приборов заключается в методах измерений и измерительных системах, с помощью которых определяется положение колес автомобиля [168, 226].

Для контроля этих параметров на колесах закрепляются проекторы, измерительные головки или мишени для 3D-систем. Главным недостатком такого подхода является необходимость выполнения дополнительных действий для определения положения этих устройств относительно оси вращения, что приводит к появлению дополнительных погрешностей и увеличению времени контроля. Получили распространение стенды на основе систем технического зрения, в том числе использующие стереоскопические измерения [159]. В последних стендах компании *Bosch* модели *FWA* 9000 используются четыре модуля с цифровыми стереокамерами и лазерной подсветкой для контроля каждого колеса [160, 164, 236]. Таким образом, видно, что для повышения точностной надежности и уменьшения времени контроля современные стенды постоянно усложняются и удорожаются.

Основные метрологические характеристики основных типов статических стендов представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Основные метрологические характеристики статических стендов

Стенд		Наименование измеряемых параметров			
Тип	Модель	Схождение колес		Развал колес	
		Диапазон	Погреш-ность	Диапазон	Погреш-ность
Оптический	119м	± 5°	± 10′	± 5°	± 10′
Электро-оптический	К - 111	0-30 мм	± 0.5 мм	± 15°	± 15′
	ПКО - 4	0-30 мм	± 0.5 мм	± 5°	± 15′
	Мотекс 7546(48)	0-30 мм	± 0.5 мм	± 5°	± 15′
	С лазерным излучателем	± 5°	± 5′	± 5°	± 5′
	BEAR	± 5°	0.01° (*	± 5°	0.01° (*
Электрон-ный	САС-9820	± 5°	± 10′	± 5°	± 10′

(* - индикации на экране монитора.

Погрешность измерения параметров положения плоскости вращения статическими стендами находится в пределах половины допускаемых диапазонов по ряду основных моделей отечественных легковых и грузовых автомобилей. Кроме того, эффективность этих стендов при проверке взаимного расположения мостов автомобилей (особенно грузовых) с большой колесной базой очень мала.

Развитие систем 3D-сканирования привело к попыткам использовать данные технологии и для определения положения углов установки колес автомобилей [163, 266], однако вопросы точностной надежности данного метода остаются открытыми.

1.2.5 Определение объемов

Задача определения объемов актуальна для многих отраслей промышленности.

Определение объемов за счет лазерного 3D сканирования [131]. Процесс определения включает следующие последовательно выполняемые действия:

1. 3D лазерное сканирование объектов съёмки;
2. сшивка полученных сканов в единое облако точек;
3. построение 3D моделей объектов съёмки;
4. вычисление объёмов объектов съёмки.

Подобные системы [179] могут быть использованы для определения объема сыпучих материалов на открытых и закрытых складах, цехах ГОК и фабрик, инвентаризации складов кокса, негашёной извести, руды, шихты, зерна и т.п.

На рисунке 1.36 показан пример монтажа лазерного 2D сканера на кране и созданная в реальном времени точная трехмерная цифровая модель насыпного материала на складе, формируемая за счет перемещения крана вдоль склада.

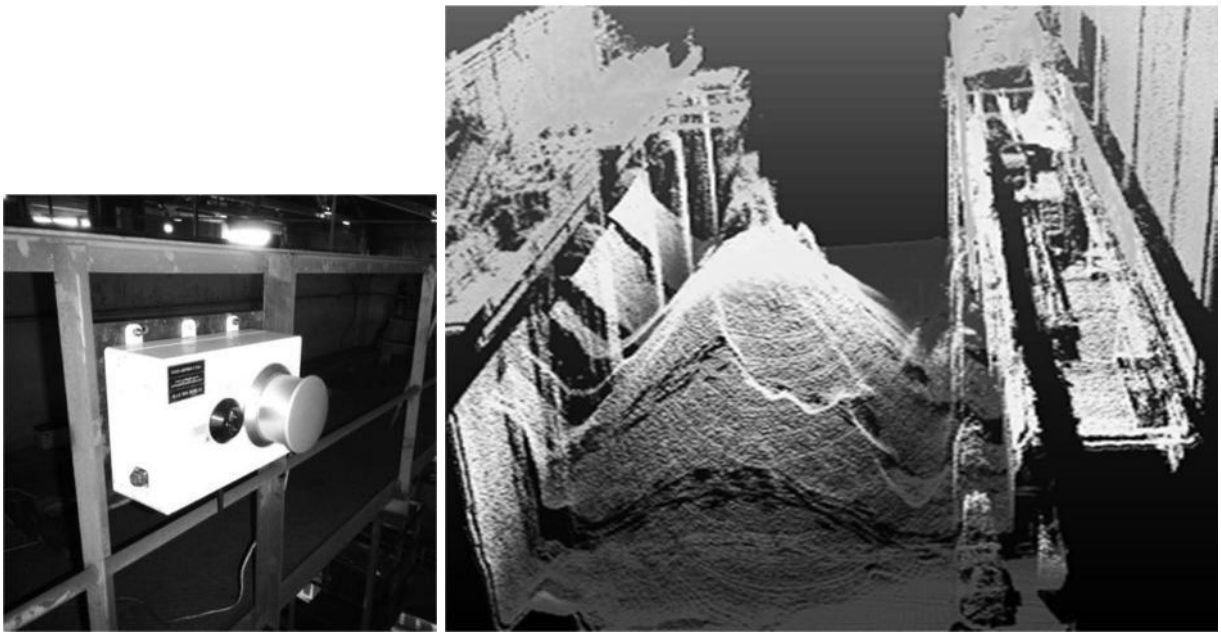


Рисунок 1.36 – Пример монтажа лазерного 2D сканера на кране и трехмерная цифровая модель насыпного материала на складе

Сканнер LVS [155] применяется для определения объема сыпучего материала в грузовые автомобили (самосвалы) с открытым кузовом, грузовик-трейлер, в комбинации с прицепами (в том числе бортовые самосвалы); дорожные автопоезда до 4 прицепов; внедорожные самосвалы (горная добыча, шахты, каменоломни); тракторные прицепы: максимум 3 м шириной, 4,25 м длиной для стандартных откидных сканнеров LVS. Для других ТС могут понадобится пользовательские перенастройки сканнера. LVS предназначен для работы с материалами «в виде частиц», которые формируют профили груза, и подходит для большинства добываемых каменных материалов, песка; ландшафтных материалов: коры, древесной щепы; других материалов: удобрений, зерен, порошков и т.д. Система не предназначена для использования на больших породах, коробках или других объектах обычной формы. Некоторые материалы, такие как влажный уголь или полупрозрачные / прозрачные материалы, могут не иметь достаточно высокой отражательной способности для работы с системой.

Интерфейс программного обеспечения системы точного объема сыпучего материала в кузове самосвала на базе сканера LVS показан на рисунке 1.37.

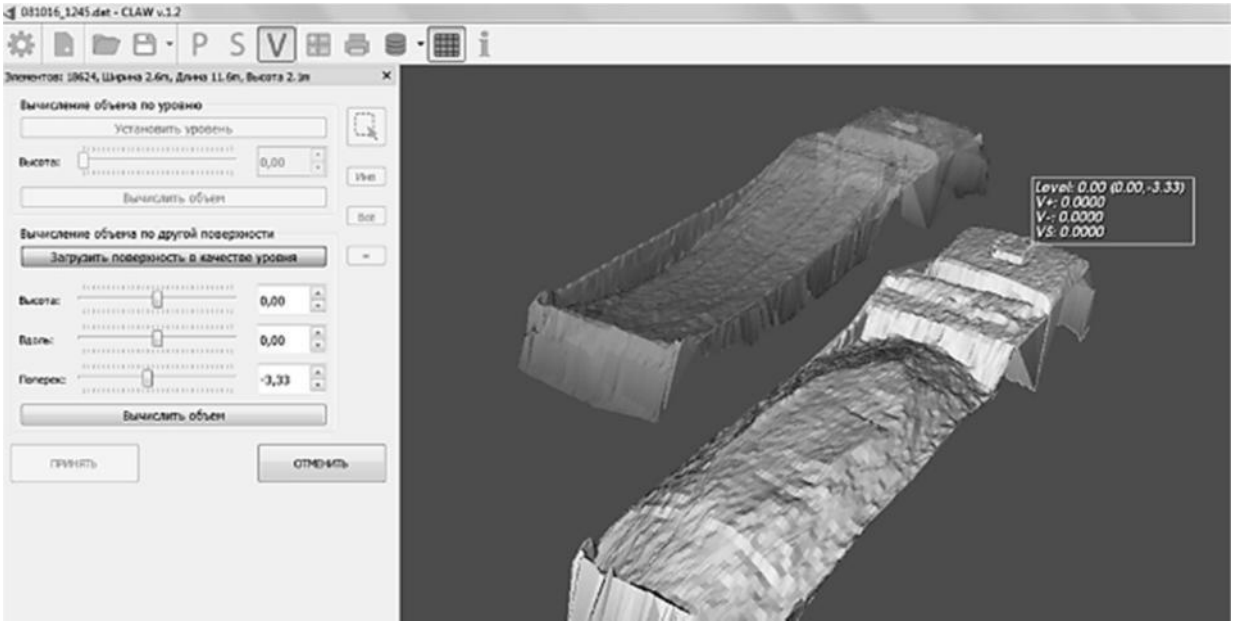


Рисунок 1.37 – Интерфейс программного обеспечения системы точного объема сыпучего материала в кузове самосвала на базе сканера LVS

Сравнительный анализ систем контроля сыпучих материалов представлен в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Технические характеристики систем определения объема сыпучих материалов

Характеристики	ПАК ИО	ПАК ЛВ	сканнер LVS
Дальность измерения расстояния обоими лазерами, м	до 150 *	4,5 … 20	5-10
Шаг измерения угла сканером:	0.01 град** 0.1 град***	0.01 град** 0.1 град***	-
Разрешающая способность, мм	10	10	от 5 до 10
Скорость движения для достижения макс. точности измерений, м/сек	0,5	от 5 до 10	0,5-6,0
Погрешность работы ПАК ИО, %	менее 2	менее 2	менее ±1

* при погрешности -17 мм

** на скорости вращения 1 об/сек

*** на скорости 10 об/сек

Бесконтактное измерение объема круглых лесоматериалов может быть представлено работой [207] ИИТ и Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. Измерительный комплекс предназначен для определения пачки древесины по ее торцевому изображению на основе результатов стереометрической съемки. Система в автоматическом режиме обеспечивает выделение всех срезов стволов в пачке, проводит расчет их площадей, выполняет поиск границ пачки древесины и расчет ее площади.

На рисунке 1.38 показаны этапы работы системы определения объема круглых лесоматериалов: а) внешний вид пачки древесины, б) и в) исходная стереопара, г) результаты анализа изображения.

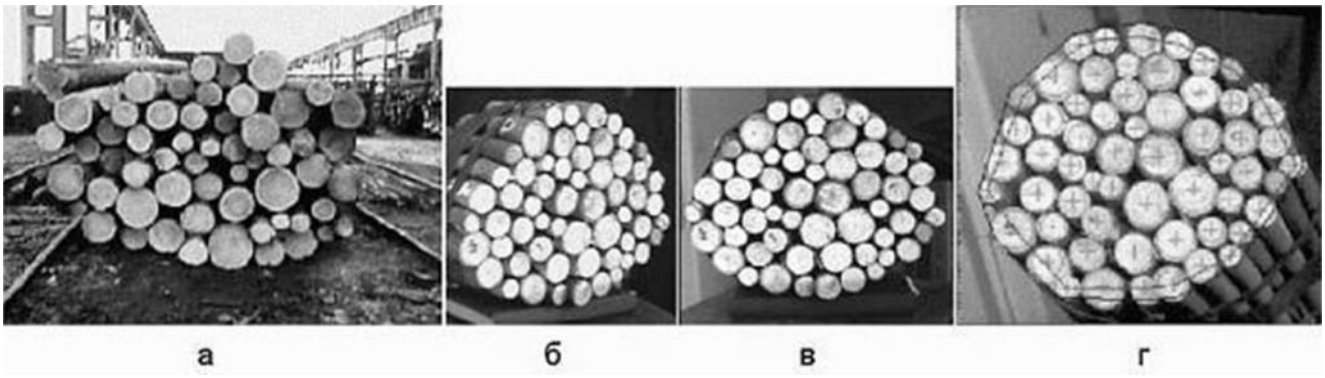


Рисунок 1.38 – Этапы работы системы определения объема круглых лесоматериалов

Основные направления исследований и развития оптико-электронных средств бесконтактных измерений изложены в работах [108, 122, 192].

1.3 Оптико-электронные системы контроля

1.3.1 Классификация оптических методов контроля

В ГОСТ Р 53696-2009 «Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения» под термином «оптический неразрушающий контроль; оптический контроль» понимается «неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля» [53]. Количественная оценка по диапазонам длин волн электромагнитного излучения содержащимся в ГОСТ 23479-79 «Методы оптического вида контроля основаны на применении электромагнитного излучения в диапазоне длин волн 10^{-5} от до 10^{3} мкм» [46] в новую редакцию стандартов не перешло.

В ГОСТ Р 56542-2019 «Национальный стандарт российской федерации. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Non-destructive testing. Classification of types and methods» [55] оптические методы классифицированы по 3 основным признакам (таблица 1.11). Согласно данной классификации рассмотренные средства оптического контроля геометрических параметров могут быть отнесены: по характеру взаимодействия к методам прошедшего и рассеянного излучения при контроле непрозрачных объектов и прошедшего для прозрачных; по информативному параметру – геометрическому и способу получения первичной информации – визуально-оптическому.

Во вступившем в действие в 2019 г. ГОСТе Р 58399-2019 «Контроль неразрушающий. Методы оптические. Общие требования» появился новый термин – «**пространственный метод оптического излучения; метод с пространственным разрешением**: метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации пространственных характеристик оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля, а также физических характеристик оптического излучения как функции одной двух или трех координат – соответственно методы с одномерным (1D), двумерным (2D),

трехмерным (3D) разрешением» [56], классифицирующий метод по признаку – первичный информативный физический параметр.

Таблица 1.11 – Классификация методов оптического контроля

Признак	По характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
Виды	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Индуцированного излучения	Амплитудный Фазовый Частотный Временной Поляризационный Геометрический Спектральный	Интерференционный Нефелометрический Голографический Рефрактометрический Рефлексометрический Визуально-оптический

Однако уточнения понятия термина "с пространственным разрешением" показывают несамостоятельность данного метода и то, что он «может входить в названия других методов неразрушающего контроля, показывая, что соответствующие физические величины регистрируются и анализируются как пространственные распределения, например фазовый с пространственным разрешением, абсорбционный с пространственным разрешением». По этому же классификационному признаку в п. 3.11 присутствует «**геометрический метод оптического излучения; угловой метод**: метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации направления распространения оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля: разности углов распространения световых волн или угла отклонения световой волны». Их сочетание – **пространственный геометрический метод оптического излучения**

должен был бы характеризовать методы, лежащие в основе большинства рассмотренных средств контроля геометрических параметров.

В рассматриваемом классификационном признаке также выделен «п. 3. 17. **телевизионный метод; непрямой визуально-оптический метод; непрямой визуальный контроль**: Метод оптического неразрушающего контроля, основанный на визуальном анализе изображения контролируемого объекта, регистрируемого оптико-электронными устройствами, средствами фото- и видеотехники» [56], который характеризует средство регистрации изображений контролируемого объекта. Однако термин «визуальный» в составе данного метода и его определение в п. 3.15 [56] перечеркивает возможность использования данной системы для автоматического (то есть без непосредственного участия человека) получения измерительной информации, что противоречит целям и задачам большинства рассмотренных систем. Вместе с тем в литературе широко используется термин – оптико-электронные системы (ОЭС) для описания систем с использованием преобразователей оптического излучения в электрический сигнал. В это определение попадают как системы с простейшими системами индикации и использующие **амплитудный** [56] принцип получения информации (например, фотодиоды), так и системы с цифровой регистрацией изображения.

Таким образом, системы оптического контроля геометрических параметров, использующие цифровые камеры для фиксации измерительной информации и получающие информацию об объекте контроля на основе его 2D изображения, в настоящее время как средства метрологического обеспечения автоматизированных систем управления не вынесены в отдельный метод оптического контроля и его можно рассматривать как разновидность – **оптический контроль геометрическим методом с пространственным разрешением**. Разновидность данного способа является контроль в проходящем свете, за которым традиционно закрепилось название **проекционного** способа оптического контроля.

1.3.2 Обобщенная схема получения измерительной информации в оптических системах контроля геометрическим методом с пространственным разрешением

Принципы бесконтактных оптических измерений могут быть реализованы при наличии совокупности устройств, обеспечивающих получение и обработку измерительной информации.

Согласно ГОСТР 53696 — 2009 [59] «**прибор неразрушающего контроля оптический**: Система, состоящая из осветительных, оптических и регистрирующих устройств, а также средств калибровки и настройки, предназначенная для оптического неразрушающего контроля».

Особенностью оптических систем контроля реализующих геометрический метод является: «то, что оценка параметров объекта контроля проводится не непосредственно, а по его изображению. Для того чтобы изображение передавало информацию об объекте контроля с заданной точностью, необходимо соблюсти ряд требований:

- контрастное выделение характерных точек, линий или поверхностей объекта измерения на его изображении,
- знание взаимного расположения объекта контроля и элементов измерительной системы,
- сохранение условий передачи измерительной информации при смене объекта измерения.

Объект с его естественными свойствами может не удовлетворять перечисленным требованиям, и для их выполнений следует формировать на объекте контроля источник исходной информации.

В самом общем смысле оптическая система, реализующая оптический метод с пространственным разрешением, отображает пространство предметов, содержащее объект контроля, в пространство изображений, содержащее его изображение. При этом в пространстве изображений используется не вся

передаваемая информация, а та ее часть, которая содержит объект измерения и характеризует необходимые контролируемые свойства» [196, 197]. Примером такой реализации может служить схема контроля детали типа «тело вращения», показанная на рисунке 1.39, реализующая так называемый проекционный способ с использованием дискретных датчиков. Деталь типа «тело вращения» закрепляется в положении когда ее ось симметрии совпадает с плоскостью наведения P объектива O_2. Коллимированный световой поток Ф проходящий через объектив O_2 проецирует теневое изображение сечения детали на плоскость P', в которой определены шесть областей контроля. Фотодатчики 1 и 2 установлены на линиях, определяющих диаметр d_1, 3 и 4 – диаметр d_2, 5 и 6 настроены на контроль размеров h_1 и h_2 соответственно.

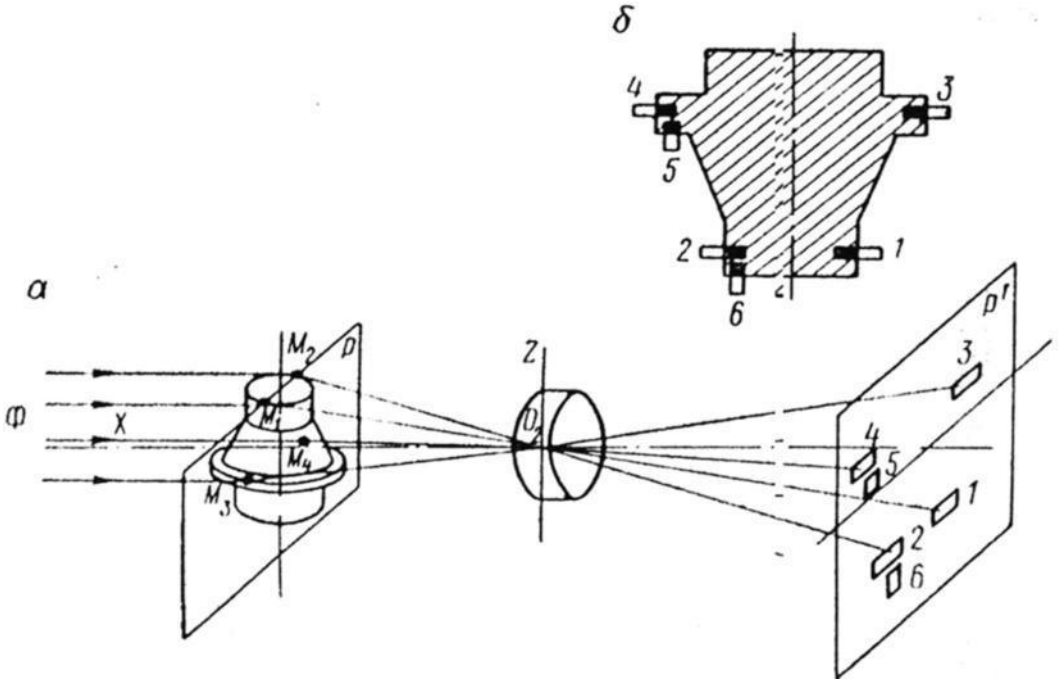


Рисунок 1.39 – Проекционный способ контроля размеров осесимметричной детали

На рисунке 1.40 приведена блок-схема получения измерительной информации оптико-электронной системой (ОЭС) контроля [193], показывающая совокупность операций при измерениях.

Можно выделить два вида схем бесконтактных измерений по принципу наличия устройства (или устройств) формирования исходной информации. ОЭС,

содержащие в своем составе такие устройства, называют активными, а не содержащие – пассивными. При этом такая классификация не противоречит наличию системы подсветки в составе пассивных систем, которая необходима для соблюдения первого требования к изображению – контрастного выделение элементов объекта контроля.

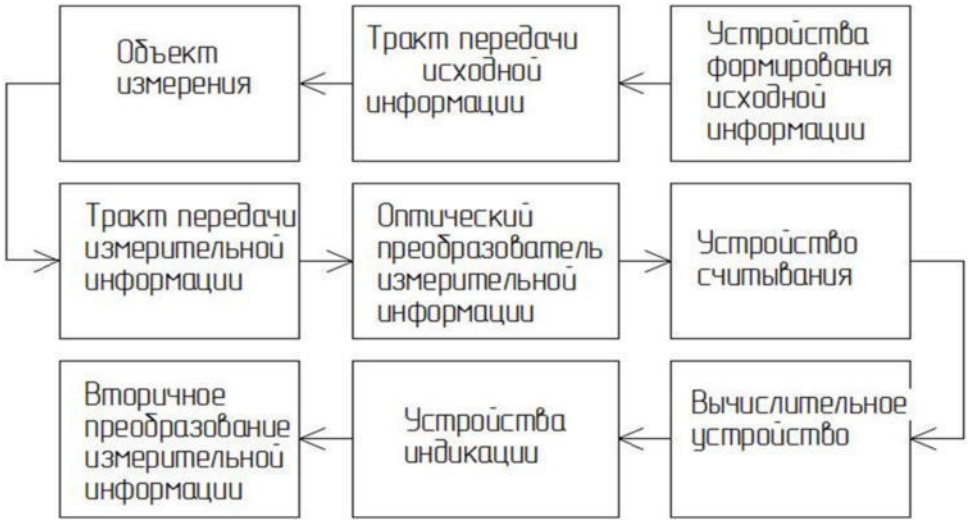


Рисунок 1.40 – Блок схема получения информации оптических измерений

Подсистема формирования исходной измерительной информации активных ОЭС представляет собой оптическую систему, которая проектирует на поверхность объекта светящуюся марку (пятно, штрих, совокупность штрихов и.т.п.), контрастно выделяющуюся на фоне объекта. В пассивных ОЭС для контрастного выделения объекта контроля из окружающей среды используются специализированные системы освещения, которые могут использовать различные типы источников света (светодиоды, люминесцентные и галогенные лампы и т. д.).

Проходя по тракту передачи исходной информации, световой поток в виде структурированного излучения к поверхности объекта контроля может испытывать различные воздействия на него (рассеяние, рефракция), приводящие к искажению светящейся марки.

Объект контроля: «как звено в схеме преобразования измерительной информации характеризуется оптическими свойствами: коэффициентом

отражения и поглощения (для прозрачных объектов), индикатрисой рассеяния и постоянством их в пределах поверхности одного объекта и при переходе от одного объекта к другому» [193]. Параметры объекта контроля существенно влияют на схемные решения по компоновке элементов измерительной системы.

От объекта измерения световой поток, содержащий информацию об объекте измерений, проходит через тракт передачи к оптическому преобразователю, испытывая как помехи, аналогичные передающему тракту, так и специфические, оказывающие существенное влияние на точность передачи измерительной информации.

Для определения координат точек и отрезков в пространстве изображений используются методы, сущность которых заключается в том, что все пространство изображений или его часть смещается относительно неподвижной системы координат. Тем самым изображение предметной точки приводится в заданное положение, фиксированное в неподвижной системе координат. Необходимое для этого перемещение пространства изображений служит мерой определяемого параметра (длины, координаты и т. п.) и может осуществляться с использованием оптических преобразователей.

Считывание измерительной информации осуществляется оптико-электронными преобразователями. Для этого могут использоваться как отдельные фотоприемники, так и сложные системы на основе одной или нескольких цифровых камер (черно-белых или цветных) с подходящей оптикой для получения изображений. Цифровые камеры выполняет функцию определения координат точки измерения в пространстве изображений.

Вычислительное устройство и устройство считывания результата функционально не связаны с процессом измерения, однако в современных ОЭС является неотъемлемой его частью и включают: процессор (современный ПК с многоядерным процессором или встроенный процессор), программное обеспечение обработки изображения, которое предоставляет инструменты для разработки отдельных приложений программного обеспечения, и оборудование ввода/вывода или каналы связи.

Схема на рисунке 1.40 отображает все звенья в цепи последовательных преобразований, необходимых для получения информации о размере в общем случае автоматических измерений. В конкретных случаях возможны изменения в схеме, в частности, сокращение числа функциональных блоков.

Существуют две разновидности схем измерений: «для систем, содержащих устройство формирования исходной информации, и систем, не имеющих его. Первые называют системами активного, а вторые – пассивного типа. Различие между ними заключается главным образом в способах индикации положения точек и линий» [193].

Основными характеристиками аппаратуры оптического вида контроля должны быть:

- разрешающая способность;
- диапазон рабочих температур;
- поле зрения;
- предел допускаемой основной погрешности измерения (для аппаратуры с измерительной системой).

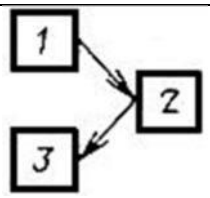
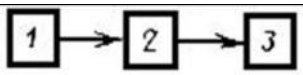
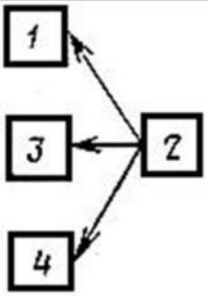
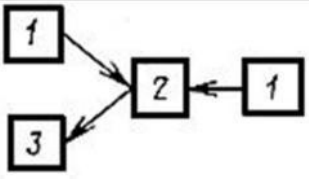
1.3.3 Системы формирования исходной информации

Измерительная информация формируется одним из двух способов: освещением объекта световым потоком с определенными параметрами или проектированием на поверхность объекта светящейся марки (штрих, растр, совокупность точек и т. п.).

Системы освещения

Объект с его естественными свойствами в общем случае не имеет точной ориентации относительно измерительной системы, контрастного выделения точек измерения, необходимой освещенности. В ГОСТе 23479-79 [46] были выделены четыре метода, характеризующих систему измерений по положению ее элементов относительно осветительной системы (таблица 1.12).

Таблица 1.12 – Классификация методов по относительному расположению элементов

Способ освещения	Схема испытаний*	Области применения
В отраженном свете		Контроль поверхностных дефектов непрозрачных материалов, измерение линейных размеров
В проходящем свете		Контроль внутренних напряжений, наличия включений в прозрачных материалах, измерение линейных размеров
В рассеянном свете		Контроль диффузно-отражающих изделий, обнаружение включений по методу темного поля, измерение блеска, цвета и яркости поверхности
Комбинированное освещение		Контроль кристаллов, полупрозрачных материалов, анализ структуры и микрорельефа поверхности изделий

*В таблице обозначены: 1 - источник излучения; 2 - объект контроля; 3 - приемное устройство; 4 - зеркальная составляющая отраженного потока.

Световой поток может «проходить» через предмет и может освещать его, отражаясь от его поверхности. Для обоих случаев и их комбинаций могут быть предложены различные варианты схем, в которых параметры светового потока зависят от изменений контролируемого размера. На основании этого методы оптического контроля классифицируются по относительному расположению.

Параметры источника излучения (интенсивность, спектр, поляризация, пространственно-временное распределение интенсивности, степень

когерентности) следует выбирать так, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения.

Контраст изображения определяют по формуле (1.1)

$$К = \frac{В_ф - В_д}{В_ф} \quad , \qquad (1.1)$$

где $В_д$ — яркость изображения дефекта, кд/м^2; $В_ф$ — яркость фона, окружающего дефект, кд/м^2.

При К> 0,5 контраст считают большим, при 0,2 < К< 0,5 — средним, при К< 0,2 — малым.

Случайные засветки, не связанные с отражением от поверхности объекта контроля, устраняются диафрагмированием и применением бленд в сочетании с поляризационным фильтром [9].

Системы освещения могут быть: направленного света (с регулируемым и нерегулируемым лучом), приборы рассеянного и бестеневого света, направленно-рассеянного света.

По характеру светораспределения приборы подразделяются следующим образом:

- прожекторы – световые приборы, перераспределяющие свет лампы внутри малых телесных углов;
- светильники – световые приборы, перераспределяющие свет лампы внутри больших телесных углов;
- проекторы – световые приборы, перераспределяющие свет лампы с концентрацией светового потока на поверхности малого размера или в малом объеме.

Специальным видом осветителей являются осветители для телецентрических объективов, обеспечивающие колимированную подсветку [215, 216].

Проецирование светящейся марки

В системах активного контроля используют оптическую систему для формирования на объекте контроля области, контрастно выделяющейся на фоне

объекта изображения, являющегося отображением проекции луча заданной формы на поверхности объекта контроля [194]. Такую область называют светящейся маркой или штрих-маркой. Наиболее распространенным является одиночный оптический передающий канал, формирующий луч круглой или прямоугольной формы.

Кроме формирования изображения проецирующее устройство ориентирует элементы измерения (точки и линии объекта) в неподвижной системе координат. Часто оптическая система устройства формирования информации идентична оптической системе преобразования измерительной информации.

В настоящее время для формирования на поверхности диффузно отражающих объектов светящейся марки чаще всего используют полупроводниковые лазеры, а зеркально отражающих – фотодиодные модули.

Для определения геометрических параметров объектов сложной пространственной формы в работе [162] предлагается использовать три и более световых пучка для повышения информативности и достоверности проводимых измерений, поскольку использование только одной световой марки на поверхности контролируемого объекта, вынуждает для снятия последующих отсчетов изменять наклон лазерного пучка, что приводит к снижению достоверности и точности проводимых измерений за счет накапливаемых ошибок задания углов наклона лазерного пучка и отсутствия опорных световых марок.

Фактически данное предложение стало основой для дальнейшего совершенствования систем формирования исходной измерительной информации – использованию структурированной подсветки.

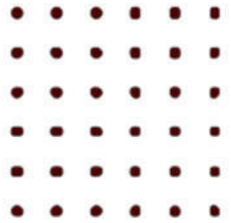
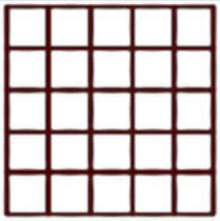
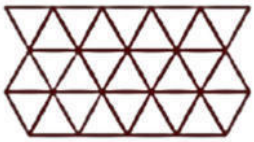
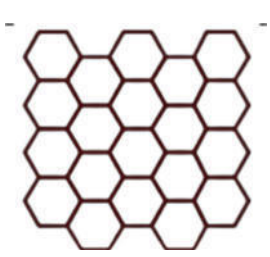
Структурированная подсветка

Структурированная подсветка может быть основана на:

- проецировании линий, сеток;
- временном кодировании;
- пространственном кодировании;
- непосредственном кодировании.

Для формирования линий используются лазерные полупроводниковые излучатели. Для проецирования параллельных линий и сеток используют явления лазерной интерференции и специальные проекторы [42, 174, 251, 271]. Классификация подсветки представлена в работе [25]. Основные типы подсветки представлены в таблице 1.13.

Таблица 1.13 –Основные типы подсветки

Вид	Наименование	Возможности\ область применения
	Точечная сетка.	Позволяет обеспечить высокую скоростью обработки. Может применяться только для контроля отдельных точек объекта. Исследовать и прогнозировать форму объекта
	Прямоугольная сетка	Может применяться с лазерными сканирующими проекторами различной производительности. Имеется возможность контролировать форму объекта
	Треугольная сетка	Позволяет контролировать форму объекта. В зависимости от плотности может применяться с лазерными сканерами или только с высокоскоростными проекторами
	Многоугольная сетка	Может использоваться в частных случаях при исследовании сложных поверхностей. Отличается низкой производительностью и большим временем переналадки проектора

В *проекционном методе* используется некогерентный свет и изображение создается с помощью жидкокристаллического дисплея или дисплея проектора. Генерируемых дисплеем проектора полосы имеют небольшие разрывы вследствие границ пикселей в своих проявлениях. Достаточно небольшой границы, однако ими можно пренебречь, так как они устраняется при расфокусировке [251, 270].

Метод лазерной интерференции работает с двумя широкими плоскими лазерными лучами. Различный шаг интерференции может быть получен путем изменения угла между этими лучами. Метод позволяет генерировать очень тонкие полоски с неограниченной глубиной резкости. Недостатками являются высокая стоимость оборудования, трудности обеспечения идеальной геометрией луча и типичные эффекты лазера, такие как спекл-шум и возможная самостоятельная интерференция частей луча, отраженного от объектов.

Для получения изображения профиля объекта с высоким разрешением используется комплект оборудования – лазер с линейной разверткой (формирователь лазерного светового пятна на поверхности контролируемого объекта). Примером таких изделий могут служить генераторы линий *Coherent* [252, 253]. Они позволяют сформировать следующие виды структурированной подсветки (рисунок 1.41)

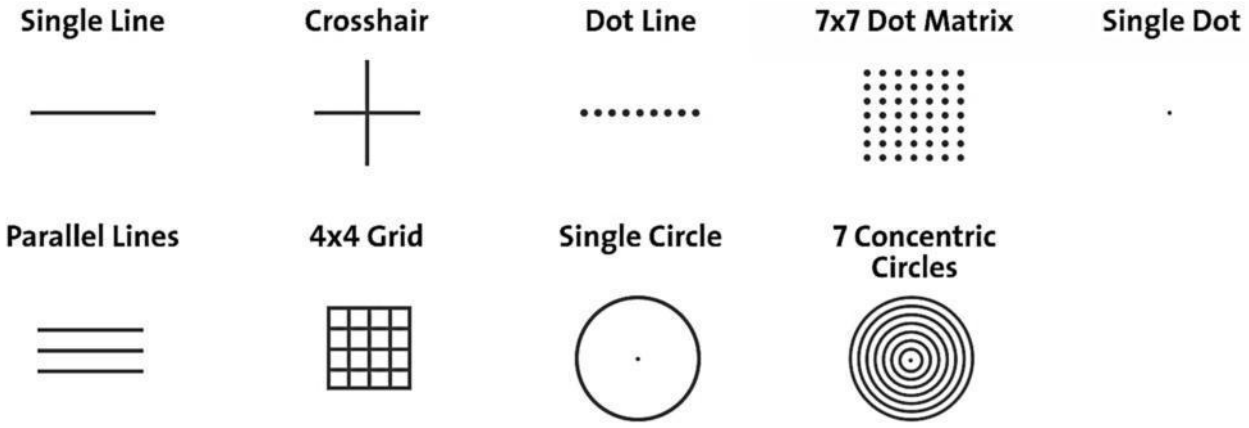


Рисунок 1.41 – Виды структурированной подсветки формируемой генераторами линий

1.3.4 Оптические преобразователи

Оптическими преобразователями (ОП) называют устройства, содержащие подвижные элементы, при перемещении которых определенным образом изменяется ход лучей между предметной точкой и ее изображением [194]. В качестве подвижных элементов ОП применяются линзы, клинья,

плоскопараллельные пластинки и плоские зеркала. Каждый из перечисленных типов элементов имеет свои особенности, по которым выбирается наиболее подходящий для каждого конкретного случая.

Основные характеристики ОП: трансформация изображения при воздействии на ход лучей, аберрации, масштабный коэффициент, диапазон, ошибки передачи перемещений. Очевидно, что искажение изображения (трансформация), аберрации и ошибки передачи – должны быть пренебрежимо малыми по отношению к допустимой погрешности измерений. Масштабный коэффициент и диапазон передачи определяют достижимую точность измерений и возможность осуществить схемы измерений по сопряженным отрезкам. Например, система для бесконтактного измерения больших длин (несколько метров) не может быть реализована на основе ОП типа линзы, клиньев иди плоскопараллельных пластинок: диапазон их действия недостаточен. В этих системах измерение отрезков в пространстве изображений возможно только с помощью зеркальных ОП.

По виду функциональной зависимости, связывающей перемещение подвижных элементов с изменением хода лучей, все ОП можно разделить на три группы: «Первая и вторая группы дают линейную функциональную зависимость. К первой группе относятся оптические микрометры – преобразователи, смещающие лучи параллельно самим себе без изменения направления. Ко второй группе относятся оптические компенсаторы – преобразователи, отклоняющие луч от первоначального направления. В третью группу входят преобразователи с нелинейной зависимостью смещения и (или) отклонения луча – функциональные ОП» [5].

«По конструкции можно выделить ОП с центрированными оптическими элементами: линзами и неплоскими зеркалами, и нецентрированными элементами: плоскопараллельными пластинками, клиньями, призмами и плоскими зеркалами. Из центрированных элементов применяются только афокальные линзы (или системы). Неплоские зеркала в качестве ОП не применялись вследствие аберраций, влияющих на качество изображения. По этой

же причине линзовые компенсаторы не могут применяться для отклонения лучей на углы, превышающие ± 25 ÷ 30′, а микрометр из телескопической линзы – для смещения лучей на величину более ± 2 мм» [173, 195, 227].

Линзы, клинья, плоскопараллельные пластинки детально исследованы и описаны в литературе [219]. Плоские зеркала в качестве ОП в публикациях рассмотрены фрагментарно, в основном на базе сложного математического аппарата, который необходим для глубокого анализа зеркальных преобразований, но затрудняет восприятие их геометрического смысла.

Зеркальные ОП имеют ряд очевидных преимуществ: они совершенно не искажают изображения, свободны от аберраций, диапазон преобразований для них теоретически не ограничен, масштабные коэффициенты можно задавать в широких пределах, т.е. они обладают всеми качествами, которые необходимы для систем измерения по сопряженным точкам.

Зеркальные ОП представляют собой совокупность плоских зеркал (зеркальную систему), расположенную в ходе лучей между предметной точкой и ее изображением. Воздействие на ход лучей осуществляется путем перемещения всей зеркальной системы (ЗС) или отдельных ее элементов.

Основы теории ЗС изложены [14, 61, 62, 77, 95, 103, 132, 191, 208, 209, 211].

Зеркала, поворачивающиеся вокруг оси, совпадающей с плоскостью зеркала (либо параллельной плоскости зеркала), используются в качестве измерительных преобразователей оптико-механических приборов: оптиметров и оптикаторов [195, 219].

Дальнейшее развитие оптико-электронных методов получения информации в различных системах фотоэлектроники и оптотехники – использование функциональных ОП на основе систем с зеркалами, вращающимися вокруг произвольно расположенных осей.

Теория плоских зеркал до настоящего времени остается незаконченной. Этому есть объяснения. Одна из причин в том, что традиционно плоские зеркала использовались для излома оптической оси с целью сокращения габаритов

прибора и для постоянного хода лучей с целью привести изображение в заданную плоскость или к виду, удобному для восприятия (оборачивание). Для статичных зеркальных систем (без перемещающихся элементов) теория построения зеркального изображения разработана довольно подробно в трудах Н.В. Лебедева [132], И.А. Грейма [61], Г.В. Погарева [173], В.Н. Чуриловского [227]. Для систем с подвижными элементами исследованы отдельные вопросы, связанные главным образом с юстировкой оптических приборов. Задача определения траектории изображения как функции перемещения элементов ЗС изучена частично, в той мере, насколько ее решение вытекает из теории статичной ЗС. Обратная задача – определение по заданному закону перемещения изображения точки в ЗС его вида, числа подвижных элементов в ней и характера их рабочих движений – еще не решена и даже не получила сколько-нибудь корректной формулировки.

1.3.5 Устройства считывания информации

Устройства считывания измерительной информации можно разделить на фотометрические и позиционно чувствительные.

Фотометрический принцип поучения информации, как правило, используется в простейших оптических системах регистрации положения объектов – оптических выключателях [147, 194]. Особенности передачи измерительной информации, состоят в том, что величина светового потока непостоянна, форма и положение штрих-марки зависят от формы и положения поверхности измерения. Вместе с полезным сигналом на фотоприемник поступают фоновые засветки, диапазон перемещения штрих-марки в пространстве изображений относительно велик. Вышеперечисленные особенности исключают возможность получения равномерной освещенности марки в пространстве изображений приемного объектива. Вследствие этого позиционная функция (зависимость выходного сигнала от взаимного положения марки и входного окна фотоприемника) будет нелинейной. Отклонение функции

от линейной определяется характером распределения освещенности и реакцией фотоприемника на изменение интегральной освещенности.

Поэтому в настоящее время для получения геометрической информации в основном используются позиционно-чувствительные и матричные приемники [282]. Предельным случаем таких систем является использование цифровых камер. Уменьшение их стоимости, совершенствование средств и алгоритмов обработки визуальной информации позволило расширить область из применения в составе оптических систем контроля геометрических параметров в качестве средств считывания.

Цифровые камеры

Цифровые камеры являются одними из основных компонентов систем комплексного контроля параметров изделий и оборудования и предназначены для восприятия изображения объекта контроля при помощи оптоэлектронного преобразования, первичной обработки и передачи сигнала, содержащего информацию о полученном изображении.

На рисунке 1.42 представлены классификации цифровых камер.

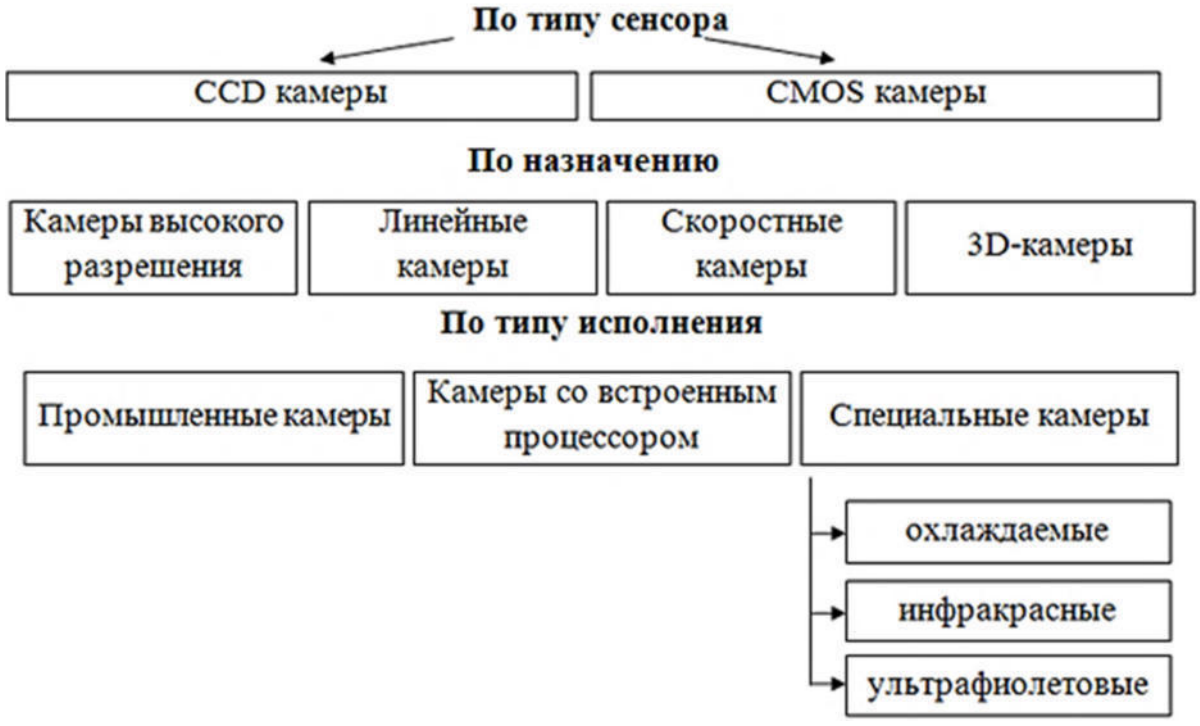


Рисунок 1.42 – Классификация цифровых камер

Цифровая камера представляет собой сложную оптико-электронную систему, состоящую из: фоточувствительного элемента - матрицы, объектива и программно-аппаратных средств первичной обработки сигнала в формат, предназначенный для вывода на устройства вторичной обработки или управления. Рассмотрим подробнее эти компоненты.

Матрица. Основными параметрами, матриц являются:

- тип матрицы
- размерность в пикселях;
- физический размер в дюймах (2/3, 1/2, 1/3 и т.д.). При этом сами цифры не определяют точный размер чувствительной области, а, скорее, определяют класс прибора;
- чувствительность.

В настоящее время используются камеры технического зрения с *CCD* (ПЗС, прибор с зарядовой связью) и *CMOS* (КМОП, комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) светочувствительные матрицы [79, 7]. В настоящее время большинство цифровых камер для систем контроля геометрических параметров используют технологию *CMOS*.

Одной из важнейших характеристик матрицы является ее размер, который обычно измеряется по диагонали в дюймах и указывается в виде дроби, например 1/4", 1/3", 2/3", 1/2 дюйма. Светочувствительность матрицы определяет возможность ее работы в условиях слабого окружающего освещения. Тип затвора: глобальный затвор и скользящий затвор, разница заключается в том, как они обеспечивают экспозицию – одномоментно или построчно.

Основные производители матриц: *Sony, ON Semiconductor, Omnivision, Truesense, DALSA, Hamamatsu* или *SOI*.

Основные характеристики матричных фотоприемников цифровых камер приведены в таблице 1.14.

Объективы. При выборе объектива для камер систем технического зрения должны учитываться следующие факторы [19, 23, 158]:

- Тип наблюдаемого объекта и его свойства;

- Глубина резкости или фокуса;
- Расположение системы и наблюдаемых объектов;
- Условия эксплуатации.

Таблица 1.14 – Характеристики матричных фотоприемников

Характеристики матрицы	Диапазон значений	
Тип сенсора	CCD	CMOS
Размер сенсора (оптический)	1/1.8; 1/2.3; 1/2.5; 1/3; 1/3.7; 1/4; 1/2; 2/3	
Разрешение	От 0,3 до 24 Мп	
Максимальная скорость захвата кадров в секунду	12-340	
Размер пикселей	0,005-0,009 мм	
Чувствительность	ISO 50-25000	
Отношение сигнал/шум	20-56 Дб	

Для цифровых камер в основном используются объективы с постоянным фокусным расстоянием, в том числе макрообъективы и телецентрические [214, 278].

Основными характеристиками являются: формат, фокусное расстояние (угол обзора), разрешение, относительное отверстие (светосила).

Формат. Объектив выбирается под размер матрицы. Объектив под больший размер подходит и для матриц меньшего размера. Т.е. для 1/2 дюймовой матрицы подойдут объективы для 1/2, 2/3 и 1 дюймовых матриц.

Разрешение. Для обеспечения полного разрешения объектив должен иметь этот параметр согласованным с размером пикселя матрицы. В таблице 1.15 показано минимальное разрешение объектива для различных типов матриц на примере камер ВИДЕОСКАН-2.

Фокусное расстояние f (мм) – характеризует величину угла зрения при определенном оптическом формате камеры. Для обеспечения нужного поля

зрения выбирается объектив с нужным фокусным расстоянием. Требуемое фокусное расстояние рассчитывается по формуле (1.2):

$$F = \frac{W}{2\times\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}\ , \qquad (1.2)$$

где F – фокусное расстояние; W – размер CCD матрицы; θ – угол зрения камеры.

Таблица 1.15 – Характеристики цифровых камер ВИДЕОСКАН-2

Модель	Разрешение	Размер сенсора	Размер матрицы H*V, мм	Размер пикселя H*V мкм	Минимальное разрешение обьектива пар линий/мм
ВИДЕОСКАН-11002	4004*2671	Full	36*24	9*9	55
ВИДЕОСКАН-4021	2048*2048	4/3	15.15*15.15	7.4*7.4	67
ВИДЕОСКАН-2020	1600*1200	1	11.84*8.88	7.4*7.4	67
ВИДЕОСКАН-285	1,3 (1392*1040)	2/3	8.77*6.6	6.45*6.45	78
ВИДЕОСКАН 2-205	1,3 (1392*1040)	1/2	6.32*4.76	4.65*4.65	108
ВИДЕОСКАН 2-415	0,3 (782*582)	1/2	6.47*4.8	8.3*8.3	60

Светосила – показывает отношение фокусного расстояния к диаметру объектива. При уменьшении светосилы в 2 раза (например с 2.8 до 1.4) происходит увеличение яркости изображения на сенсоре в 4 раза. Таким образом, для регистрации слабых объектов следует использовать обективы с минимальной светосилой. ***Относительное отверстие F*** – отношение диаметра отверстия диафрагмы к его фокусному расстоянию, определяет освещенность на матрице. Чем меньше значение F, тем больше световой энергии проецируется на матрицу камеры.

По величине относительного отверстия объективы делятся на:

- сверхсветосильные от 0,7 до 2;
- светосильные от 2,8 до 4,5;
- малосветосильные от 5,6 до 16.

Крепление объектива. Для крепления объектива чаще всего используется резьба CS-mount, C-mount, F-mount или M42*1.

Резьба CS-mount и C-mount имеет диаметр 1 дюйм (25.4 мм) и шаг 1/32 дюйма (0.794 мм). Объективы C-mount отличаются от CS-mount только величиною заднего отрезка объектива. Для C-mount он равен 17.5 мм, а для CS-mount - 12.5мм. На крепления CS-mount и C-mount приходится более 70 предложений всех камер.

На рисунках 1.43 и 1.44 показано соотношение используемых в настоящее время камер технического зрения с различным разрешением и частотой кадров [142, 268].

Рисунок 1.43 – Соотношение (в процентах) применяемых в промышленности цифровых камер с различным разрешением

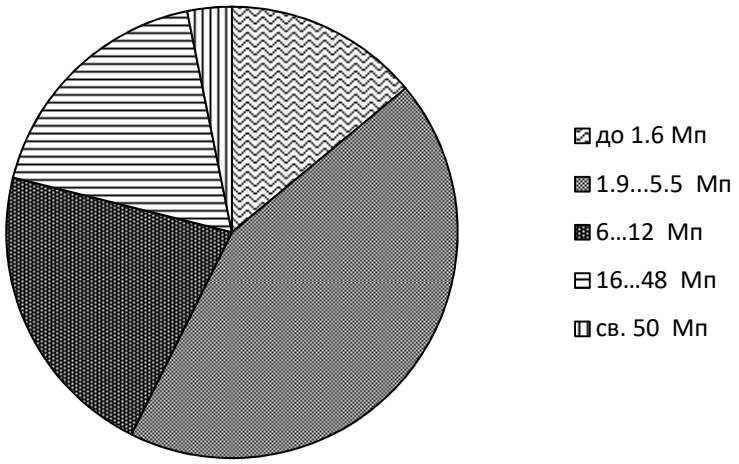


Рисунок 1.44 – Предложения камер цифровых камер с различным разрешением

Распределение на рисунке 1.43 демонстрирует, что основная доля цифровых камер имеет низкое разрешение (менее 1Мп). Однако рассмотрение предложений рынка видеокамер (на примере [247]) показывает, что доля предложений в этом сегменте уменьшается и в основном сосредотачивается в сегменте 1,9…5,5 Мп.

Возможности камер, обладающих большим разрешением, на нынешний момент ограничиваются искажениями оптических систем (объективов) и возможностями разработанных алгоритмов и ПО для их компенсации. «Выбирать более высокое разрешение бессмысленно, по крайней мере в случае камер с креплением C-Mount, поскольку размеры отдельного пикселя будут слишком малы, а значит уровень шума будет слишком велик для выполнения сложных задач, таких как высокоточные измерения или контроль качества» [247]. Несмотря на появление камер сверхбольшого разрешения 105 Мп их использование для решения задач контроля геометрических параметров нецелесообразно, пока не будет решена задача компенсации погрешностей оптического тракта.

Распределение применяемых в промышленности цифровых камер по частоте кадров представлено на рисунке 1.45 [142]. Большинство задач контроля геометрических параметров не требует высокой частоты.

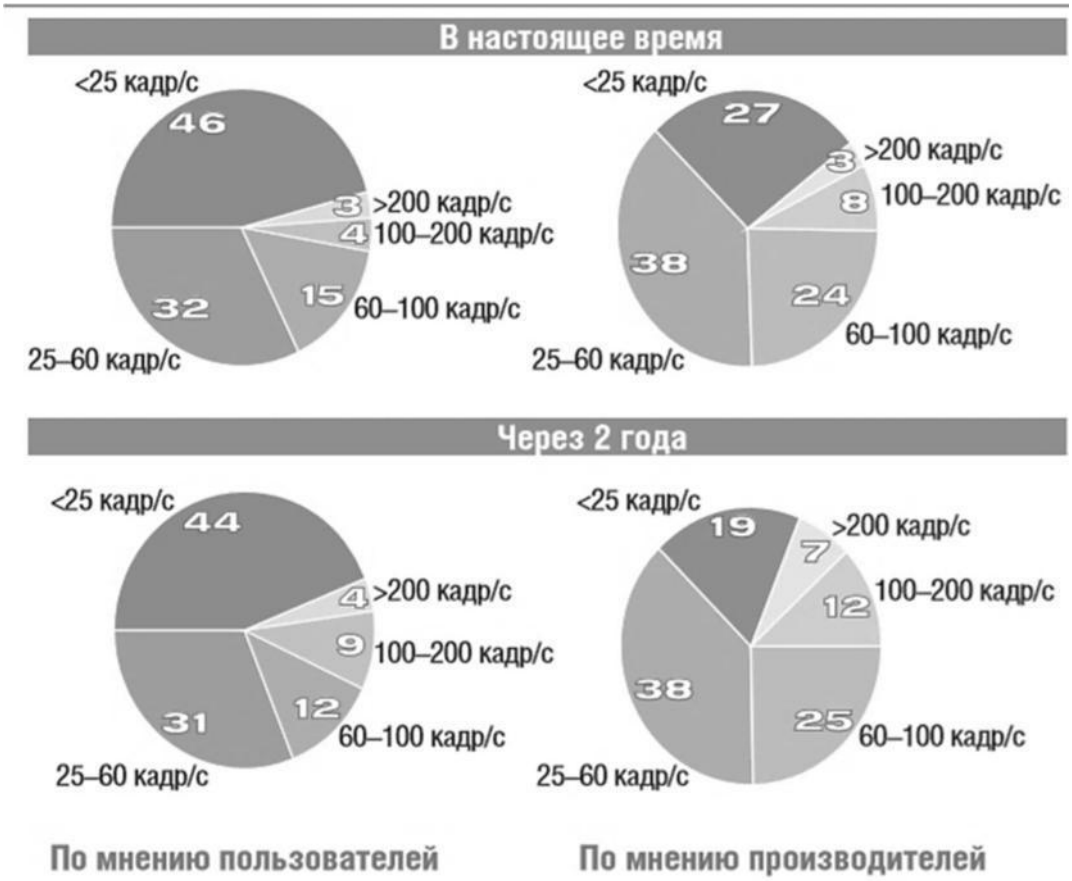


Рисунок 1.45 – Соотношение (в процентах) применяемых в промышленности цифровых камер с различной частотой кадров

1.3.6 Программное обеспечение

Методологические основы программного обеспечения для систем контроля на базе цифровых камер представлены в работе [22]. В ней компоненты программного обеспечения (ПО) были разделены на 4 группы: получения изображений, обработка изображений, интерфейс с аппаратурой и хранение данных. В ПО должны быть предусмотрены ручной и автоматический режимы работы системы контроля.

В ручном режиме ПО пользователь системы контроля геометрических параметров может выполнять следующие действия:

- тестировать и настраивать аппаратное обеспечение;
- выполнять алгоритмы обработки изображений;

– просматривать результаты работы системы контроля, полученные в автоматическом режиме.

Функционирование ПО систем контроля в автоматическом режиме без участия пользователя является циклом, оптимизированным в расчете на функционирование в реальном времени, в котором возможности воздействия пользователя на систему сведены к минимуму. Интерфейс пользователя в этом режиме выполняет функции отображения данных о текущем состоянии и обеспечивает переключения в ручной режим.

В настоящее время существует уже множество готовых решений для разработки систем контроля на основе информации, получаемой с цифровых камер [91]. Рассмотрим несколько подробнее основные из них.

«OpenCV (Open Source Computer Vision Library) – библиотека алгоритмов (более 2500 алгоритмов как классических, так и современных), обработки изображений, компьютерного зрения и численных алгоритмов общего назначения. Библиотека имеет интерфейсы на языке *C/C++, Python, Java, Matlab* и других языков» [260, 264].

«PCL (Point Cloud Library) — «открытый проект для обработки 2D/3D-изображений и облаков точек. Платформа PCL содержит множество алгоритмов, включая фильтрацию, оценку характеристик, реконструкцию поверхности, регистрацию, подбор модели и сегментацию» [184, 281]. Основной областью его применения является обработка данных, получаемых с различных 3D-сканеров.

«ROS (Robot Operating System) – платформа разработки ПО для роботов. Она представляет собой набор инструментов, библиотек (в том числе *OpenCV* и *PCL* и др.) и соглашений, которые упрощают разработки сложных и эффективных программ для управления многими типами роботов» [157, 269]. Основополагающим преимуществом является клиент-серверная архитектура *ROS*. На сегодня *ROS* стабильно устанавливается и работает только на *Ubuntu* версии от 10 и выше.

Все вышеперечисленные средства разработки имеют открытый исходный код (за исключением отдельных небольших модулей) и распространяются под открытой лицензией *BSD*.

«*MATLAB* —высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчётов и визуализации результатов. Имеет *Image Processing Toolbox,* с которого можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения обработки изображений» [41].

NI LabVIEW – графическая модульная и иерархичная среда разработки информационно-измерительных систем, позволяющая использовать функции математических методов, представленных в дополнительных модулях *NI* [38, 137, 166]. Приложение *NI Vision Assistan* обеспечивает: «разработку и отладку алгоритмов обработки изображений, работающее со всеми функциями драйвера *IMAQ-Vision* и включающее средства визуализации этапов работы алгоритма. Это упрощает и ускоряет процесс разработки и отладки алгоритма решаемой задачи для конкретной ситуации. Кроме того, приложение *NI Vision Assistant* дает возможность интерактивно контролировать обработку изображения. После тестирования созданного скрипта он может быть преобразован в автономное приложение среды *LabVIEW* — виртуальный прибор (ВП)» [137].

Выбор среды разработки определяется особенностями разрабатываемой системы контроля геометрических параметров.

1.4 Выводы по Главе 1

1. Координатно-измерительные машины обеспечивают высокую точность измерений геометрии изделий и возможность контроля изделий сложной геометрии, однако имеют высокую стоимость и низкую производительность, обусловленную методикой последовательного получения координат точек измерения. Их использование для контроля листовых и осесимметричных изделий нецелесообразно.

2. Бесконтактные оптические методы имеют высокую производительность и хорошо приспособлены для выполнения измерений в автоматическом режиме. В настоящее время подавляющее большинство систем оптического контроля геометрических параметров используют телецентрические оптические системы с коллиматорными осветителями.
3. Использование телецентрических оптических систем обеспечивает возможность контроля изделий, размеры которых не превышают размеры выходного зрачка оптической системы и ограничены 300 мм. Задача оперативного контроля основной формообразующей поверхности осесимметричных изделий в диапазоне диаметров от 300 мм до сих пор остаётся не до конца решённой.
4. Системы с нетелецентрическими объективами не получили широкого распространения в системах контроля размеров, так как без решения проблемы проекционной ошибки не обеспечивают достаточную точность контроля линейных размеров. На результат контроля влияют многие внешние факторы, такие как позиционирование объекта контроля, посторонние засветки, рефракция среды и др.
5. Методы 3D оптического сканирования имеют более высокую стоимость оборудования и низкую точность для объектов малых (до 100 мм) и средних размеров (до 2000 мм) по сравнению с проекционными методами.
6. Использование бинокулярных измерительных систем ограничено несовершенством пассивные алгоритмов определения характерных точек. Использование маркеров и структурированной подсветки для сведения стереопар позволяет повысить точность определения геометрии изделий, однако погрешность измерения остается достаточно высокой, боле 0,05 мм.
7. Перспективным является использование пространственного метода оптического излучения с 2D разрешением (проекционного типа) в непараллельных лучах с использованием цифровых камер для регистрации геометрических параметров, однако его применение ограничено отсутствием методик калибровки таких систем при нестационарном положении объектов.

8. Проекционные методы контроля листового стекла обеспечивают более высокую точность и производительность, по сравнению с ультразвуковыми, однако существующее специальное оборудование, реализующее оптический метод контроля, является весьма дорогостоящим и недоступным для изготовителей, использующих стекло при изготовлении изделий (например, производителей окон и дверей).
9. В целом использование оптических систем контроля со считыванием измерительной информации цифровой(ми) камерой(ами) представлено отдельными частными решениями и не имеет единой теоретической базы.
10. Зеркальные оптические преобразователи свободны от аберраций, диапазон преобразований для них теоретически не ограничен, масштабные коэффициенты можно задавать в широких пределах, однако теория плоских зеркал, на основании которых они разрабатываются, до настоящего времени остается незаконченной.
11. Отмечена тенденция увеличения разрешения промышленных цифровых камер до 12-24 Мп при разрешении объективов для них до 12 Мп (230 пл/мм). Статистика продаж показывает, что наиболее востребованными остаются камеры с разрешением в диапазоне 2-5 Мп.
12. Наличие эффективных средств разработки ОЭИС с цифровыми камерами обусловлено значительным числом готовых решений на базе стандартных средств разработки информационно-измерительных систем (ИИС) (открытых библиотек *Altami Studio, NI LabVIEW* и др.), имеющих для анализа и измерения параметров изображения (*IMAQ Vision*).

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМАМИ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

2.1 Сущность получения измерительной информации геометрическим методом с пространственным разрешением

Сущность получения измерительной информации геометрическим методом с пространственным разрешением наглядно продемонстрирована схемой (рисунок 2.1) и описана в работе [196], где любой пространственный объект контроля может быть представлен ортогональной тройкой векторов e_1,e_2,e_3 (прообразы). Изображение, полученное идеальной оптической системой, описывается векторами - e_1', e_2', e_3' (образов) содержит в себе измерительную информацию.

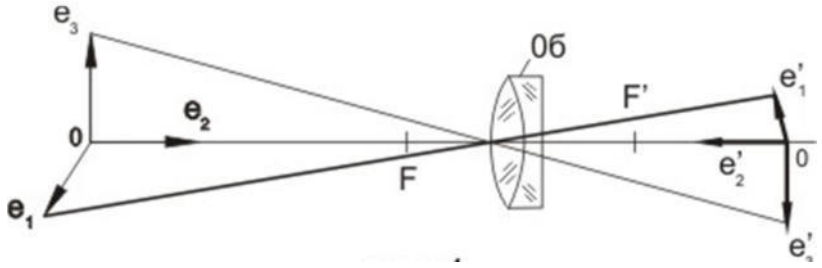


Рисунок 2.1 – Сущность получения измерительной информации геометрическим методом с пространственным разрешением

Закономерности передачи измерительной информации геометрическим методом с пространственным разрешением рассмотрим для идеальной оптической системы. Представленная на рисунке 2.1 схема формирования изображения пространственного объекта контроля основана на базовых законах геометрической оптики, согласно которым «каждой точке пространства предметов однозначно соответствует точка в пространстве изображений. Предметная точка и ее изображение называются сопряженными точками, а

отрезки между двумя парами таких точек – сопряженными отрезками, в свою очередь три точки, не лежащие на одной прямой, задают плоскость, что позволяет говорить и о сопряженных плоскостях» [194]. В этой работе выведены соотношения для сопряженных точек, позволяющие выразить координаты предметных точек через координаты их изображений. Приведенные зависимости позволяют решить и задачу определения координат предметных точек через координаты их изображений.

Таким образом, измерительная информация о геометрических параметрах объекта контроля может быть представлена координатами изображений его характерных точек. Зависимость, описывающая связь между сопряженными точками, приведена в работе Сарвина А.А. и «коэффициенты связи между сопряженными элементами выражаются через линейное увеличение в сопряженных точках, которое изменяется обратно пропорционально удалению данной точки от объектива вдоль его оси. Поэтому соотношения размеров для каждой пары сопряженных векторов будут в общем случае неодинаковы. Частным случаем их идентичности двух пар сопряженных векторов является их расположение в плоскости, перпендикулярной к оптической оси объектива.

Углы между тройкой векторов в пространстве изображений e_1', e_2', e_3' останутся прямыми только в том случае, когда один из сопряженных векторов в пространстве предметов лежит на оптической оси объектива. В общем случае между предметом (тройкой векторов e_1, e_2, e_3) и его оптическим изображением (тройкой векторов e_1', e_2', e_3') нет геометрического подобия, оно достигается только для плоских объектов, расположенных перпендикулярно к оптической оси объектива» [196].

Соответственно «из условий передачи линейных и угловых параметров от объекта к изображению следует, что результат измерения в общем случае получается вычислением, поскольку соотношения между сопряженными элементами содержат два взаимозависимых переменных параметра: координаты изображения и коэффициент связи» [196].

В оптико-электронных системах, основанных на геометрическом методе, информация передается световым потоком, вобравшим в себя свойства объекта измерения (пройдя через него или отразившись), и, пройдя через объектив, фиксируется электронными средствами регистрации. Условия прохождения светового потока в пространстве предметов не одинаковы и, следовательно, энергетические характеристики изображения (яркость, освещенность, контрастность) будут изменяться для разных точек контролируемого объекта. Из этого следует, что энергия светового потока связана с геометрическими параметрами объекта и становится причиной погрешностей.

В оптических приборах традиционных типов (к которым можно отнести и цифровые камеры) образы, как правило (определяется конструктивными решениями), располагаются перпендикулярно к оптической оси.

2.2 Моделирование отображения точек пространства системами контроля, реализующими геометрический метод с пространственным разрешением

Поскольку любой объект можно представить как совокупность точек, рассмотрим подробнее отображение точек пространства. На рисунке 2.2 представлена идеализированная оптическая система, для которой выводятся классические формулы геометрической оптики [227]. Взаимное положение контролируемой точки – M (прообраза), расположенной в пространстве предметов и ее оптического изображения M' (образ), определяются законами геометрической оптики, которые используются для определения геометрических параметров объектов измерений.

Объектив на рисунке не показан и представлен условно совмещенными главными плоскостями H и H'. Система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ расположена в пространстве предметов, а система $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ – в пространстве изображений. Обе системы связаны с объективом посредством совмещения осей O_1X_1 и $O_1'X_1'$ с его оптической осью, и плоскости $Y_1O_1Z_1$ и $Y_1'O_1'Z_1'$ с главными плоскостями H и H'.

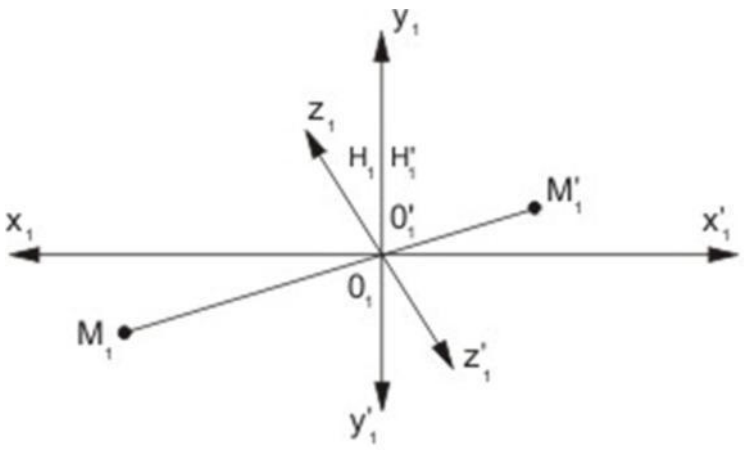


Рисунок 2.2 – Отображение точек пространства в простейшей идеализированной оптической системе

Определяя задачей контроля – определение параметров макрообъектов будем полагать, что пространство предметов находится в пределах от передней фокальной плоскости до практической бесконечности («практической бесконечностью в данном случае будем считать расстояние от объектива до прообраза *M*, при котором различимое смещение образа *M'* соответствует заданной точности определения координат прообраза *M*» [191]). Пространство изображений будет расположено за задней фокальной плоскостью» [191].

Тогда для рассматриваемых систем координат «сопряженные точки *M* (X_1,Y_1,Z_1) и *M'* (X'_1, Y'_1, Z'_1) связаны соотношениями (2.1…2.3):

$$X'_{1M} = X_{1M} V_M \frac{f'}{f}; \quad (2.1)$$

$$Y'_{1M} = Y_{1M} V_M \ ; \quad (2.2)$$

$$Z'_{1M} = Z_{1M} V_M \ , \quad (2.3)$$

где X_{1M}, Y_{1M}, Z_{1M} – координаты точки объекта контроля *M* в системе $O_1X_1Y_1Z_1$; X'_{1M}, Y'_{1M}, Z'_{1M} – координаты изображения *M'* точки *M* в системе $O'_1X'_1Y'_1Z'_1$; *f* и *f'* – соответственно переднее и заднее фокусные расстояния объектива (для обычных условий в воздушной среде $f = f'$); V_M – линейное увеличение объектива в точке *M*» [191].

Формула для линейного увеличения в записывается в виде (2.4):

$$V_M = \frac{f}{X_{1M} - f} = \frac{X'_{1M} - f}{f'}. \quad (2.4)$$

Приведенные зависимости (2.1) – (2.4) позволяют решать: «как прямую, так и обратные задачи геометрической оптики: вычислять координаты образа M' при заданных координатах прообраза M и наоборот – определять координаты прообраза M по измеренным координатам образа M' (оптическая система инвариантна относительно предмета и его изображения, т.е изображение и предмет можно поменять ролями)» [191].

Приведенные рассуждения и выведенные формулы раскрывают принципиальную сущность метода бесконтактных измерений геометрических параметров по сопряженным точкам.

От рассмотрения зависимостей, описывающих координаты сопряженных точек, можно перейти к рассмотрению сопряженных отрезков. В работе [194] подробно рассмотрена методика расчета параметров сопряженных отрезков и плоскостей, которая является основой для построения оптических систем контроля геометрических параметров изделий по его изображениям.

В разделе 1.3.1 все оптические системы по принципу формирования измерительной информации разделены на пассивные и активные. Рассмотрим подробнее особенности передачи измерительной информации этими системами.

2.3 Оптические системы пассивного типа

Как было отмечено ранее, в пассивных оптических системах для передачи измерительной информации используется световая энергия от источников, функционально не связанных с системой измерения. Такими источниками могут быть как естественный солнечный свет, обычное освещение в помещении, так и специальные осветители.

Рассмотрим способы индикации положения точек и линий в пространстве изображений для двух возможных вариантов систем пассивного типа: с одним каналом передачи измерительной информации и с двумя.

Одноканальная оптическая система.

Одноканальная оптическая система представлена на рисунке 2.3. Объект, показанный на рисунке вектором *A,* и его образ *A*', формируемой оптической системой Об, связаны между собой зависимостями (2.1) – (2.4). Из зависимостей следует: «для определения размера *A* по его изображению *A′* неодходимо определить координаты точки *M′* и угол φ'. В общем случае для произвольного положения *A* (и соответственно *A′*) выполнить измерения сложно, для осуществления их требуются дополнительные условия, определяющие взаимное положение объекта и оптической системы (или пространства изображений и средств измерения *B′*)» [194].

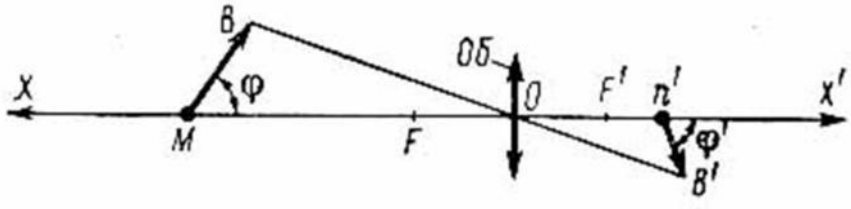


Рисунок 2.3 – Одноканальная система

Поэтому при использовании одноканальной измерительной системы необходимо задать положение сопряженных плоскостей, в которых будут располагаться образы и прообразы. Используя зависимости, приведенные в работе [196], можно определять геометрические положения сопряженных точек и отрезков на сопряженных плоскостях.

Применение цифровых камер упрощает решение данной задачи, поскольку положение матрицы относительно объектива определяется типом крепления. Наиболее распространенные типы крепления объективов цифровых камер с параметры положения матриц представлены на рисунке 2.4 [262].

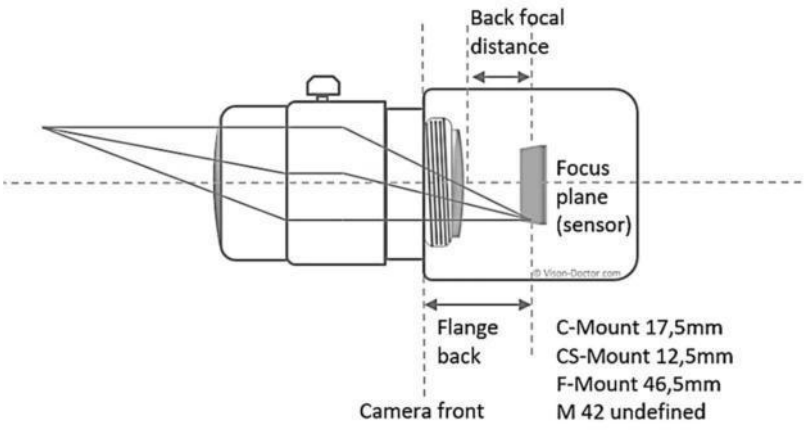


Рисунок 2.4. – Геометрические параметры цифровых камер наиболее распространенных типов крепления объективов

Одноканальная система контроля геометрических параметров с регистрацией изображения цифровой камерой представлена на рисунке 2.5.

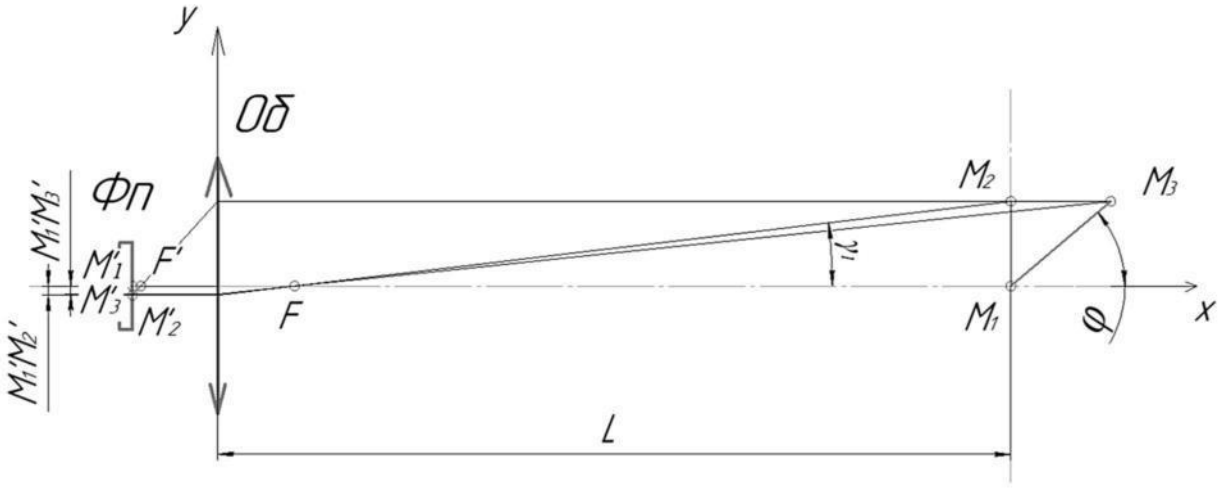


Рисунок 2.5 – Одноканальная система с регистрацией изображения цифровой камерой

Действие одноканальной системы будем рассматривать для обычных условий в воздушной среде когда $f = f'$. Размер изображения $M'_1M'_2$, и отрезок M_1M_2 расположенны в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Связь между образом $M'_1M'_2$, и прообразом M_1M_2 можно определить, рассматривая треугольники $M'_1FM'_2$ и M_1FM_2. Угол зрения γ можно определить отношениями (2.5):

$$\tan\gamma = \frac{M'_1M'_2}{f} = \frac{M_1M_2}{L-f}, \tag{2.5}$$

где L – расстояние вдоль оптической оси до пересечения с плоскостью контроля (рабочее расстояние).

Из уравнения (2.5) можно определить соотношение (2.6):

$$M'_1M'_2 = M_1M_2 \cdot \frac{f}{L-f} \ . \tag{2.6}$$

Соответственно зная положение матрицы и положение плоскости, в которой располагается контролируемый отрезок, по размеру изображения можно определить и размер образа (2.7):

$$M_1M_2 = M'_1M'_2 \cdot \frac{L-f}{f} = M'_1M'_2 \cdot \left(\frac{L}{f} - 1\right). \tag{2.7}$$

В общем случае плоскость контроля может быть расположена под произвольным углом φ по отношению к оптической оси. Рассмотрим данный случай на примере сопряженных отрезков образа $M'_1M'_3$ и прообраза M_1M_3. Для этого определим проекции этого отрезка на оси *x* и *y* по формулам (2.8) и (2.9):

$$X_{M_1M_3} = M_1M_3 \cdot \cos\varphi \tag{2.8}$$

$$Y_{M_1M_3} = M_1M_3 \cdot \sin\varphi \tag{2.9}$$

Тогда, используя (2.5), (2.7) и (2.8), получим следующие соотношения образа $M'_1M'_3$ и прообраза M_1M_3 (2.10):

$$M'_1M'_3 = M_1M_3 \cdot \sin\varphi \cdot \frac{f}{L - M_1M_3 \cdot \cos\varphi -} \tag{2.10}$$

Для определения размеров образа по изображению нужно использовать зависимости 2.5 и 2.10. Тогда образ определяется выражением (2.11):

$$M_1M_3 = \frac{\frac{M'_1M'_3}{\sin\varphi}\left(\frac{L}{f}-1\right)}{\left(1+\frac{M'_1M'_3 \cdot \cos\varphi}{f \cdot \sin\varphi}\right)} = \frac{M'_1M'_3 \cdot \left(\frac{L}{f}-1\right)}{\sin\varphi\left(1+\frac{M'_1M'_3}{f \cdot \tan\varphi}\right)}. \tag{2.11}$$

Системы с двумя каналами

Системы с двумя каналами представляют собой две одноканальные системы, объединенные конструктивно (рисунок 2.6).

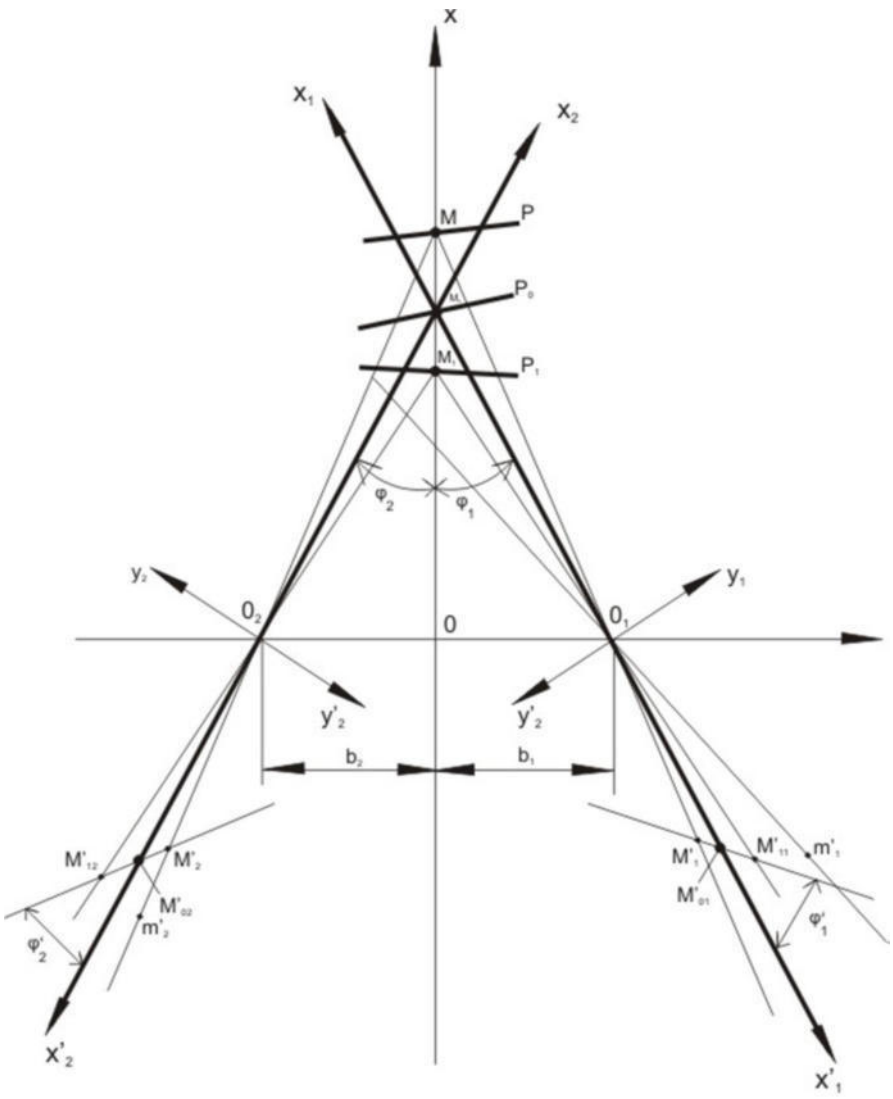


Рисунок 2.6 – Двухканальная пассивная оптическая система

Каждый канал образует изображение $M'_{11}\,M'_1$ и $M'_{12}\,M'_2$ отрезка M_1M линии измерений. Эффект от объединения двух каналов состоит в том, что координаты изображения любой точки M в одном канале связаны с координатами изображения этой же точки в другом канале. Например, точка M_1, лежащая на пересечении линии измерений OX с некоторой поверхностью P_1, изображается точками M'_{11} и M'_{12}; другая точка m поверхности P_1 с абсциссой $X_m = X_M$, изобразится точками m_1 и m_2. Из чертежа видно, что соотношение координат M'_{11}, и m'_{11}, m'_{12} неодинаково, т. е. система из двух каналов фиксирует положение линии измерений *OX:* все точки *M*, принадлежащие этой линии, изображаются точками на отрезках $M'_1\,M'_{11}$ и $M'_2\,M'_{12}$.

Рассмотрим связь между координатами изображения в каждом из каналов и абсциссой точки M по схеме на рисунке 1.11. Согласно (1.1) – (1.3) для первого канала можно записать (2.12) и (2.13):

$$X_1' = \left(X_M \cos\varphi_1 + b_1 \sin\varphi_1\right) V_{1M}; \tag{2.12}$$

$$Y_1' = \left(X_M \sin\varphi_1 - b_1 \cos\varphi_1\right) V_{1M}; \tag{2.13}$$

соответственно для второго канала (2.14) и (2.14):

$$X_2' = \left(X_M \cos\varphi_2 + b_2 \sin\varphi_2\right) V_{2M}; \tag{2.14}$$

$$Y_2' = \left(X_M \sin\varphi_2 - b_2 \sin\varphi_2\right) V_{2M}, \tag{2.15}$$

где V_{1M} и V_{2M} – линейные увеличения в точке M для первого и второго каналов.

Решая совместно (2.12) – (2.15), выразим абсциссу через координаты изображений M_1' и M_2' точки M в виде зависимости (2.16):

$$X = \frac{b_1 + b_2}{\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_2} - \left(Y_1' \frac{\cos\varphi_2}{V_{1M}} + Y_2' \frac{\cos\varphi_1}{V_{1M}} \right) \frac{1}{\sin\left(\varphi_1 + \varphi_2\right)}. \tag{2.16}$$

Таким образом, двухканальная система принципиально позволяет определить координаты точки M в пространстве предметов по координатам двух ее изображений M_1' и M_2'. Измерения производятся в системе координат XOY (рисунок 2.6), связанной с объективами первого и второго каналов.

Существенным моментом в реализации двухканальных систем является способ определения координат изображений. На практике двухканальные измерительные системы используются главным образом в дальномерах. Для определения координат в них применяют известный в оптотехнике прием совмещения пространства изображений первого канала с пространством изображений второго канала так, чтобы системы координат $O_1'X_1'Y_1'$ и $O_2'X_2'Y_2'$ наложились одна на другую. Тогда положение изображений M_1' и M_2' определяется путем их совмещения. Метод хорошо отработан для визуальных систем, но для автоматических представляется малопригодным по ряду причин, к числу которых относятся сложность однозначного выделения точки M в одном и другом каналах, некоторая неопределенность в положении линии расстояний

относительно базиса прибора (отрезок $B = b_1 + b_2$ на рисунке 2.6). В последнем нетрудно убедиться, если принять в формуле (2.16) $V_{1M} = V_{2M}$ и $\varphi_1 = \varphi_2$ (объективы с равной оптической силой и расположены симметрично), тогда условие совмещения изображений выразится равенствами: $Y_1' = Y_2' = 0,\ Y_1' = -Y_2' \neq 0$.

Допустим, что смещение M_1m (см. рисунок 2.6) направлено перпендикулярно к линии измерений OX и мало по величине. Тогда ординаты изображений этой точки будут определятся выражением (2.17):

$$Y'_{1m'} = -M_1m.\cos\varphi_1 V_{1M_1}, \qquad (2.17)$$

$$Y'_{2m'} = M_1m.\cos\varphi_2 V_{2M_2}.$$

Полагая, что $V_{1M_1} = V_{2M_2}$ и для малых углов, можно принять, что $Y'_{1m'} = -Y'_{2m'}$. Отсюда следует, что при измерении по совмещению изображений имеет место неопределенность положения линии измерений в пределах (2.18):

$$M_1m = \Delta\eta \frac{X_{M_1}}{f_1 + f_2} = \Delta\eta \frac{X_{M_1}}{2f}, \qquad (2.18)$$

где $\Delta\eta$ – погрешность совмещения изображений; $f_1 = f_2$ фокусные расстояния объективов первого и второго каналов.

Системы такого типа используются в 3D сканировании, однако для надежного определения сопряженных точек в таких системах обычно используют специальные маркеры, что усложняет их использование в промышленности.

2.4 Оптические системы активного типа

Как было описано ранее, активные системы отличаются от пассивных наличием устройства формирования измерительной информации. Рассмотрим принцип передачи информации в системе такого типа на примере дальномера простейшего вида, состоящего из двух симметричных каналов: проектирующего и приемного, как показано на рисунке 2.7.

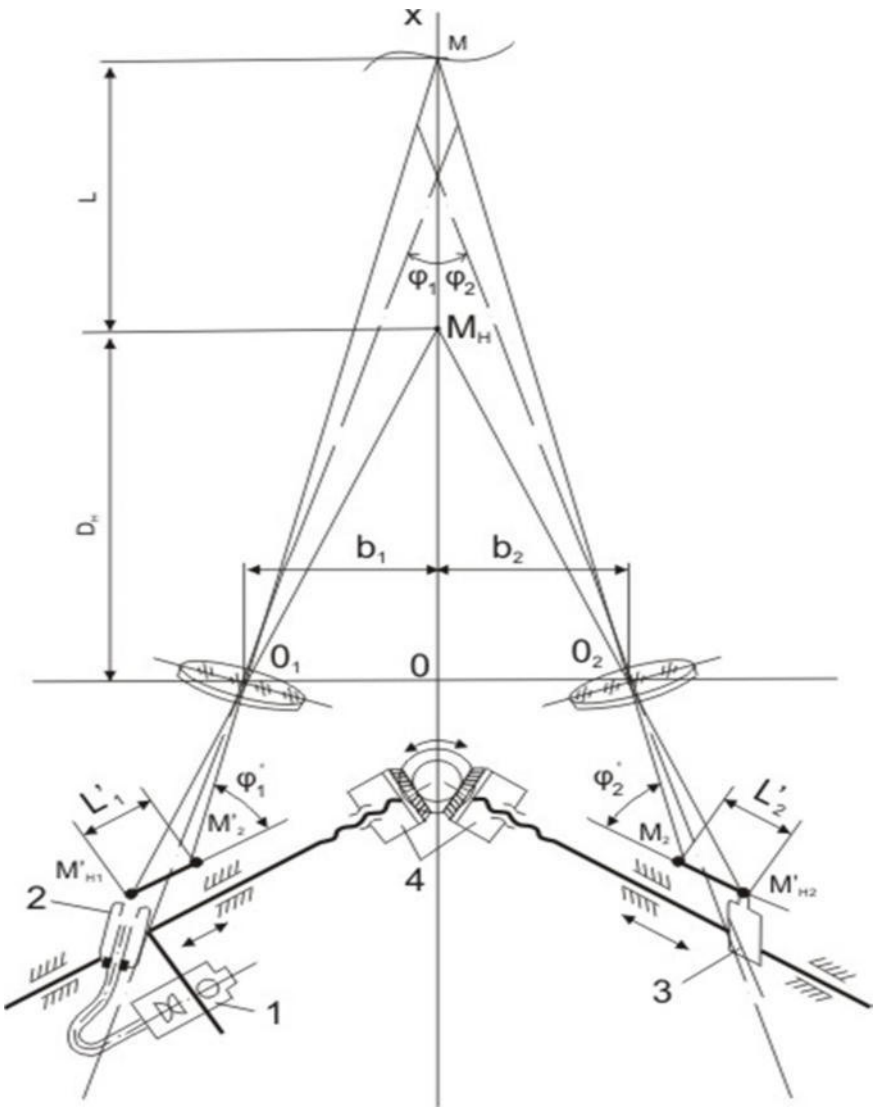


Рисунок 2.7 – Схема простейшего автоматического дальномера

Проектирующий канал содержит: осветитель 1, диафрагму 2 и объектив O_1. и выполняет функцию передачи изображения светящейся марки (диафрагма 2) на поверхность измерения *P*.

Приемный канал содержит: объектив O_2 и позиционно-чувствительный фотоприемник 3 и выполняет функцию передачи вторичного изображения марки на рабочую плоскость фотоприемника.

Объективы O_1 и O_2 примем одинаковыми, тогда линия измерений (ось *X*) будет одновременно линией симметрии оптической схемы. Согласно выводам в гл. 1 отрезок *L* линии измерений изобразится объективами O_1 и O_2 в виде прямолинейных отрезков L_1' и L_2', расположенных симметрично оси и равных

между собой по длине. Размеры диафрагмы 2 и ее вторичного изображения па фотоприемнике 3 будут одинаковы для такой схемы независимо от расстояния. Изменение расстояния от некоторого его начального значения $D_{\text{н}}$ до текущего D представим как перемещение предметной точки M по оси X. Тогда изображения этой точки M_1' и M_2', образуемые объективами O_1 и O_2, будут перемещаться по сопряженным с X линиям L_1' и L_2' .

Диафрагма 2 и фотоприемник 3 в начальном положении совмещены с точками M_1' и M_2', соответственно. Это их положение соответствует нижнему пределу измерения $D_{\text{п}}$, оно фиксируется конструктивными средствами и воспроизводится с требуемой точностью.

Текущее значение измеряемого расстояния D определяется как сумма по выражению (2.19)

$$D = D_H + L \ , \tag{2.19}$$

где D_H = const для конкретной системы; $L = F_1\ (L_1') = F_2(L_2')$.

Для текущего значения расстояния D можно найти такое положение диафрагмы 2 на линии L' и фотоприемника 3 на линии L_2', когда вторичное изображение диафрагмы совместится с рабочей площадкой фотоприемника. При этом величина смещения диафрагмы и фотоприемника от их начальных точек M_{1i}' и M_{2i}' однозначно определяет расстояние D.

Для полного смещения диафрагмы и фотоприемника соответственно принятому диапазону измерения от $D_{\text{Н}}$ до D воспользуемся формулой (2.20) [137]:

$$l' = \left[\frac{f}{X_{M_1} \cos\varphi + b \sin\varphi - f} - \frac{f}{X_M \cos\varphi + b \sin\varphi - f} \right] f \, , \tag{2.20}$$

которая для схемы на рисунке 2.7 может быть записана в виде (2.21):

$$L_1' = L_2' = \left[1 \Big/ \left(\frac{D_H}{f_{ob_2}} + \frac{b_2 \sin\varphi_2 - f_{ob_2}}{f_{ob_2} \cos\varphi_2} \right) - 1 \Big/ \left(\frac{D_{\max}}{f_{ob_2}} + \frac{b_2 \sin\varphi_2 - f_{ob_2}}{f_{ob_2} \cos\varphi_2} \right) \right] \frac{f_{ob_2}}{\cos\varphi_2 \cos\varphi_2'} \ , \tag{2.21}$$

где $D_{\text{Н}}$ и $D_{\max}$ – предельные значения диапазона измерений; $b_2 = b_1$ – расстояние от линии измерений до узловой точки объектива; $\varphi_1 = \varphi_2$ – угол наклона

оптической оси объектива к линии измерений; $\varphi'_1 = \varphi'_2$ – угол наклона отрезка L_2^1 (L_1^1) к оптической оси объектива (вычисляется по формуле $tg\phi' = W_{m_0} tg\varphi$); $f_{ob_2} = f_{ob_1}$, – фокусное расстояние объектива.

Очевидно, что равенство $L_1^1 = L_2^1$ соблюдается при симметричном относительно линии измерений расположении одинаковых объективов. Достоинства симметричной двухканальной системы заключаются в том, что отрезки L_l^l и L_2^l симметричны относительно линии расстояния, и размер вторичного изображения марки остается постоянным при изменении расстояния *D.* Первое позволяет простыми средствами синхронизировать перемещения диафрагмы 2 и фотоприемника 3, без чего довольно трудно добиться совмещения изображения диафрагмы с фотоприемником. Второе обеспечивает единство условий совмещения.

При синхронном перемещении диафрагмы 2 и фотоприемника 3 от M'_{1i} к M'_1 в левом канале и от M'_{2i} к M'_2 в правом канале каждое их мгновенное положение соответствует определенному значению расстояния *D.* Процесс определения расстояния *D* по схеме на рисунке 2.7 состоит из следующих действий:

- синхронным перемещением диафрагмы 2 и фотоприемника 3 последний приводится в совмещение с вторичным изображением диафрагмы 2;
- в момент совмещения измеряется перемещение L_2^1 фотоприемника от его начального положения;
- вычисляется расстояние *D* по формуле (2.19).

Для представленной схемы безразлично, какую подставить функцию в выражение (2.19): $L = F_1(L'_1)$ или $L = F_2(L'_2)$, ибо для данного случая они выражаются через равные параметры $b_2 = b_1$, $\varphi_1 = \varphi_2$ $f_{ob_1} = f_{ob} = f_{ob2}$ согласно формуле (2.22) [194]:

$$L = \frac{1}{a_1 - a_2 L'} + a_3 - D_0. \qquad (2.22)$$

где $a_1 = \dfrac{1}{X_{M_1} - a_3} = \text{const};$

$$a_2 = 2\frac{(f - b\sin\varphi)\cos^2\varphi 2\cos(\varphi' + \varphi)}{\left[f^2 + b(b - 2f\sin\varphi)\right]} = \text{const};$$

$$a_3 = \frac{f - b\sin\varphi}{\cos\varphi} = \text{const}.$$

Через параметры приемного канала расчетную формулу (2.19) можно записать в виде (2.23):

$$D = D_H + 1/V_H^2\left[1/L_2'\cos\varphi_2' - 1/V_H f_{ob}\right]\cos\varphi_2 \qquad (2.23)$$

Параметры проектирующего канала не входят в (2.23), этот канал выполняет функцию задатчика линии измерений. Положение проектирующего канала относительно приемного не изменяет параметров выражения (2.23) и поэтому может приниматься произвольным.

Многоканальные оптические системы активного типа

Многоканальными называются оптические системы с числом каналов больше двух [196]. Как правило, многоканальную компоновку имеют оптические системы активного типа. При одном канале свободная оптическая система позволяет производить измерения только в направлении ее оптической оси. Два канала дают возможность фиксировать внутри системы положение линии измерений и формировать источник измерительной информации в виде, удобном для восприятия и обработки. Увеличение количества каналов позволяет расширить метрологические возможности оптических измерительных систем. Совокупность измерительных каналов позволяет комплексно определять сразу несколько геометрических параметров (рисунок 2.8), что позволяет контролировать не только размеры, но форму (рисунок 2.9) и взаимное расположение поверхностей на основе значений координат нескольких сопряженных точек.

Многоканальные системы могут состоять из нескольких конструктивно объединенных самостоятельных систем измерения или быть представлены системой, все элементы которой связаны функционально. В каждом из этих

вариантов сочетаний каждый из каналов в отдельности осуществляет преобразование измерительной информации в соответствии с теоретической схемой. Таким образом измерительные соотношения для сопряженных точек и отрезков не изменяются.

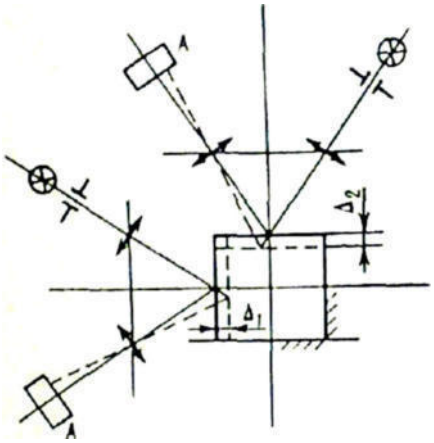


Рисунок 2.8 – Система контроля двух размеров детали

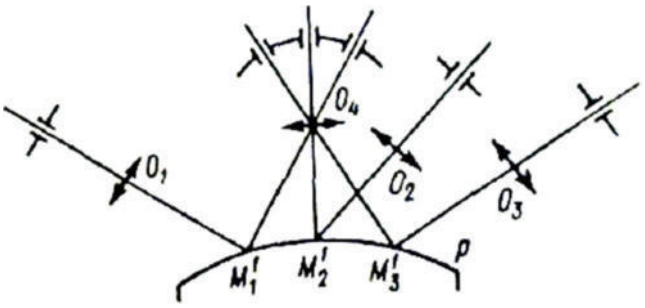


Рисунок 2.9 – Система контроля формы поверхности

Особенности построения многоканальных систем следуют из требований согласования каналов передачи и приема оптической измерительной информации и оптимизации системы по ее структуре и параметрам. Условия оптимизации невозможно сформулировать в общем виде, поскольку они определяются по конкретным условиям. Поясним это несколькими примерами.

Система на рисунке 2.8 выполняет контроль двух размеров детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях одновременно, что соответствует первому из рассмотренных вариантов – конструктивному объединению. Измерения производятся независимо одно от другого, каналы передачи измерительной информации не имеют функциональной связи между собой, общими для них могут быть устройства, обеспечивающие функционирование системы.

Второй, более сложный вариант многоканальной системы, показанный на рисунке 2.9, используется для определения формы поверхности, которая

вычисляется по координатам трех точек M_1,M_2,M_3. В точки измерения проектируются изображения светящихся марок, их вторичные изображения передаются в приемные каналы. Такая система может быть организована по одному из четырех возможных вариантов:

1) для каждой точки отдельная двухканальная система и общий блок вычисления результатов измерения формы;

2) для всех трех точек общий проектирующий канал и общий приемный;

3) общий приемный канал, проектирующие каналы разобщены;

4) общий проектирующий канал, приемные каналы разобщены (данная компоновка является основой для современных систем 3D сканирования объектов).

Выбор оптимального варианта производится по условиям измерения, юстировки системы, поверки. Определяющими факторами в большинстве случаев оказываются поле зрения объектива, физические и конструктивные характеристики устройств индикации, оптические свойства поверхности измерения.

Важнейшим структурным элементом оптической системы бесконтактного измерения, определяющим саму возможность осуществления той или иной метрологической функции, является устройство индикации. Использование цифровой(ых) камер позволяет расширить функциональные возможности таких систем и в совокупности с проектором, формирующим структурированную подсветку, реализовать программно переконфигуригурируемую систему по 2 варианту.

2.5 Моделирование действия оптических зеркальных преобразователей

В состав теории зеркальных систем (ЗС) [61, 62, 77, 95, 103, 136, 173, 191, 208, 209, 211] входят следующие вопросы:

- описание закономерностей преобразования пространства каждым из типов неподвижных зеркальных систем и теория построения зеркального изображения для статичных ЗС. Эта часть теории наиболее полно изучена и разработана;

- изучение влияний подвижек на характер преобразования пространства вдоль неизменного направления или при повороте вокруг него (часть теории ЗС, являющаяся основой научных методик юстировки оптических приборов);

– определение преобразования пространства зеркальной системой, поступательно перемещающейся в произвольном направлении, или с элементами, совершающими это движение;

– определение действия ЗС, поворачивающейся вокруг осей, не являющихся основными неизменными направлениями;

– действие особым образом ориентированных относительно осей вращения зеркал, отражающая поверхность которых лежит на оси вращения либо параллельна ей;

Таким образом, обзор литературы показал, что в настоящее время имеется сумма сведений о действии различных типов ЗС:

- классификация и описание действий статичных простейших ЗС;
- методика эквивалентной замены сложных ЗС совокупностью простейших ЗС;
- совокупность геометрических моделей, описывающих действия простейших ЗС;
- набор математических моделей, описывающих действий ЗС;
- сведения о характере движения изображения в поступательно перемещающихся и вращающихся зеркалах.

Для определения координат точек и отрезков в пространстве изображений используются методы, сущность которых заключается в том, что все пространство изображений или его часть смещается относительно неподвижной системы координат. Тем самым изображение предметной точки приводится в заданное положение, фиксированное в неподвижной системе координат. Необходимое для этого перемещение пространства изображений служит мерой

определяемого параметра (длины, координаты и т. п.). Перемещение пространства изображений осуществляется посредством оптических преобразователей.

Зеркальные ОП имеют ряд очевидных преимуществ: они совершенно не искажают изображения, свободны от аберраций, диапазон преобразований для них теоретически не ограничен, масштабные коэффициенты можно задавать в широких пределах, т. е. они обладают всеми качествами, которые необходимы для систем измерения по сопряженным отрезкам.

На рисунке 2.10 показан оператор действия одиночного зеркала (ОЗ) [60].

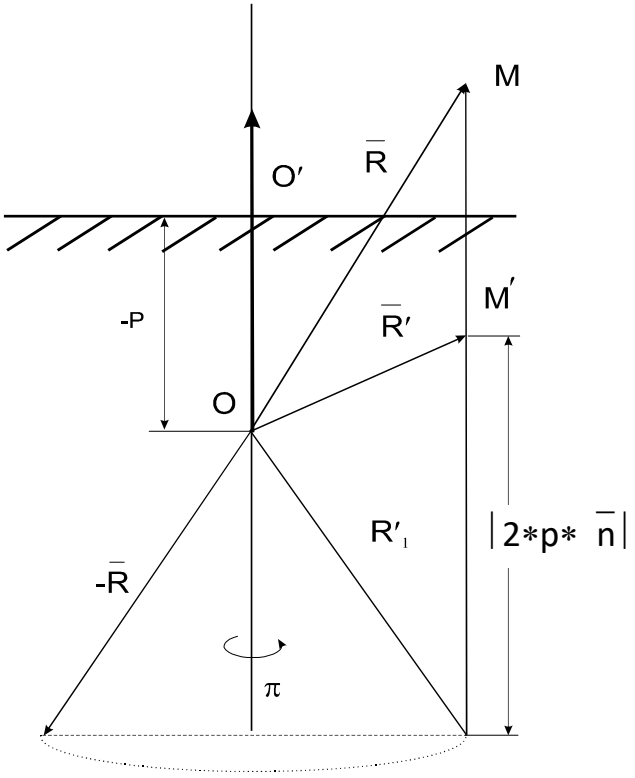


Рисунок 2.10 – Оператор действия ОЗ

Оператор ОЗ осуществляет все три вида преобразований:

– инверсию радиус-вектора $\bar{r}$ точки М относительно начала координат (радиус-вектор - $\bar{r}$),
– поворота радиус-вектора - $\bar{r}$ вокруг оси $\bar{n}$ на угол π (радиус-вектор $\bar{r}_1$),
– сдвига конца радиус-вектора $\bar{r}_1$ вдоль оси $\bar{n}$ на величину 2p (радиус-вектор $\bar{r}'$), где p определяется равенством OO′ = pn.

На основе этих преобразований разработаны методы эквивалентной замены сложных ЗС их простейшими типами, причем широко используются только два приема: вращение угловых зеркал вокруг их ребер и сдвиги и повороты зеркальных ромбов с соответствующей коррекцией их параметров.

Конструирование зеркальных оптических преобразователей не представляет особой сложности: достаточно знать законы построения изображений в одиночном зеркале и определения траекторий перемещения при подвижках одиночного зеркала.

Изображение точки, полученное с помощью ОЗ, всегда лежит на нормали к нему, а траектория ее движения может быть либо прямой линией, совпадающей с нормалью, при поступательных перемещениях, либо кривой, лежащей на пересечении конуса, вершина которого в предметной точке, со сферой радиуса $R_{\text{М}}$, при вращении зеркала вокруг произвольной оси. Всякое сложное движение зеркала может быть приведено к этим двум.

Действие сложной зеркальной системы представляет собой геометрическую сумму независимых действий каждого из одиночных зеркал, составляющих эту систему. На принципе независимости действия отдельных элементов зеркальных систем базируются теоретические основы синтеза их по заданной функции действия. В таблице 2.1 [196] представлена характеристика действия зеркальных преобразователей.

Для задания точных перемещений можно использовать свойства ЗП [194]. Данная схема была реализована в автоматизированном стенде для аттестации позиционно чувствительных фотоприемников [106].

2.5.1 Зеркальные преобразователи на основе вращающихся зеркал

Для описания действий вращающихся зеркал была разработана коническая модель, которая изображена на рисунке 2.5 [112]. Предложено рассматривать

траекторию движения изображения точки во вращающемся ОЗ как сумму двух простых движений: вращательного и поступательного.

Таблица 2.1 – Характеристика действия зеркальных преобразователей

Тип ЗП		Влияние направления перемещения ЗП		Значение масштабного коэффициента K при $^{\alpha}S = 0$
		Направление смещения изображения	Масштабный коэффициент	
ОЗ		Не зависит	Зависит	$2\cos(\alpha_S - \alpha_1)$ $2\sin\sigma$
Угловое зеркало		Зависит	Не зависит	
Система из трех зеркал	Подвижное одиночное зеркало	Не зависит	Зависит	$2\cos(\alpha_S - \alpha_1)$
	Подвижные зеркала 1 и 3	Не зависит $\alpha_2 = \frac{1}{2}(\sigma + 2\alpha_1)$	Зависит	$0 \le K \le 4\sin\frac{1}{2}\sigma$
	Подвижная вся система	Зависит	Зависит	$0 \le K \le 2\cos(2\theta - \alpha_S)$

Поворот соответствует изменению угла α конуса с вершиной в точке M и углом 2φ при вершине. Угол φ соответствует наклону вектора нормали n зеркала к оси вращения его вращения *e*.

На рисунке 2.5. *e* совпадает с осью OZ. Зеркало вращаются со скоростью ω. Поступательному движению соответствует перемещение вдоль образующей описанного конуса. Ось конуса параллельна оси вращения зеркала. Положение точки *M* описывается в полярных координатах: радиус-вектором – R, углом его наклона к оси OZ – γ и углом поворота α. Начальное положение ОЗ α = 0° будет такое, в котором проекция нормали зеркала лежит на оси ОУ. Связь между точкой *M* и ее изображением *M′*, как образующую линейчатую поверхность конуса, можно выразить следующей зависимостью (2.24):

$$MM' = 2 \times R \times \left(\cos\varphi \times \cos\gamma - \sin\varphi \times \sin\gamma \times \cos\alpha\right) \quad . \qquad (2.24)$$

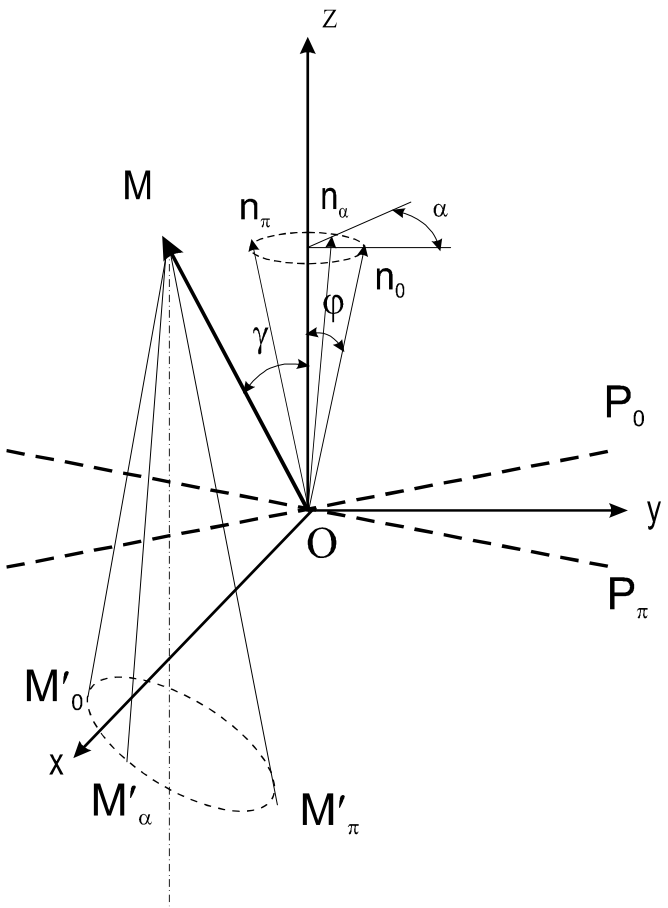


Рисунок 2.11 – Коническая модель вращающегося плоского ОЗ

На основании разработанной конической модели действия вращающегося ОЗ, можно описать положение изображения точки М в координатной форме (2.25) [107]:

$$\begin{cases} M'x = R \times \left(\sin 2\varphi \times \cos\gamma \times \sin\alpha - \sin^2\varphi \times \sin\gamma \times \sin 2\alpha\right) \\ M'y = R \times \left(2 \times \sin^2\varphi \times \cos^2\alpha \times \sin\gamma - \sin 2\varphi \times \cos\gamma \times \cos\alpha - \sin\gamma\right) \\ M'z = R \times \left(\cos\gamma - 2 \times \cos^2\varphi \times \cos\gamma + \sin 2\varphi \times \sin\gamma \times \cos\alpha\right) \end{cases}. \quad (2.25)$$

Характер изменения траектории движения изображения точки во вращающемся ОЗ при изменении угла наклона зеркала – φ показан на рисунке 2.12, а при изменении угла γ на рисунке 2.13.

Для выявления возможности применения вращающегося зеркала в качестве измерительного преобразователя в системах автоматического контроля по линейным и угловым координатам и, в частности, средствах контроля положения плоскости вращения необходимо определить масштабные коэффициенты,

характеризующие чувствительность изменения формы траектории к изменению параметров зеркального преобразователя [190].

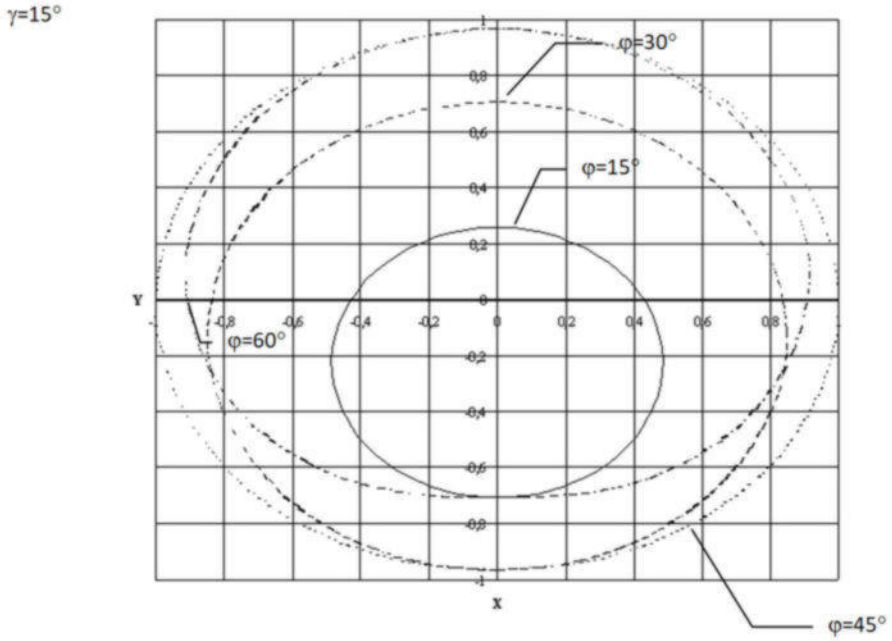


Рисунок 2.12 – Траектории движения изображения точки во вращающемся ОЗ при варьировании угла φ

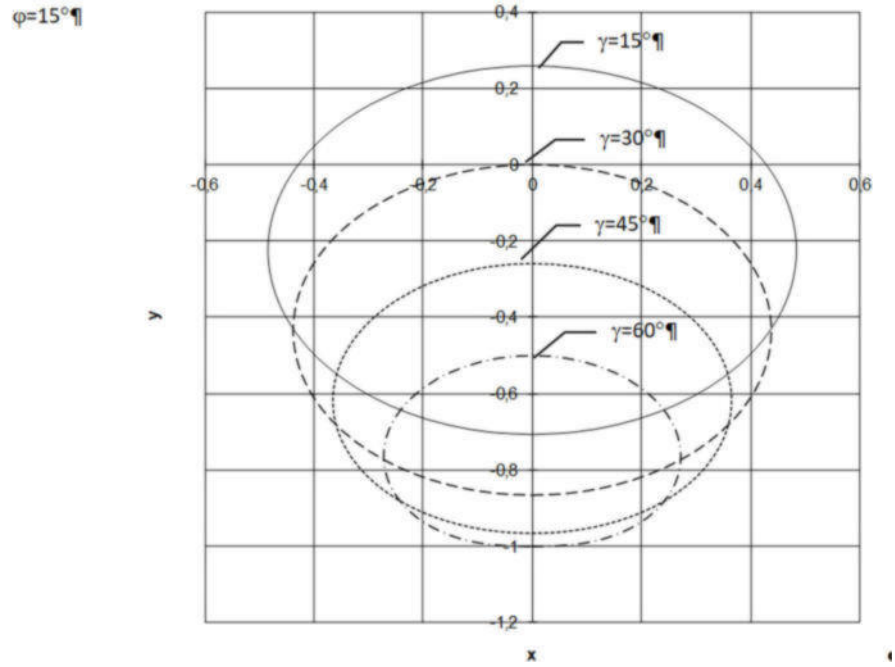


Рисунок 2.13 –Траектории движения изображения точки во вращающемся ОЗ при варьировании γ

На рисунке 2.14 представлен график изменения k_φ в зависимости от угла поворота зеркала α при фиксированных значениях угла γ = (0, 15, ... 75°)..

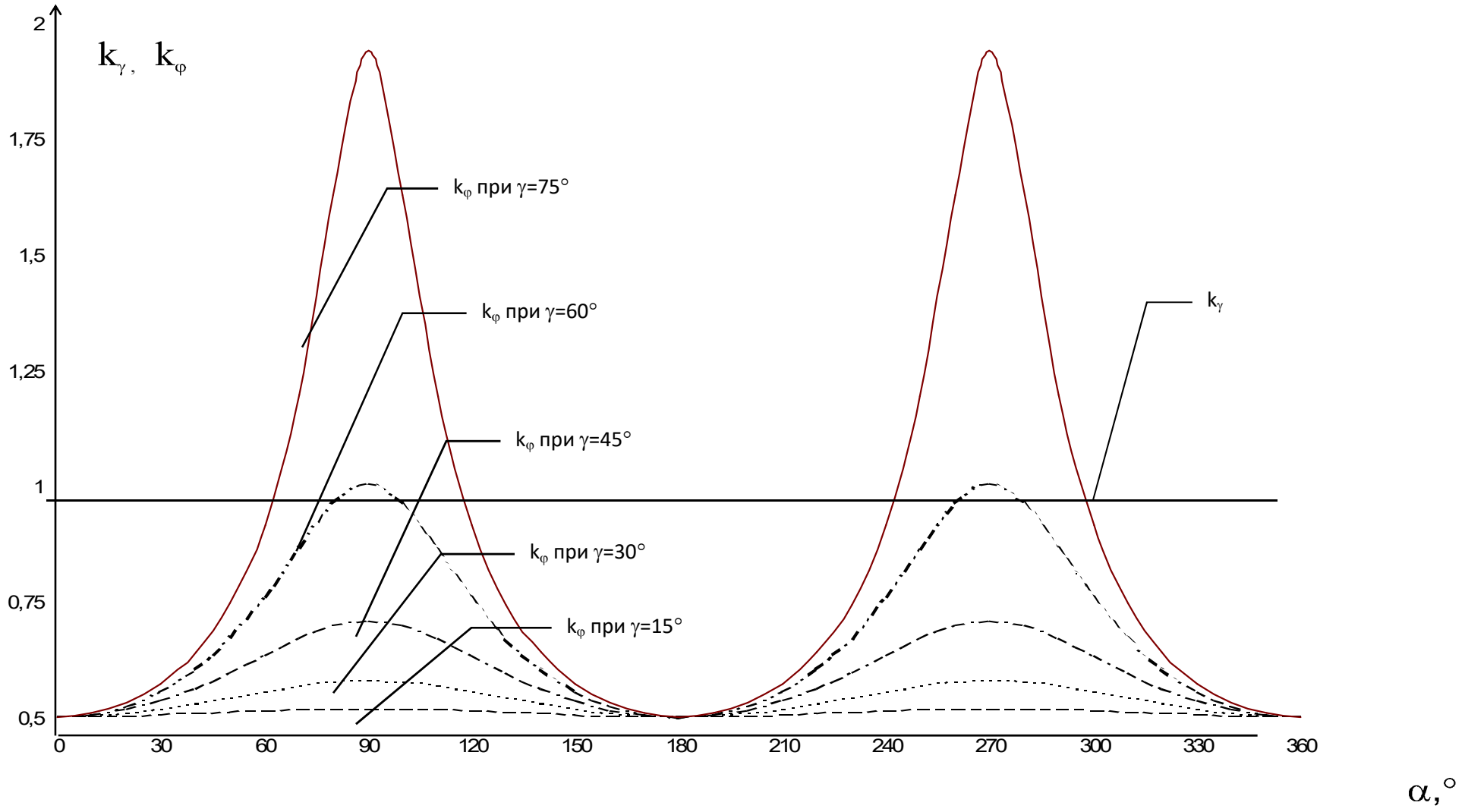


Рисунок 2.14 – Графики k_γ и k_φ изменения при варьировании γ и φ

Из рисунка 2.14 видно, что изменения коэффициента чувствительности к изменению угла наклона зеркала k_φ носят периодический характер. Минимальная чувствительность $k_\varphi = 1/2$ будет при значениях угла поворота зеркала кратных π, а максимальная k_φ при $\pi/2$. Разницу изменений координат точек траектории при изменении φ возможно использовать в качестве информативных параметров оптико-электронных средств контроля параметров вращающихся объектов.

Используя несколько последовательно расположенных моделей, возможно дать наглядную интерпретацию системы из любого количества вращающихся зеркал. Рассмотрим систему из двух вращающихся зеркал, представленную на рисунке 2.15. в которой траектория движения изображения точки во втором зеркале формируется в результате сложения четырех движений. Двух поступательных по образующей конусов и вращательных движений обеих конусов [111]. Ось вращения второго конуса параллельна e_2 , а его вершина перемещается по траектории со скоростью изображения точки-прообраза в первом по ходу лучей зеркале. Конуса направлены навстречу друг другу.

Параметрами для описания изображения точки в системе двух вращающихся зеркал, конической моделью будут: положение предметной точки M, заданное радиус-вектором R_1 и углом его наклона γ_1 к оси вращения первого зеркала e_1, углы наклона φ_1 и φ_2 векторов нормалей n_1 и n_2 первого и второго зеркал к осям их вращения e_1 и e_2, и взаимное положение зеркал [3]. Соотношения скоростей вращения учитываем посредством введения коэффициента n при α_2 , а направление вращения учитываем знаком перед величиной α. Величина n определяется отношением (2.26):

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad , \qquad (2.26)$$

где ω_1 и ω_2 - скорости вращения первого и второго зеркала соответственно.

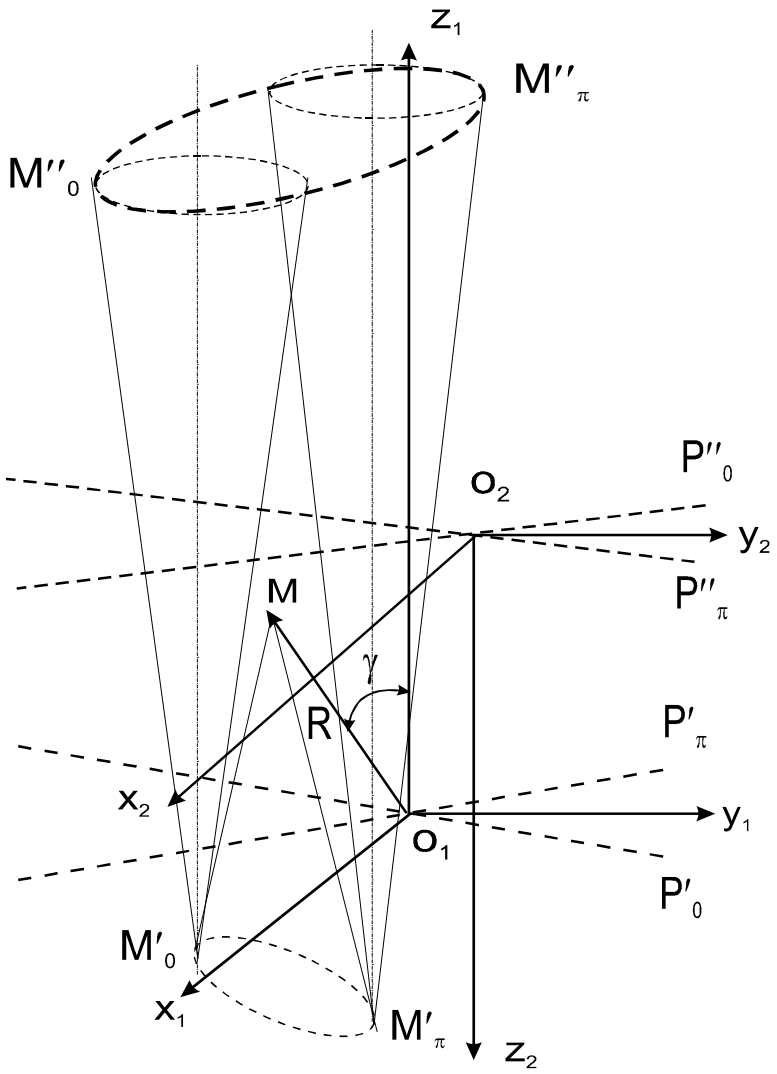


Рисунок 2.15 – Геометрическая модель изображения точки в системе двух вращающихся зеркал

Начальное положение вектора нормали второго зеркала относительно первого будем фиксировать как угол поворота вектора нормали вокруг оси вращения от выбранного нулевого положения к начальному и вводить в аналитическую функцию в виде начальной фазы угла поворота α_0.

При описании изображения точки во втором зеркале примем условие независимости изображений в каждом из зеркал, согласно которому в качестве исходных данных для второго зеркала рассматривается только

изображение M′ точки M в первом зеркале. Следовательно, для второго зеркала в качестве прообраза будет выступать подвижная точка.

Тогда координаты изображения M" во втором зеркале можно выразить следующей системой (2.27):

$$
\begin{cases}
M''x(\alpha) = x_2(\alpha) - \sin(\alpha) \times \sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2} \times \\
\times \left(\begin{array}{l} \sin 2\varphi \times \left(\dfrac{z(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2}} \right) - \\ - \left(\begin{array}{l} 2 \times \sin^2 \varphi \times \left(\sqrt{1 - \left(\dfrac{z(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2}} \right)^2} \right) \times \\ \times \cos \left(n \times \alpha + \alpha_0 - \arcsin \dfrac{x(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2}} \right) \end{array} \right) \end{array} \right) \\
M''y(\alpha) = y_2(\alpha) - \cos(\alpha) \times \sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2} \times \\
\times \left(\begin{array}{l} Sin\, 2\varphi \times \left(\dfrac{z(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2}} \right) - \\ - \left(\begin{array}{l} 2 \times Sin^2 \varphi \times \sqrt{\left(1 - \left(\dfrac{z(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2}} \right)^2 \right)} \times \\ \times \cos \left(n \times \alpha + \alpha_0 - \arcsin \dfrac{x(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2}} \right) \end{array} \right) \end{array} \right) \\
M''z(\alpha) = z_2(\alpha) - \sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2} \times \\
\times \left(\begin{array}{l} 2 \times \cos^2 \varphi \times \left(\dfrac{z(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2}} \right) - \\ - \left(\begin{array}{l} \sin 2\varphi \times \sqrt{1 - \left(\dfrac{z(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2 + (z(\alpha))^2}} \right)^2} \times \\ \times \cos \left(n \times \alpha + \alpha_0 - \arcsin \dfrac{x(\alpha)}{\sqrt{(x(\alpha))^2 + (y(\alpha))^2}} \right) \end{array} \right) \end{array} \right)
\end{cases}
\quad . (2.27)
$$

Система (2.27) может быть основой для рассмотрения действия ЗС, состоящей из любого количества вращающихся зеркал, используя в качестве прообраза изображение точки в предыдущем зеркале. При этом действие зеркальной системы фактически представляет собой геометрическую сумму действия каждого из вращающихся ОЗ, составляющих систему [2…4].

2.6 Энергетические аспекты передачи измерительной информации

Рассмотрим общий случай, когда точка M (X, Y) лежит вне оптической оси объектива, но перемещается параллельно ей. Схема передачи измерительной информации показана на рисунке 2.16. Точка M перемещается на вектор L в положение M_1. Сопряженный вектор L' расположен на луче, проходящем через точку F' заднего фокуса объектива под углом φ' к его оптической оси, равным (2.28):

$$\varphi' = arctg\frac{Y_M}{f'} \ , \qquad (2.28)$$

где Y_M – ординаты точки M (расстояние от M до оптической оси); f' – заднее фокусное расстояние объектива.

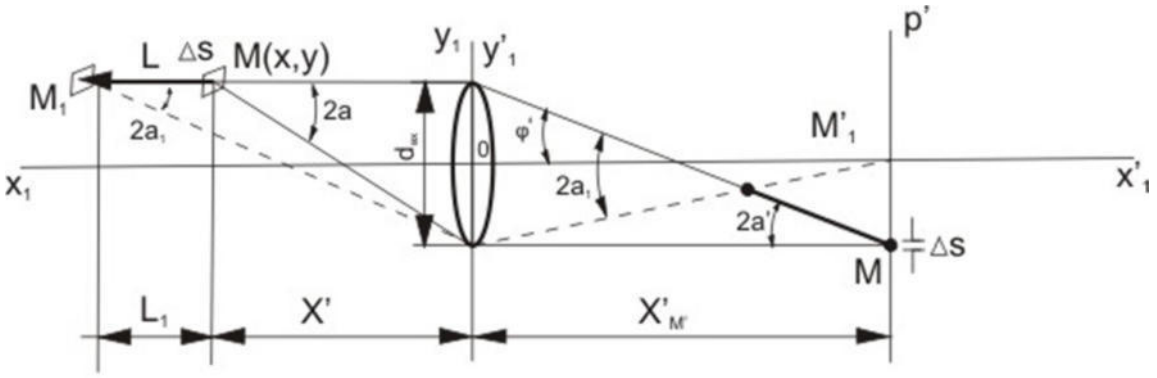


Рисунок 2.16 – Схема передачи измерительной информации для точки M лежащей вне оптической оси объектива, но перемещающейся параллельно ей

Смещение образа M на L приводит к изменению ее изображения M' на L', которую можно определить по (2.29):

$$L' = LV_M V_{M_1} \quad , \tag{2.29}$$

и изменением освещенности (2.30) [4]:

$$\Delta E' = k_2 \pi B \left(\frac{\sin^2 \alpha}{V_M^2} - \frac{\sin^2 \alpha_1}{V_{M_1}^2} \right) . \tag{2.30}$$

Если известно расстояние X_M, можно определить линейное увеличение в точке M_1 будет определятся по (2.31):

$$V_{M_1} = V_M \frac{1}{1 + \dfrac{L}{X_M - f}} \tag{2.31}$$

Подставив (2.31) в (2.29), получим уравнение (2.32):

$$L' = LV_M^2 \frac{1}{1 + \dfrac{L}{X_M - f}} = \frac{V_M^2}{\dfrac{1}{L} + \dfrac{1}{X_M - f}} \tag{2.32}$$

Применяя формулу (2.32) на основании с учетом (2.28), для абсолютной величины смещения изображения получим выражение (2.33):

$$L' = LV_M^2 \frac{1}{\left(1 + \dfrac{L}{X_M - f}\right)\cos\varphi'} = \frac{V_M^2}{\left(\dfrac{1}{L} + \dfrac{1}{X_M - f}\right)\cos\varphi'} \ . \tag{2.33}$$

В общем случае световой поток от площадки ΔS, на которой располагается прообраз M, вычисляется как функция плоского аппретурного угла объектива α (2.34):

$$\Phi_{\Delta S} = \pi B_{\Delta S} \sin^2 \alpha \tag{2.34}$$

где $\Phi_{\Delta S}$ — световой поток; ΔS – площадь излучения; α – аппретурный угол объектива; B – яркость площадки ΔS в направлении центра зрачка входа. В рассматриваемом случае используя по формулу (2.24) с учетом смещения точки M на величину Y_M световой поток будет определяться зависимостью (2.35):

$$\Phi_{\Delta S} = \pi B \Delta S \sin^2 \alpha \cos^4 \gamma , \tag{2.35}$$

где γ – полевой угол точки *M* (угол, под которым видна точка *M* из центра зрачка входа); α – апертурный угол, вычисляемый по (2.36):

$$\alpha = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{X_M^2 Y_M^2 - d_{BX}^2/2}{X_M d_{BX}} \tag{2.36}$$

Световая энергия, воспринимаемая фоточувствительной площадкой Δ*S*, поставленной в точке *M′* (см. рисунке 2.13), будет изменяться при перемещении точки *M* под воздействием трех факторов: изменения светового потока, перераспределения освещенности в плоскости *P′* вследствие расфокусировки, смещения $\Delta Y'_M$ светового пятна по перпендикуляру к оптической оси определяемого (3.37):

$$\Delta Y'_{M'} = L' \sin \varphi' . \tag{2.37}$$

Таким образом, условия передачи измерительной информации неодинаковы для случаев расположения точки *M* на оптической оси и вне ее. Абсолютная погрешность индикации будет зависеть от величины Y_M, длины вектора L перемещения точки *M* и яркости площадки Δ*S*.

Рассмотрим общий случай: точка *M* не лежит по оптической оси и перемещается под углом к ней, площадка Δ*S* не параллельна плоскости зрачка входа (рисунок 2.17).

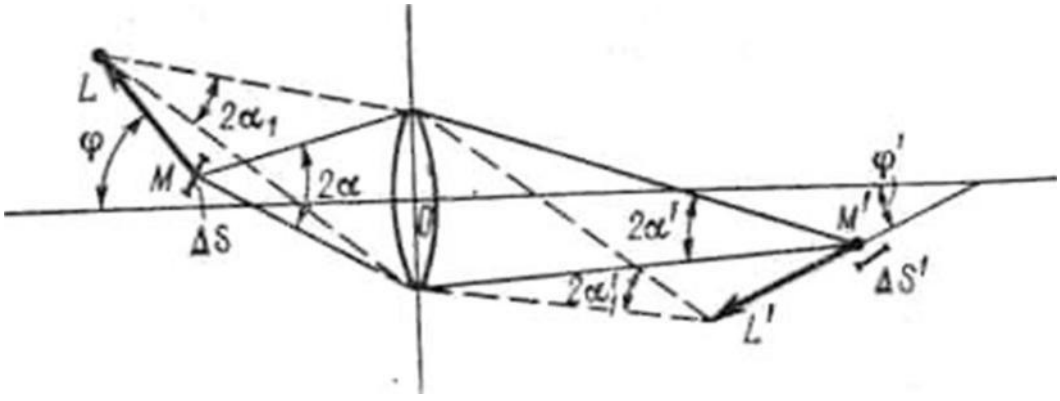


Рисунок 2.17 – Общий случай передачи измерительной информации для точки *M* не лежащей на оптической оси и перемещающейся под углом к ней

Перемещения *L* и *L′* связаны между собой по формуле (2.38)

$$L = \frac{1}{a_1 - a_2 L'} + a_3 - D_0. \tag{2.38}$$

где коэффициенты a_1, a_2, a_3 определяются зависимостями (2.39)…(2.41):

$$a_1 = \frac{1}{X_{M_1} - a_3} = \text{const}; \tag{2.29}$$

$$a_2 = 2\frac{(f - b\sin\varphi)\cos^2\varphi 2\cos(\varphi' + \varphi)}{\left[f^2 + b(b - 2f\sin\varphi)\right]} = \text{const}; \tag{2.40}$$

$$a_3 = \frac{f - b\sin\varphi}{\cos\varphi} = \text{const}. \tag{2.41}$$

Направление перемещений – по формуле (2.42):

$$tg\phi' = W_{m_0} tg\varphi \quad , \tag{2.42}$$

где W_{m_0} — угловое увеличение в точке пересечения осей OX и O_1X_1, вычисляемое по известной формуле (2.43):

$$W_{m_0} = 1/V_{m_0} \ . \tag{2.43}$$

Световой поток, проходящий через входной зрачок определяется по (2.44):

$$\Phi_{\Delta S} = \pi B \Delta S \sin^2\alpha \cos\varphi_S \cos\gamma, \tag{2.44}$$

где φ_S – угол между оптической осью и нормалью к поверхности ΔS. Апертурный угол α в (2.44) определяется по (2.36).

Освещенность фотоприемника, поставленного в точке M' и имеющего рабочую поверхность определим выражением (2.45):

$$E'_{\Delta S} = k_2 \pi B \frac{\sin^2\alpha}{V_M^2} \cos\varphi_5 \cos\gamma' \cos\left(\varphi'_{S'-\gamma'}\right) \quad , \tag{2.45}$$

где γ' – угол между оптической осью и лучом из центра объектива в точку M' (главный луч); $\varphi'_{S'}$ – угол между оптической осью и нормалью к рабочей поверхности $\Delta S'$ фотоприемника, $E'_{\Delta S'} = \frac{\Phi'_{\Delta S}}{\Delta S'}$,где $\Phi''_{\Delta S}$ – световой поток в пространстве изображений, равный световому потоку через зрачок входа, умноженному на коэффициент k_2 потерь в оптической системе.

Из выражения (2.45) следует, что для схемы на рисунке 2.17 освещенность на фотоприемнике зависит от ориентации его поверхности относительно главного луча, проектирующего изображение *M′*. Очевидно, что наиболее благоприятные условия передачи светового потока при $\varphi'_{S'} = \gamma'$, однако их не всегда возможно выполнить, поскольку угол γ' может изменяться в широких пределах (30–40°).

Изменение освещенности для данной схемы может быть значительным настолько, что чувствительность системы измерения на границах диапазона от $X_м$ до $X_м + L\cos\varphi$ уменьшается более чем в 100 раз.

Нелинейность функций характеризуется фокусным расстоянием объектива. В диапазоне перемещений точки *M* равном $X_м = f \div 2f$ линейное увеличение $V_м$ изменяется от $V_м = -\infty$ до $V_м = -1$ (зависимость $V_M = F\left(\frac{X_M}{f}\right)$ указана на рисунке 2.18). Приращение ΔV линейного увеличения при перемещении *L* выражается соотношением (2.46):

$$\Delta V = -V_V \frac{1}{1+\frac{X_M - f}{L}} \tag{2.46}$$

откуда видно, что ΔV изменяется тоже нелинейно (2.47), обратно пропорционально третьей степени расстояния от точки фокуса до точки *M*:

$$\frac{d^2 V_M}{d^2 X_M} = \frac{2f}{\left(X_M - f\right)^3} \quad . \tag{2.47}$$

Для наглядного представления характеристики (2.47) процесса передачи измерительной информации подставим значения $X_M = (1{,}5;\ 1{,}7;\ 2f)$. После вычислений найдем для $\frac{d^2 V_M}{d^2 X_M}$ соответственно: $16\frac{1}{f^2};\ 2{,}9\frac{1}{f^2};\ 2\frac{1}{f^2}$. Этот пример показывает, что после $X_M = 2f$ условия передачи измерительной информации более стабильны.

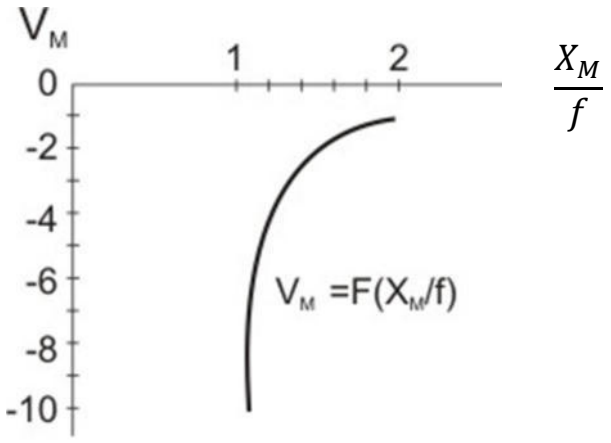


Рисунок 2.18 – Зависимость изменения линейного увеличения $V_{\text{м}}$ от отношения $\frac{X_M}{f}$

2.7 Выводы по Главе 2

1. Принципиальную сущность предлагаемых методов измерения в самом общем смысле можно представить как определение координат характерных точек по их оптическим изображениям.
2. Передача измерительной информации в оптических системах контроля геометрических параметров базируется на зависимостях, определяющих связь между пространством предметов и пространством изображений.
3. При построении систем контроля геометрических параметров на основе одноканальных пассивных систем необходимо однозначно задать положение сопряженных плоскостей, в которых будут располагаться образы и прообразы.
4. Использование многоканальных пассивных систем для контроля геометрических параметров изделий ограничивают условия надежного определения сопряженных точек, для соблюдения которого в настоящее время необходимо использовать специальные маркеры.
5. Применение активных систем со структурированной подсветкой позволяет установить однозначную связь между прообразом и образом в

произвольной точке пространства, что позволяет контролировать 3D геометрию объектов.

6. Система плоских зеркал, размещенная за объективом, позволяет произвольным образом изменить положение пространства изображений и при этом никак не меняет взаимного положения его точек и линий.
7. Использование преобразователей на основе плоских зеркал для оптических средств контроля взаимного расположения элементов изделий, при отсутствии явно выраженных баз, позволит обеспечить более высокую точность и метрологическую надежность измерений.
8. Коническая модель, описывающая разложение движения на вращательное и поступательное, отличается большей наглядностью и простотой описания закономерностей формирования траектории изображения точки во вращающемся зеркале.
9. Предложенная модель действия системы, состоящей из двух вращающихся зеркал, позволяет проследить, как формируется траектория изображения точки и какие факторы оказывают влияние на ее форму. Количественную оценку влияния этих факторов дает математическое описание, а модель упрощает понимание геометрических преобразований, происходящих в системе, и позволяет зримо представить абстрактные математические образы.
10. В целом, использование свойств оптических преобразователей на основе плоских зеркал является перспективным направлением совершенствования оптических систем контроля геометрических параметров расширяющее их функциональные возможности и упрощающие элементную базу.
11. Соотношения геометрических и энергетических параметров пространства предметов и пространства изображений выражаются нелинейными функциями. Нелинейность функций характеризуется фокусным расстоянием.

ГЛАВА 3 ПОГРЕШНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ И СПОСОБЫ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

3.1 Основные источники погрешностей оптических систем контроля

Модели передачи измерительной информации в оптических системах контроля, рассмотренные в главе 2, описывающие связь объекта с его изображением, базируются на основных положениях геометрической оптики и дают представление о работе идеальной оптической системы при передаче измерительной информации. При таком подходе для определения геометрических параметров объекта контроля по его изображению достаточно знать линейное увеличение, расстояние до плоскости и ее угловое положение относительно оптической оси и использовать зависимости, связывающие положения образа и прообраза в принятой системе координат.

В реальных оптических системах контроля, геометрическим методом с пространственным разрешением с регистрацией изображения цифровой камерой, присутствуют множество источников дополнительных погрешностей, суммарное действие которых искажает измерительную информацию. Характер распределения световой энергии на дискретном фотоприемнике или фотоприемной матрице цифровой камеры для реальной оптической системы контроля зависит от множества дополнительных факторов, связанных с особенностями характера освещенности и засветок, используемого объектива и оптических искажений среды, в которой передается оптическая информация.

В теории точности измерений [152] принят принцип независимости элементарных погрешностей. Согласно этому принципу влияние каждого источника погрешности может рассматриваться независимо от остальных. Результирующая погрешность определяется как алгебраическая сумма

элементарных, если они являются систематическими, и на основании теории вероятностей, если составляющие погрешности являются случайными [194].

Работы по исследованию погрешностей методов проводились Якушенковым Ю.Г., Луканцевым В. Н., Колосовым М. П. [232, 233].

3.1.1 Основные источники погрешности пассивных оптических систем контроля

Для наглядного представления информации об источниках погрешности пассивной оптической системы контроля рассмотрим рисунок 3.1.

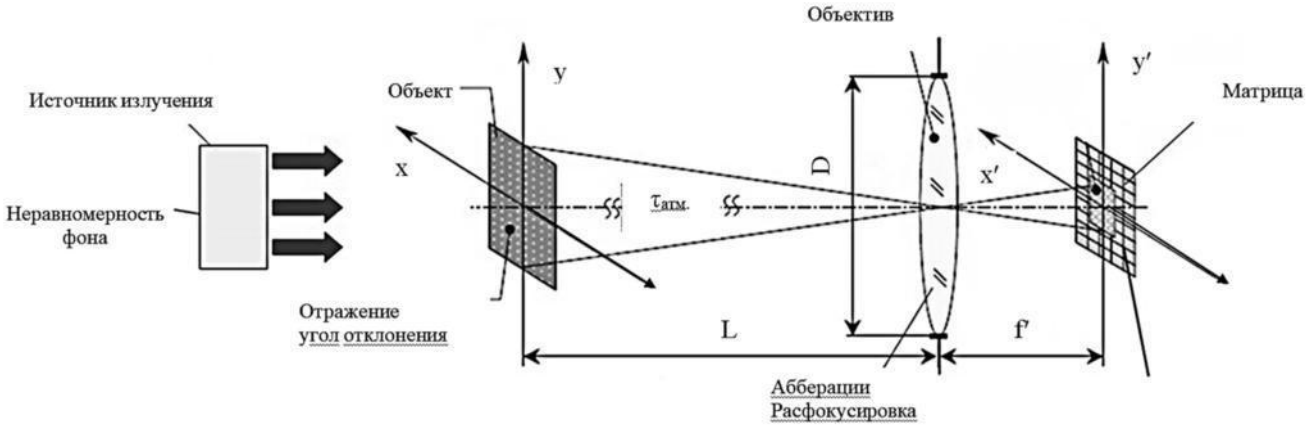


Рисунок 3.1 – Погрешности пассивной оптической системы контроля

Выделим основные составляющие погрешностей.

Инструментальные погрешности – возникающие при отклонениях параметров системы контроля как конструктивной совокупности оптической и электронной систем.

- Погрешности идеальной оптической системы:
  - погрешности определения координат;
  - положения объекта контроля (линейного ΔL и углового $\Delta\psi$);
  - фокусного расстояния объектива.
- Аберрации оптической системы;
- Шум матричного фотоприемника.

Методические погрешности – определяемые несовершенством принятого метода формирования и передачи измерительной информации. Источниками погрешностей этой группы являются тракт передачи информации и поверхность измерения.

- Погрешность фокусировки оптической системы;
- Рефракция оптической среды;
- Посторонние засветки;
- Оптические свойства поверхности измерения;
- Погрешности обработки измерительной информации (определение порогового значения бинаризации);

Рассмотрим подробнее эти составляющие.

Погрешности идеальной оптической системы

Для оценки погрешностей идеальной оптической системы используем методику расчета координат сопряженных точек (раздел 2.1). Оценить влияния каждой из ранее перечисленных составляющих можно взяв частные производные функций выражений (2.1) – (2.4) по соответствующему параметру.

Погрешность определения координат

Считая, что при обычных условиях $f = f'$, коэффициенты влияния K_{X_1} определения координат *x, y, z* можно представить выражениями (3.1) и (3.2):

$$K_{X_{1(X)}} = \frac{\partial X'_{1M}}{\partial X_{1M}} = \frac{\partial\left(X_{1M} - \frac{f}{X_{1M} - f}\right)}{\partial X_{1M}} = -\frac{1}{\left(\frac{X}{f} - 1\right)^2} = -V_M^2; \qquad (3.1)$$

$$K_{X_{1(YZ)}} = \frac{\partial Y'_{1M}}{\partial X'_{1M}} = \frac{\partial Z'_{1M}}{\partial X_{1M}} = -\frac{f}{(X_M - f)^2} = -V_M^2 \frac{1}{f}. \qquad (3.2)$$

На графиках на рисунке 3.2 представлены коэффициенты $K_{X_1(X)}$, $K_{X_1(Y)}$, $K_{X_1(Z)}$ влияния для случая $L >> f$ для камеры с разрешением 4 Мп и размером матрицы 1" для объектива 25 мм (рисунок 3.2). Расстояние до объекта $L>>f$ определялось для поля зрения 400x300 мм.

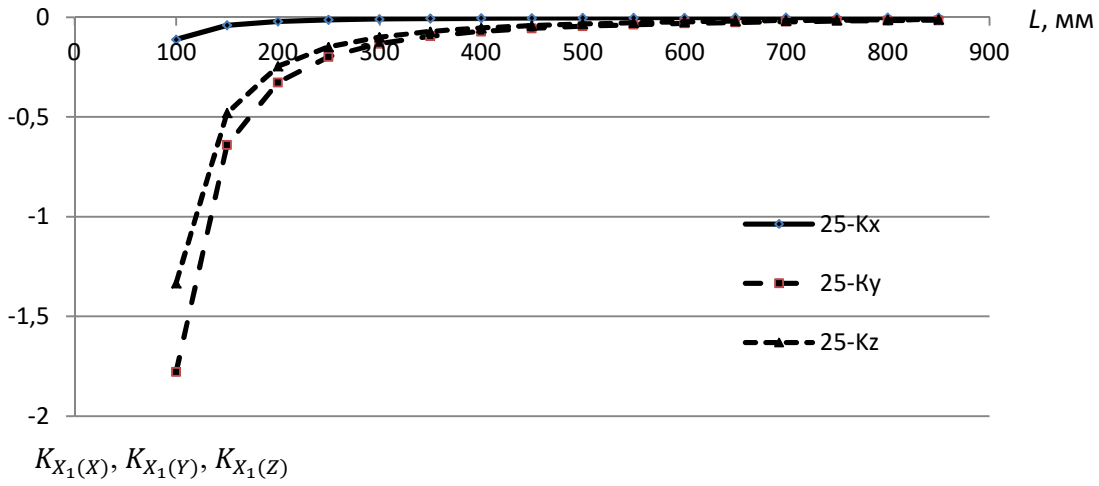


Рисунок 3.2 – Графики зависимости изменения коэффициентов $K_{X_1(X)}$, $K_{X_1(Y)}$, $K_{X_1(Z)}$

Коэффициенты K_Y и K_Z влияния погрешности определения координат прообраза Y_{1M} и Z_{1M} по их изображениям можно оценить следующей зависимостью (3.3):

$$K_{Z_1} = K_{Y_1} = -V_M \tag{3.3}$$

Представим в графической форме зависимости изменения линейного увеличения для ранее описанных условий при использовании объективов 6, 12 и 25 мм (рисунок 3.3) .

Погрешность фокусного расстояния объектива.

Оценить влияния погрешности фокусного расстояния объектива на точность определения геометрических параметров объекта контроля, описываемого координатами X_{1M}, Y_{1M}, Z_{1M}, можно, определив коэффициент K_f по (3.4)

$$K_f = \frac{\partial V_M}{\partial f} = \frac{X_{1M}}{(X_{1M} - f)^2} = V^2 \frac{X_{1M}}{f^2}. \tag{3.4}$$

Для наглядного представления характера влияния погрешностей идеальной оптической системы представим коэффициенты влияния представлены в таблице 3.1.

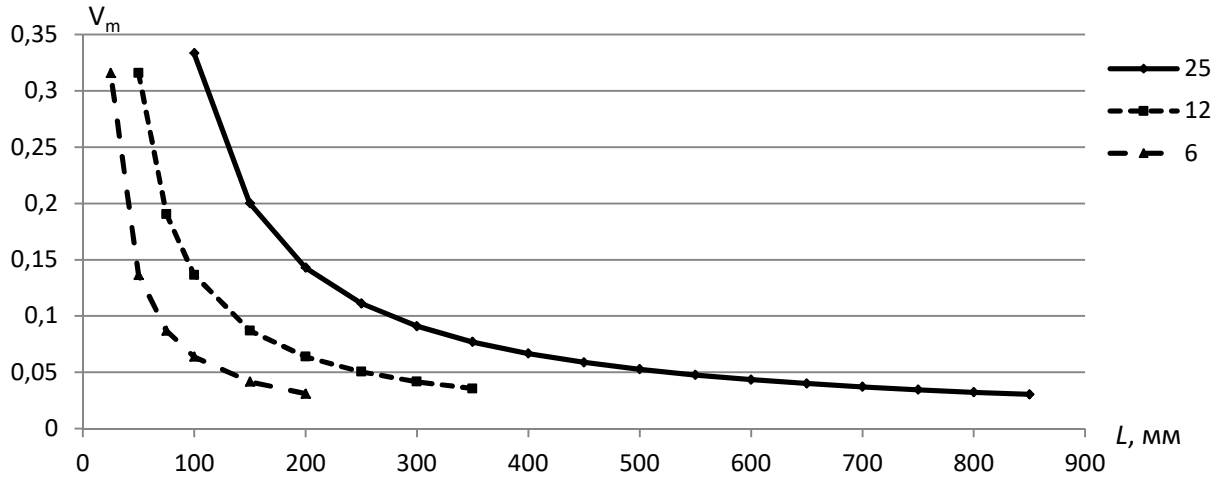


Рисунок 3.3 – График зависимости изменения линейного увеличения для объективов 6, 12 и 25 мм.

Таблица 3.1 – Коэффициенты влияния погрешностей задания параметров X_{1M}, Y_{1M}, Z_{1M} и f

Определяемый параметр	Коэффициент влияния			
	K_X	K_Y	K_Z	K_f
X'_{1M}	$-V_M^2$	0	0	$V_M^2 \frac{X_{1M}}{f^2}$
Y'_{1M}	$-V_M^2 \frac{1}{f} Y_{1M}$	$-V_M$	0	$V_M^2 \frac{X_{1M}}{f^2}$
Z'_{1M}	$-V_M^2 \frac{1}{f} Z_{1M}$	0	$-V_M$	$V_M^2 \frac{X_{1M}}{f^2}$

Из таблицы видно, что рассмотренные коэффициенты зависят от положения (X_{1M}, Y_{1M}, Z_{1M}) и фокусного расстояния – f оптической системы [196]. Из приведенных зависимостей видно, что на точность определения координат для рассматриваемой системы влияет изменение коэффициента линейного увеличения.

Погрешность позиционирования объекта

Влияние погрешности позиционирования для проекционного способа контроля можно оценить, рассмотрев влияние линейного смещения объекта контроля (представленного для простоты точкой М) вдоль оптической оси (по координате X_{1M}).

Таким образом, исследования показали, что увеличения отношения *L/f* делает измерительную систему менее чувствительной к возможным смещениям вдоль оптической оси.

Оценить изменение размера l можно используя зависимость (3.5):

$$\Delta l = l \cdot \left(1 - \frac{L-f}{L \pm \Delta L - f)}\right) \quad , \tag{3.5}$$

где ΔL – изменение рабочего расстояния.

Погрешности от наклона объекта возможно скорректировать, используя алгоритм, представленный в работе [21].

Аберрации оптической системы

При аберрациях оптической системы [19, 39, 99, 220] возникает искажение изображения, вызванное отклонением хода реальных лучей от идеальных (волновая, поперечные, продольная), что приводит к нарушению его подобия образу и возникновению погрешностей при определении геометрических параметров объектов контроля. Поэтому для оценки погрешностей систем геометрических параметров интерес представляют в основном монохроматические аберрации, которые согласно [19] можно разделить на следующие виды:

1) сферическую аберрацию;

2) отступление от условия синусов;

3) сферическую абберацию наклонного пучка лучей;

4) меридиональную кому;

5) сагиттальную кому;

6) аберрации косых (внемеридиональных) лучей;

7) астигматизм;

8) кривизну поля;

9) сферическую аберрацию в зрачках;

10) дисторсию.

Значения искажений для короткофокусных объективов, применяемых для решения задач контроля, могут доходить до 7–9% по краям поля зрения. В качестве примера на рисунке 3.4. показано поле искажений определения положения реперных точек на тест-объекте для объектива *Ricoh FL–HC0612A-VG* (*f* = 6 мм).

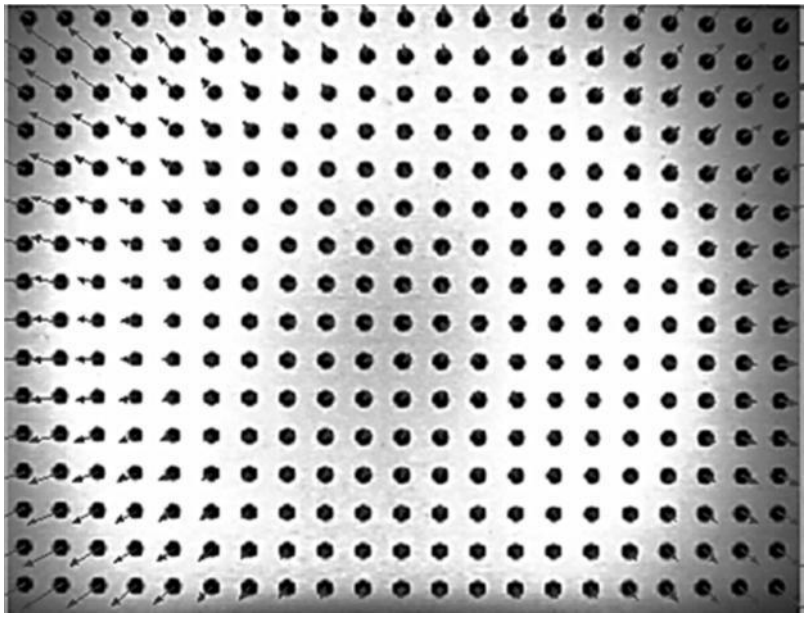


Рисунок 3.4 – Поле искажений определения положения реперных точек на тест-объекте для объектива *Ricoh FL-HC0612A-VG*

Для уменьшения влияния аберраций можно использовать конструктивные методы, совершенствуя качество объективов цифровых камер, или реализовывать алгоритмические методы компенсации.

Конструктивный метод совершенствования оптической системы не позволяет исключить все аберрации и приводит к существенному увеличению стоимости таких объективов. При этом задача совершенствования короткофокусных объективов значительно сложнее, чем длиннофокусных.

Компенсация искажений оптической системы может быть реализована не только конструктивными методами, но и алгоритмическими. В настоящее время

широкое распространение для цифровых камер получила методика разработки программного обеспечения компенсации искажений. Методика реализует способ повышения точности, описанный в [185] «Индивидуальная градуировка средства измерений» и состоит в индивидуальной калибровке оптико-электронных систем по тест-объектам.

Шум фотоприемника цифровой камеры

На полезный сигнал в фотоприемной матрице цифровой камеры происходит наложение так называемого «паразитного» шума. Шумы, имеющие место в фотоприёмниках цифровых камер, могут быть разделены на следующие группы:

- радиационный шум;
- тепловой шум;
- генерационно-рекомбинационный шум;
- шум, вносимый электронной схемой считывания (усилителем, мультиплексором);
- геометрический шум.

Первые 4 группы можно отнести к случайно проявляющимся шумам, последнюю группу – к постоянным цифровым шумам. Постоянный шум характеризует геометрическую неоднородность конкретного матричного фотоприемника [81]. На рисунке 3.5 представлен график отклонений реперных точек тест-объекта в стационарном положении для web-камеры.

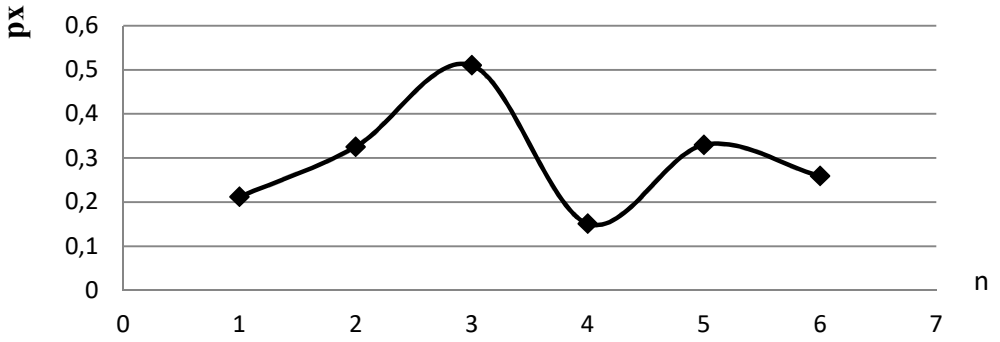


Рисунок 3.5 – Шумовая погрешность матрицы камеры

Уровень шума в значительной степени зависит от размера пикселя матрицы. Соответственно конструктивным методом уменьшения шумовой составляющей

является выбор цифровых камер, матрицы которых имеют больший размер пикселя.

Возможно использовать алгоритмические методы уменьшения/компенсации шумов матричных приемников. Наиболее простым может быть способ использования режимов получения изображения с большой выдержкой.

Существуют методики, основанные на компенсации шумов за счет калибровки систем. Примером такой компенсации является патент Сенина А.С., в котором описан «Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника», который заключается «в предварительной его калибровке путем поочередного равномерного облучения элементов фотоприемной матрицы от источника с низким и высоким уровнем излучения, при этом цифровые значения яркости элементов кадра изображения в процессе калибровки запоминают при минимальном времени экспозиции фотоприемника, задают максимальное время экспозиции при низком уровне равномерной облученности фотоприемника и запоминают в цифровой форме получаемые при этом значения яркости элементов кадра изображения, вычисляют их среднее значение, осуществляют преобразования и запоминают полученные значения яркости, вычисляют коэффициент для устанавливаемого времени t экспозиции фотоприемника, вычисляют значения яркости элементов эталонного кадра изображения и определяют их среднюю яркость, а при информативном облучении фотоприемника с установленным временем экспозиции t формируют выходное изображение» [161].

Рефракция оптической среды

Погрешности измерения вследствие рефракции оптической среды характерны при контроле изделий на значительных расстояниях на открытом воздухе или в промышленных условиях, где имеются концентрированные источники тепла. Результатом действия данной составляющей погрешности измерения является размытие или колебание изображения. Работы по исследованию влияния тепловых потоков [89, 150] просвещены, в основном,

атмосферным явлениям, наблюдаемым на значительном расстоянии между объектом контроля и приемной аппаратурой.

На рисунке 3.6 представлен график отклонений реперных точек тест-объекта в фиксированном положении при воздействии на тракт передачи информации теплового излучения от нагретого объекта.

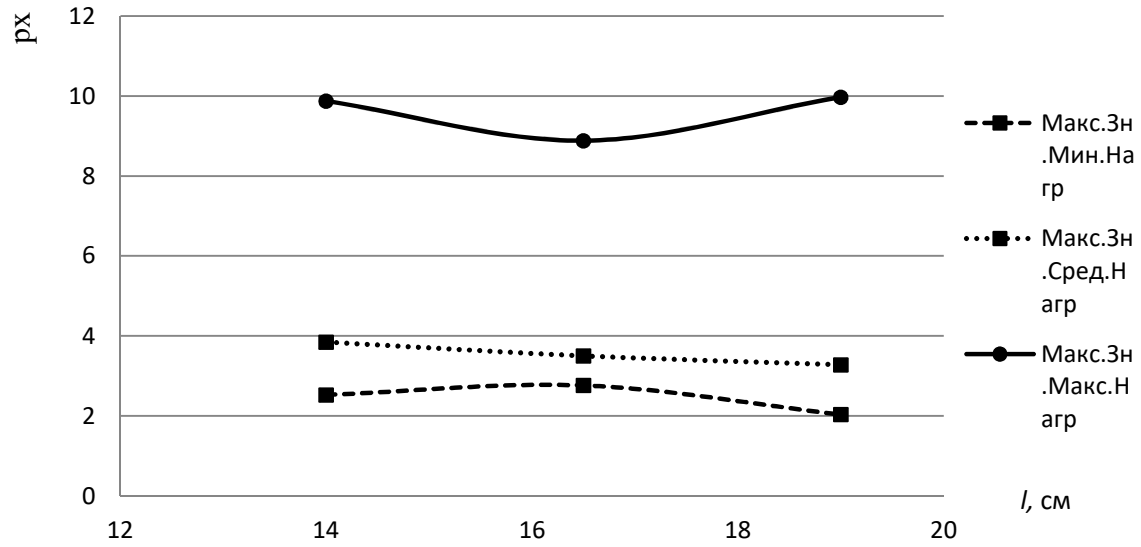


Рисунок 3.6 – Погрешность определения точек тест объекта при тепловой рефракции среды

В случае, если погрешности, вызванные рефракцией, велики, предложен способ решения проблемы [259] путем внедрения в экспериментальную установку устройства под название «Air Knife (Воздушный Нож)», он предназначался для уменьшения тепловой турбулентности и тщательного перемешивания воздуха в зоне видимости систем машинного зрения, тем самым уменьшая искажения, вызванные тепловыми потоками.

Влияние фоновой составляющей

Присутствие посторонней засветки как от естественных, так и искусственных источников приводит к появлению дополнительных погрешностей, вследствие снижения контрастности изображения. Наличие же посторонних объектов затрудняет выделение контролируемого объекта и может приводить к грубым ошибкам при измерениях. Поэтому при наличии стабильной

фоновой составляющей наиболее часто применяют операцию по вычитанию фона [135], которая позволяет уменьшить вычислительные затраты и облегчить процедуры поиска, фиксации, идентификации объектов а также извлечения измерительной информации.

Для выполнения процедуры вычитания фона, необходимо зафиксировать и проанализировать модель фона. Полученная модель сравнивается с текущим изображением, а затем известные части фона вычитаются. Объекты, оставшиеся после вычитания, будут являться новыми объектами переднего плана. При низкой контастности изображение применения процедуры вычитание может приводить к потере измерительной информации.

Отражение от поверхности объекта

При работе оптико-электронной системы в отраженном свете дополнительно возникают погрешности, определяемые отражательной способностью объекта. Данная проблема рассмотрена для сканирующих 3D систем [182, 230, 241]. Для 2D измерений посторонние засветки будут сказываться на точности выделения края объекта.

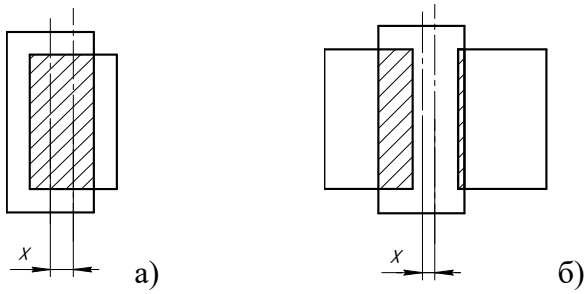
3.1.2 Основные источники погрешности активных оптических систем контроля геометрических параметров

Как было уже сказано, особенностью активных оптических систем является то, что они включают в свой состав устройства формирования исходной измерительной информации, создающие на поверхности объекта контроля оптическое излучение с заданными характеристиками или проецированием подсветки с пространственным структурированием интенсивности излучения (штрих, растр, совокупность точек и т. п.) или спектральным. Кроме устройств формирования стационарных картин структурированной подсветки в настоящее время применяются и серии изменяющихся картин (картины с мультиплексированием) [64, 233]. Соответственно, как было описано ранее (п. 1.3.1), в таких системах используются два (или более) оптических канала, один

(или одни) из которых является проектирующим, а другой (или другие) приемными. Проецирующий и приемный каналы функционально связаны посредством объект измерения [194].

Схемы считывания измерительной информации

Считывания измерительной информации активными системами при использовании дискретных фотоприемников состоит в определении положения изображения светящейся марки (или штрих-марки). При наличии подвижных оптических преобразователей (ОП) возможны этапы, связанные с поиском центра наведения и считывания положения ОП в момент совмещения. На рисунке 3.7 показаны примеры индикации на базе дискретных фотоприемников нониального и биссектариального типа [196]. Светящаяся марка на схеме показана светлым прямоугольником больших размеров. Фотоприемники на схеме показаны прямоугольниками меньших размеров, чем марка. Заштрихованная область показывает перекрытие фотоприемника светящейся маркой.



а) б)

Рисунок 3.7 – Нониальная (а) и биссекториальная (б) схемы наведения оптико-электронных устройств

Системы индикации нониального типа реализуют фотометрический принцип получения измерительной информации, при котором сигнал зависит как от площади перекрытия и чувствительности фотоприемника, так и от освещенности. В работе [194] показано, что «освещенность штрих-марки зависит от многих факторов, основными из которых являются: освещенность на маске проектирующего канала, аберрации проектирующего и приемного объективов и их светосила, оптические свойства поверхности объекта контроля, удаление

объекта от оптической системы». Поэтому в общем случае позиционная функция, характеризующая связь выходного сигнала с взаимным расположеним штрих-марки и фотоприемника будет нелинейной. Нелинейность функции зависит от распределения освещенности и характеристик фотоприемника, характеризующих изменение интегральной освещенности. Линеаризовать позиционную функцию можно варьируя эти два параметра [136].

Биссекториальный тип наведения представлен на рисунок3.6б. Данная схема использует два фотоприемника, расположенных параллельно по линии перемещения светящейся марки. Ширина марки выбирается из условия, что она должна частично перекрывать оба окна. Смещение марки в пределах площади одного фотоприемника соответствует изменению позиционной функции системы номинального типа. При перекрытии маркой второго окна можно сопоставлять выходные сигналы с двух фотоприемников, включенных по дифференциальной схеме так, что на одном них сигнал возрастает, а на другом уменьшается. Положение, при котором сигналы от фотоприемников сравняются, принимают за центр наведения.

Таким образом, общая форма сигнала определяется идеальными координатными характеристиками – соотношением площадей засветки позиционно-чувствительных фотоприемников.

Для исследования характера изменения формы измерительного сигнала рассмотрим простейшую математическую модель [109], использующую следующие допущения (рисунок 3.8):

- форма рабочей области фотоприемников прямоугольная, ее ширина равна a,
- расстояние между фотоприемниками b.
- в пределах рабочей площади засветки фотоприемников световая характеристика постоянна и идентична;
- ширина изображения штрих-марки равна ширине штрихов растра c.

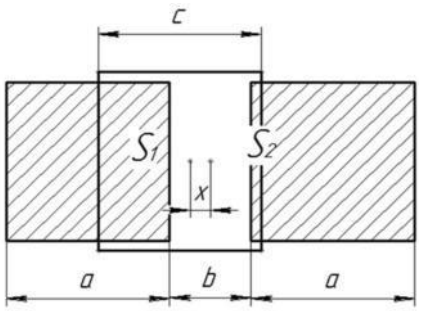


Рисунок 3.8 – Схема относительного положения и геометрические параметры размеров фотоприемников и диафрагмы

Исследовалось влияние на номинальную статическую характеристику следующих параметров:

- ширины штрих-марки *c*;

- расстояния между фотоприемниками *b*;

Были рассмотрены следующие сочетания:

1. При равенстве расстояния между фотоприемниками *b* ширине рабочей части фотоприемников *a* и изменении ширины изображения штрих-марки *c* от $c = a$ до $c = 2a$ (рисунок 3.9)

2. При равенстве ширины изображения штрих-марки ширине рабочей части фотоприемников $c = a$ и изменении расстояния между фотоприемниками *b* ширине от $b = 0{,}25a$, до $b = a$ (рисунок 3.10)

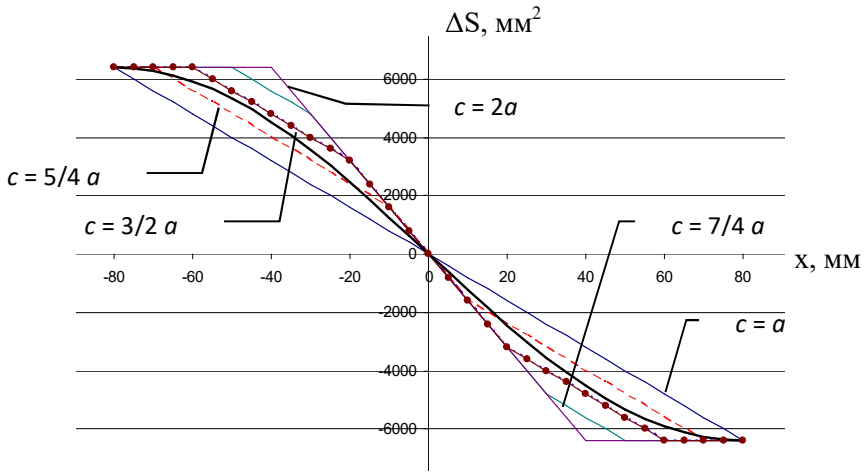


Рисунок 3.9 – Изменение номинальной статической характеристики при варьировании ширины изображения штрих-марки

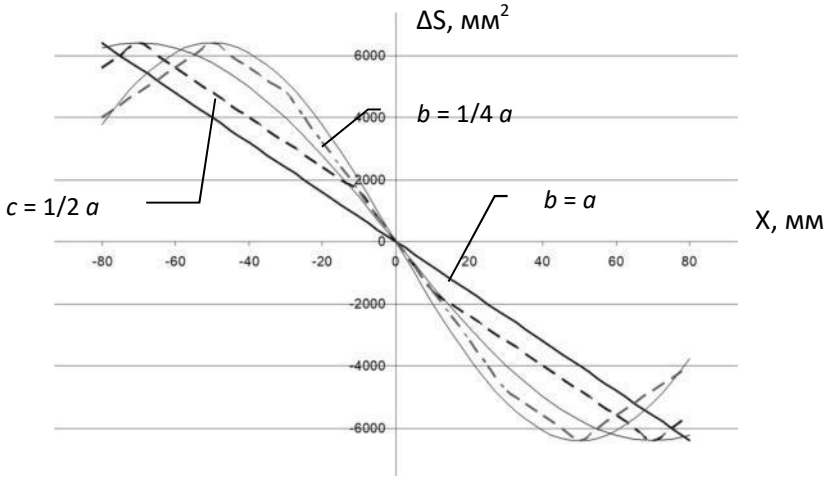


Рисунок 3.10 – Изменение номинальной статической характеристики при варьировании расстояния между фотоприемниками

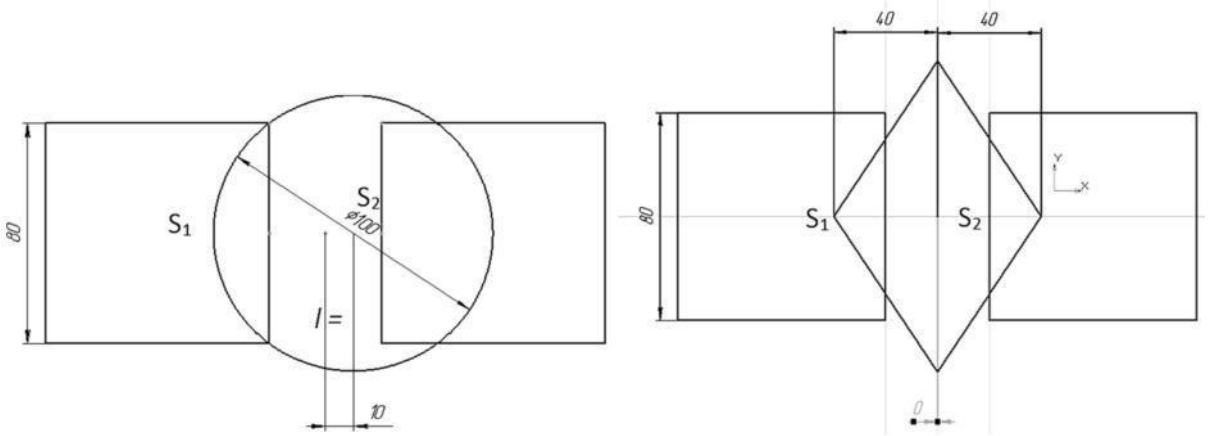
По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. В случае равенства расстояния b между фотоприемниками ширине a – рабочей части фотоприемников наиболее пригодными для практического использования представляются следующие соотношения ширины штрих-марки и рабочей части фотоприемника: $c = a$ и $c = 2a$. Они обеспечивают линейную функцию преобразования. Соотношение $c = 2a$ обеспечивает более высокую чувствительность, но меньший рабочий диапазон.

2. Изменение расстояния между фотоприемниками приводит к уменьшению рабочего диапазона. Данный параметр выбирается из конструктивных особенностей фотоприемников, а требуемая функция преобразования подбирается путем изменения ширины штрих-марки.

3. Полученные зависимости плохо аппроксимируются гармонической функцией, минимальная относительная погрешность для первой серии опытов составляет ≈ 30%, для второй ≈ 20%.

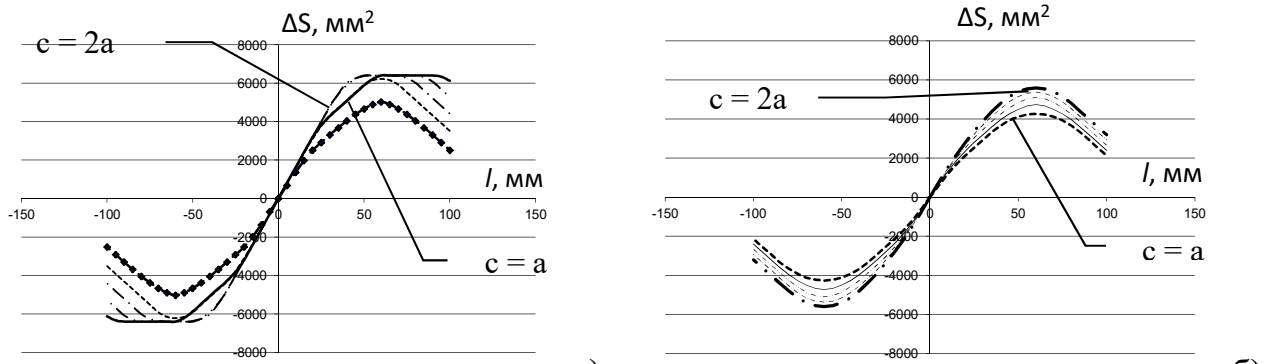
Кроме традиционно используемой прямоугольной формы штрих-марки рассмотрим применение марки в виде окружности и ромба [118]. На рисунке 3.11 представлены исследованные формы штрих-марки.



а) б)

Рисунок 3.11 - Квадратные фотоприёмники со штрих-маркой:
а) окружность, б) ромб

На рисунках 3.12…3.13 представлены номинальные статические характеристики при разных соотношениях размеров фотоприемников в форме прямоугольнпка, окружности и ромба.



а) б)

Рисунок 3.12 -– Статическая характеристика дифференциальной схемы с квадратными фотоприёмниками при изменение размеров штрих-марки в форме:
а) окружности, б) ромба

Анализ данных зависимостей показывает, что ромбовидная форма штрих марки приводит к меньшим изменениям траектории, чем прямоугольная или окружность.

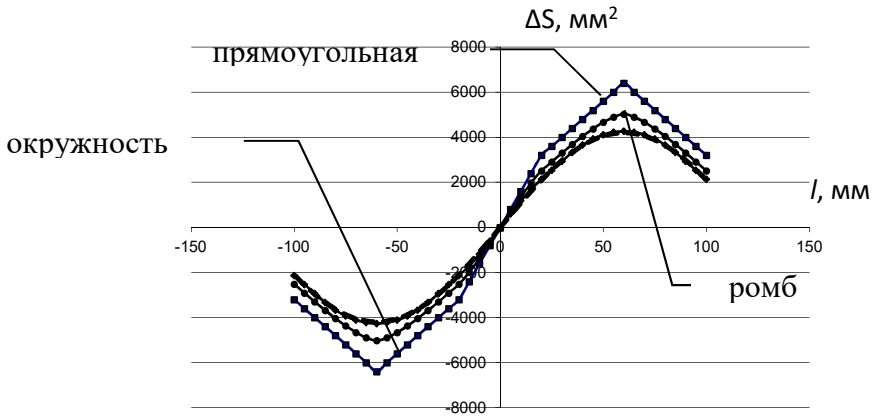


Рисунок 3.13 – Статическая характеристика дифференциальной схемы с квадратными фотоприёмниками при разных формах штрих марки

Анализ полученных зависимостей показывает их нелинейность. Все полученные зависимости симметричны. При переходе от прямоугольника к ромбу происходит сглаживание кривых и снижает погрешность их аппроксимации синусоидой с 20% до менее чем 9% у ромба, причем только около начала отсчета при малых абсолютных отклонениях. На всей остальной траектории эти отклонения не превышают 4%.

Использование ромбовидной штрих-марки позволит повысить точность как растровых измерительных преобразователях при интерполяции траектории, так и дальномерных, при изменении размеров пятна засветки.

Рассмотренные схемы получения измерительной информации являются основой для описания растровых измерительных преобразователей [100, 118].

При описании сигналов растровых измерительных преобразователей в литературе приводятся две формы выходных сигналов: треугольные и синусоидальные. Определим условия получения сигналов первой формы.

Рассмотрим идеальные координатные характеристики, определяемые соотношением площадей засветки позиционно-чувствительных фотоприемников [119]. Полагая идентичность свойств фотоприемников, общая форма сигнала определяется идеальными координатными характеристиками – соотношением площадей засветки позиционно-чувствительных фотоприемников.

Для исследования характера изменения формы измерительного сигнала используем следующие допущения (рисунок 3.14):

- форма штрихов растра прямоугольная,
- шаг растра *T* постоянен;
- ширина штрихов растра равна ½ шага (*b* = ½ T);
- форму диафрагмы считаем прямоугольной;
- в пределах рабочей площади засветки фотоприемников световая характеристика постоянна и идентична;
- ширина изображения штрих-марки, создаваемого диафрагмой равна ширине штрихов растра (*b* = *c*);
- величина d определяет сдвиг диафрагм фотоприемников относительно шага растра T (так, что *d* + *t* = *T*);
- границы изображения штрих марки явно выражены.

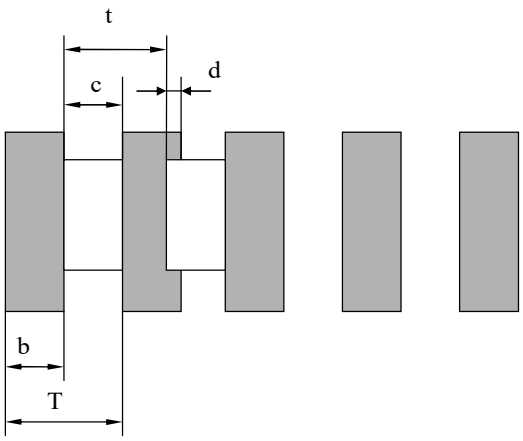


Рисунок 3.14 – Схема относительного положения и геометрические параметры размеров растра и диафрагмы

На рисунок 3.15 представлены изображения форма результирующего сигнала дифференциального фотоприемника.

Из анализа полученных результатов видно, что ширина засветки определяется величиной сдвига диафрагм фотоприемников *d.* Максимальная амплитуда сигнала наблюдается при *d* = 0,5. При 0<*d*<0,5 сигналы имеют трапециивидную форму, а их амплитуда изменяется от 0 до 1.

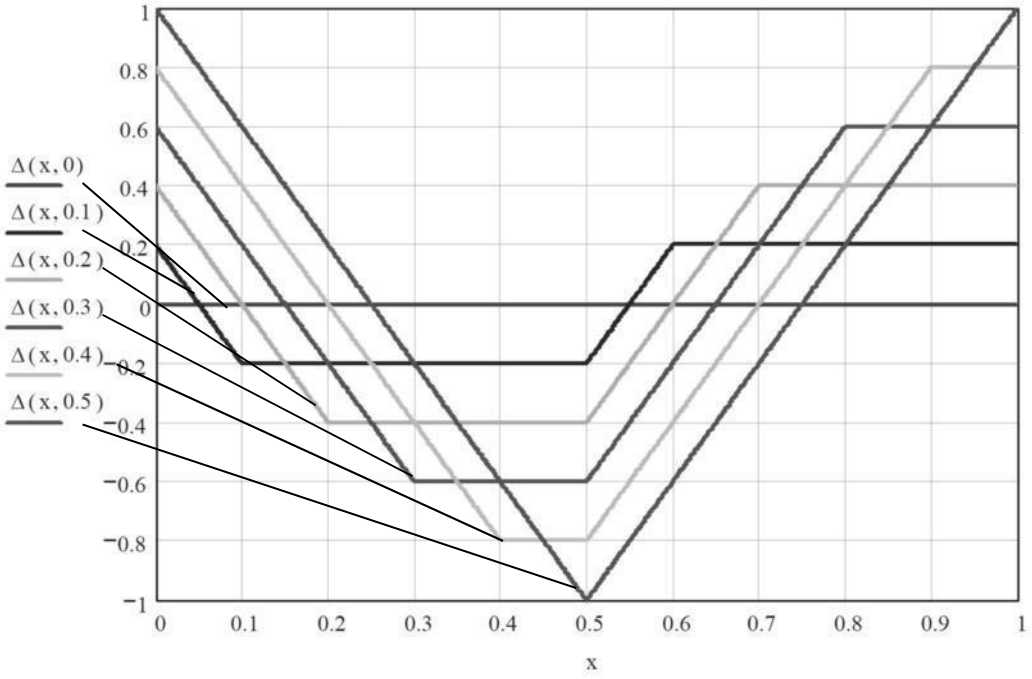


Рисунок 3.15 – Изображения формы результирующего сигнала дифференциального фотоприемника

В системах активного типа ранее рассмотренные погрешности дополняются погрешностями проецирования изображения штрих-марки. Источником этих погрешностей является изменение освещенности и яркости штрих-марки по направлению к приемному каналу и ее смещение по поверхности и зависит от ориентации поверхности измерения и расположения проецирующего и приемных каналов.

Для анализа этих погрешностей рассмотрим схему на рисунке 3.16 [205]. На рисунке показана схема передачи измерительной информации активного типа с симметричными по отношению к оси измерения - *OX* каналами. Проектирующий канал через объектив O_1 формирует изображение штрих-марки M'_{11} на поверхности контролируемой плоскости $P_{1,}$ формируя точку M_1. Объектив O_2 принимающего канала передает вторичное изображение M_1 на поверхность фотоприемника, обозначенного на схеме ФП. Угол φ_p между нормалью n_φ к поверхностью P_1 в точке измерения M_1 и осью ОХ определяет ориентацию контролируемой поверхности.

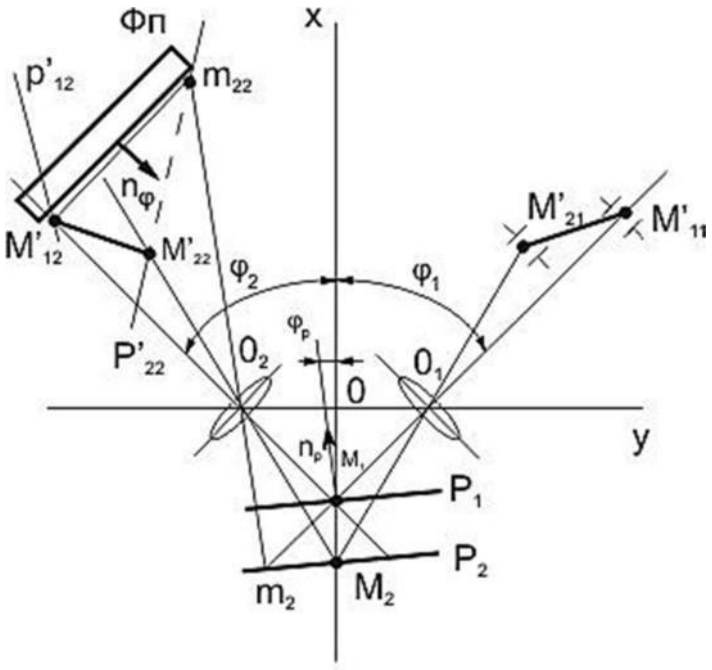


Рисунок 3.16 – Схема измерения активного типа с симметричными каналами

Процесс измерения можно разделить на два этапа: собственно перемещение поверхности измерения из положения P_1 в P_2 на расстояние, которое можно обозначить как L, и приведение сопряженных точек M'_{11}, M_1, M'_{12} в соответствие с новым положением контролируемой поверхности P_2.

Координаты сопряженных точек M'_{11}, M_1, M'_{12} связаны между собой зависимостями 2.1–2.3, рассмотренными в предыдущей главе. За начальное положение P_1. выберем такое, когда изображение штрих-марки M_1 находится на пересечении оптических осей передающего и приемного каналов. Изображение штрих-марки (рисунок 3.17а) с размерами сторон a (высота) и b (ширина) на поверхности P_2 принимает вид трапеции (рисунок 3.17б), высоту которой можно вычислить по (3.6):

$$a'_1 = a\frac{\cos\varepsilon_1}{V_{1M_1}\cos(\varphi_p - \varphi_1)} \tag{3.6}$$

а среднюю линию по зависимости (3.7):

$$b'_{1cp} = b\frac{1}{V_{1M_1}}, \tag{3.7}$$

где ε_1 – угол между нормалью к плоскости диафрагмы и оптической осью объектива O_1; φ_p – угол между нормалью к P_1 в точке M_1; V_{1M_1} — линейное увеличение объектива O_1 в точке M_1.

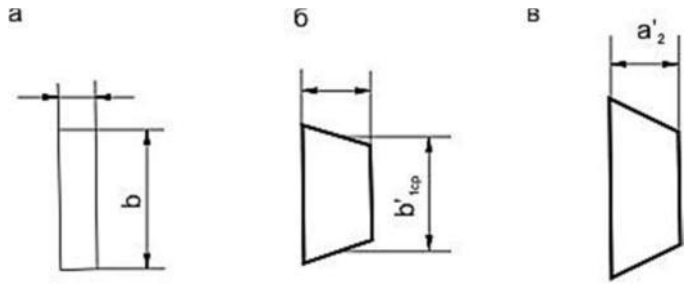


Рисунок 3.17 – Параметры проецируемой штрих-марки и ее изображений на объекте контроля и фотоприемнике

Вторичное изображение штрих марки на поверхности фотоприемника, имеет вид трапециевидной полоски с шириной $a_2' = a_1' V_{2M_1} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ (рисунок 3.17 в), расположенную в плоскости P_1', сопряженной с P_1. Поскольку полагаем, что вторичное изображение штрих-марки располагается на поверхности фотоприемника, то сигнал с фотоприемника считаем не зависящим от угла ε_2, то распределение освещенности на нем будет зависеть от угла его установки и от освещенности на поверхности P_1.

Ранее (на примере растровых преобразователей) было показано, что соотношения размеров фотоприемники и штрих-марки позволяет получать различную функцию преобразования

На точность определения величины перемещения плоскости P на расстояние L оказывают влияние погрешности определения величины перемещения по поверхности фотоприемника – $\Delta L'$, изменения размеров штрих-марки – Δf, Δb, $\Delta \varphi$. Для оценки влияния этих факторов возьмем частные производные зависимости $L=F(L')$ [196] по соответствующим параметрам.

Тогда коэффициенты влияния для погрешностей можно определить зависимостями (3.8)…(3.11):

$$K_{\Delta L'} = \frac{\partial L}{\partial L'} = \frac{1}{V_{M_1}^2 \dfrac{\cos\varphi}{\cos\varphi_1}}; \tag{3.8}$$

$$K_{\Delta f} = \frac{\partial L}{\partial f} = \frac{(V_{M_1} - V_M)(2 + V_{M_1} + V_M)}{V_{M_1} V_M} \operatorname{tg}\varphi \quad ; \tag{3.9}$$

$$K_{\Delta\varphi} = \frac{\partial L}{\partial \varphi} = \frac{(V_{M_1} - V_M)^2}{V_{M_1} V_M} \operatorname{tg}\varphi \qquad ; \tag{3.10}$$

$$K_{\Delta b} = \frac{\partial L}{\partial b} = \frac{(V_{M_1}^2 - V_M^2)}{V_{M_1} V_M} \operatorname{tg}\varphi \quad . \tag{3.11}$$

Если сравнить (3.8) с (3.9)…(3.11) позволяет получить следующие соотношения коэффициентов влияния (3.12):

$$\begin{aligned} K_{\Delta b} &= 10^{-2} V_M K_{\Delta L'}, \\ K_{\Delta\varphi} &= 10^{-2} V_M K_{\Delta L'}, \\ K_{\Delta f} &= 2 V_M K_{\Delta L'}. \end{aligned} \tag{3.12}$$

Как показано в [89], основной вклад вносится погрешностями фокусного расстояния – Δf и смещения изображения штрих-марки на расстояние $\Delta L'$. Коэффициент влияния $K_{\Delta L'}$ можно представить в виде (3.13):

$$K_{L'} = \left[\frac{X_M}{f} \cos\varphi - \left(1 - \frac{b \sin\varphi}{f_{oá}} \right) \right]^2 \cos\varphi' . \tag{3.13}$$

Анализируя выражение (3.13) можно сделать выводы, что коэффициент измерения рабочего расстояния $K_{L'}$ пропорционален квадрату отношения X_M / f, а влияние высоты штрих-марки b и угла расположения каналов φ значительно ниже.

В работе В. Н. Чуриловского [227] доказано, что «в сопряженных плоскостях P и P' остаются справедливыми формулы геометрической оптики. Из этого следует, что линейное увеличение для точек плоскости P' непостоянно».

Перспективные искажения изображения можно скорректировать, используя афинные преобразования пространства. Алгоритм компенсации перспективных

искажений для решения задач управления робототехническими устройствами предложен в статье [166]. После его использования возможно наложение на изображение обычной евклидовой метрики с целью быстрого вычисления реальных размеров и дистанций в пространстве предметов. Данный алгоритм реализует преобразование для «идеальной» оптической системы.

3.2 Коррекция искажений изображения пассивной оптико-электронной системы контроля геометрических параметров

В настоящее время для коррекций искажений изображения, связанного с взаимным расположением объекта контроля и цифровой камеры и учитывающая несовершенство оптической системы, используется процедура калибровки систем контроля. Сущность процедуры – установление эмпирическим путем связи между объектом с заранее известными характеристиками, так называемым тест-объектом, и его изображением, которая реализуется путем получение калибровочных коэффициентов, учитывающих влияние систематических искажений в передаточном тракте реальной оптической системы [129].

Изучением решения задачи калибровки камер занимались Амромин П. Д., Антипов И. Т., Быков, А. Л., Гельман Р.Н., Дубиновский В.Б., Лобанов А. Н., Погорелов В.В., *Ackermann F., Brown D.*, *Grun A.*, *Fitzgibbon A. W. ,Maybank S.J., Pratt W., Sturm P.F., Tsai R.Y.*, *Z. Zhang* и др. [10,12, 33, 68, 134, 181, 237, 238, 243, 263, 275, 280, 283].

3.2.1 Тест-объекты для калибровки систем контроля

Тест-объекты для калибровки 2D системы контроля представляют собой плоские объекты с массивом марок. Наиболее часто применяемые при калибровке типы тест-объектов представлены на рисунке 3.18.

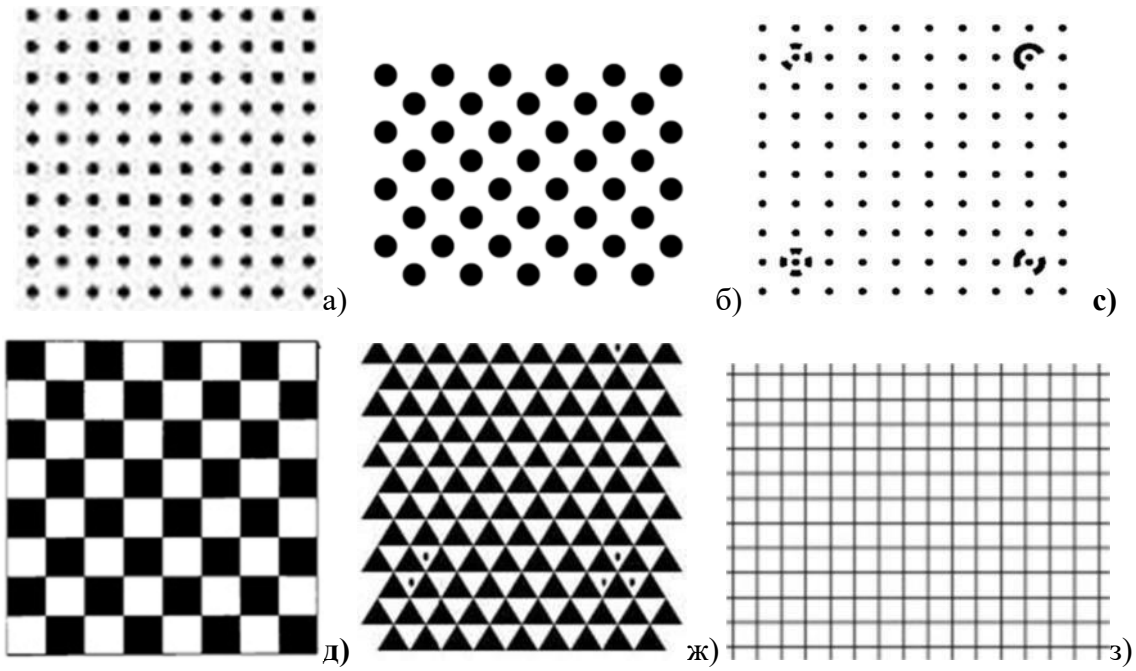


Рисунок 3.18 – Калибровочные тест-объекты

Каждый из приведенных типов тест-объектов имеет особенности применения.

Наиболее простыми и распространенными являются тест-объекты в виде массива марок в виде точек, которые применяется для корректировки перспективных искажений и дисторсии. Привязка осуществляется к энергетическим центрам марок. Существуют модификации этого типа тест-объекта, отличающиеся расположением и формой точек, которые могут располагаться рядами друг над другом (рисунок 3.18а) или быть смещены на половину шага (рисунок 3.18б) и иметь вид окружностей или прямоугольников. Дополнительно тест-объекты могут быть снабжены маркерами положения (рисунок 3.18д).

Тест-объект на рисунке 3.18д типа «шахматная доска» применяется в основном для коррекции дисторсии, привязка производится к углам квадратов.

Для калибровки систем контроля для определения углового положения объектов применяют тест-объект показанный на рисунке 3.18ж, в котором привязка осуществляется к углам треугольников.

В работе [206] предложено использовать разновидность «шахматной доски» – тест-объект в виде сетки из линий (рисунок 3.18ж), в котором привязка осуществляется к точкам пересечения линий. Данный тест-объект может применяться для коррекции перспективных искажений и дисторсии. Кроме того, достоинством данного тест-объекта является возможность его использования для адаптивной бинаризации, учитывающей размытие изображения в каждом из квадратов сетки.

Для установления максимально возможного соответствия изображения объекта нужно, чтобы марки тест-объекта заполняли всё поле снимка [243]. Количество элементов привязки в строке тест-объекта обычно выбирается не менее 6. Увеличение количества элементов привязки для традиционных полимиальных моделей более 20 в строке для стандартных тест-объектов практически не сказывается на точности.

В компании National Instruments для достижения наилучших результатов рекомендуют использовать тест-объекты, отвечающие следующим требованиям [257, 258]:

- смещение в направлениях x и y должно быть равным ($dx = dy$);
- точки должны покрывать всю необходимую рабочую зону;
- радиус точек на полученном изображении должен составлять от 6 до 10 пикселей;
- межцентровое расстояние между точками на полученном изображении должно составлять от 18 до 32 пикселей;
- минимальное расстояние между краями точек на полученном изображении должно составлять шесть пикселей.

Точность процедуры калибровки будет снижаться при погрешностях изготовления тест-объекта, из-за его деформации или дрейфа изображения при его формировании проектором.

3.2.2 Модели коррекции изображения при калибровке

Наиболее часто искажения описываются полиномами *H. Ebner*, Якоб-сона, Грюна, *D. Brown* и др. Исследованиями в нашей стране занимались Комиссаров, Д.В. Кожевников Д.А. и Фёдорцев Р.В. [84, 90].

Основой моделей коррекции обычно используют полиномиальную аппроксимирующую функцию преобразования (3.14):

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + \cdots + a_p y^m \\ y' &= b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + \cdots + b_p y^m \end{aligned} \quad (3.14)$$

где (x, *y)* — координаты точек эталонного снимка, *(x′,y′)* – соответствующие им координаты на текущем (сопоставляемом) снимке.

Все многообразие полиномов можно разделить на две группы, по принципу выделения составляющих погрешностей или ее отсутствию.

В первой группе интегральная систематическая погрешность точек сопоставляемого снимка *dx* и *dy* с эталонным *x и y*, описываемая полиномом, представлена как сумма членов отдельных систематических искажений (дисторсии, деформации и т. д.), например, в работе *D. Brown* (США) (3.15) [239]:

$$\begin{aligned} \delta x = a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + a_6 x^2 y + a_7 xy^2 + x/c(c_1 x^2 + c_2 xy \\ + c_3 y^2 + c_4 x^3 + c_5 x^2 y + c_6 xy^2 + c_7 y^3) + x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \\ + P_1(y^2 + 3x^2) + 2P_2 xy + \delta x_P + (\frac{x}{c})\delta c; \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \delta y = b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + b_6 x^2 y + b_7 xy^2 + y/c(c_1 x^2 + c_2 xy \\ + c_3 y^2 + c_4 x^3 + c_5 x^2 y + c_6 xy^2 + c_7 y^3) + x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2P_1 xy + \\ + P_2(x^2 + 3y^2) + \delta y_P + (\frac{y}{c})\delta c; \end{aligned}$$

где a_1-a_7, b_1-b_7 – коэффициенты, учитывающие некомпенсируемую деформацию и аномальную деформацию;

c_1-c_7 – коэффициенты, учитывающие кривизну и неплоскостиость пластины;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, учитывающие радиальную дисторсию;

P_1, P_2 – коэффициенты, учитывающие нецентрированную дисторсию.

Вторая идея состоит в том, что представление полиномом интегральной погрешности не связывается с отдельными видами искажений. Интегральная

погрешность описывается степенным многочленом, например, в работе *H. Ebner* (3.16) [242].

$$\begin{gathered}\delta x = b_1 x + b_2 y - b_3\left(2x^2 - \frac{4b^2}{3}\right) + b_4 xy + b_5\left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right) \\ + b_7 x\left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + b_9\left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right)y + b_{11}\left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right)\left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right); \\ \delta y = -b_1 x + b_2 y - b_3 xy - b_4\left(2y^2 - \frac{4b^2}{3}\right) + b_6\left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right) \\ + b_8\left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right)y + b_{10} x\left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right) + b_{12}\left(x^2 - \frac{2b^2}{3}\right)\left(y^2 - \frac{2b^2}{3}\right).\end{gathered} \tag{3.16}$$

где b_1-b_{12} – поправочные коэффициенты (поправочный член).

Этот способ представления дополнительных параметров, вероятно, более правильный, так как не связан с определенными видами искажений. Полиномы же первого вида могут не учесть искажений, которые еще не изучены или просто не описаны математически.

На данный момент нет рекомендаций по выбору длины полинома [113]. При увеличении количества членов полинома детализируется описание систематических искажений, но при этом возрастает вычислительная нагрузка ЭВМ. Выбор длины и вида полинома должен быть обусловлен исходными данными и доступными вычислительными возможностями.

Многие программные комплексы имеют встроенные утилиты калибровки. Рассмотрим наиболее часто используемые модели калибровки на примере ПО *National Instruments LabVIEW (*модуль машинного зрения *NI Vision)*, который имеет в своем составе утилиту *Calibration Training* компании *National Instruments* в которой выделено 5 способов (таблица 3.1).

Первые два относится к рассмотрению «идеальных» систем, подчиняющихся законам геометрической оптики и не имеющих собственных искажений. При простой калибровке (*Simple Calibration*) производится масштабирование изображения по вертикали и горизонтали путем задания масштабных коэффициентов.

Таблица 3.2 – Способы калибровки в *Calibration Training*

Название	Область применения
Простая калибровка (*Simple Calibration*)	величины искажений изображения достаточно малы по отношению к величине допуска измеряемого параметра и объект расположен перпендикулярно оптической оси достаточно проведения простой калибровки
Калибровка перспективных искажений (*Perspective Calibration*)	существенные при условии достаточно малой величины искажений изображения оптической системой по отношению к величине допуска измеряемого параметра
Калибровка дисторсии оптической системы (Distortion Modeling)	существенные искажений в оптической системе цифровой камеры и отклонения от перпендикулярности оптической оси.
Модель камеры (*Camera Modeling*)	Пространственная калибровка камеры для использования в пассивных и активных 3D системах контроля
Microplane Calibration	калибровка нелинейных рабочих поверхностей

Калибровка перспективных искажений *Perspective Calibration* требует использования не менее 4 пикселей в пространстве образа. Дополнительные сопряженные точки могут повысить точность коррекции [21].

Калибровки 3-5 (*Distortion Modeling*, *Camera Modeling*, *Microplane Calibration)* требуют наличия тест-объекта.

Для коррекции радиальной и тангенциальной дисторсии в *Vision Development Module* применяются полиномиальная и тангенциальная модели, разработанные на основе исследований *D. Brown*.

Полиномиальная модель коррекции дисторсии реализована в двух вариантах: с одним (*K1*) или с тремя коэффициентами (K_1, K_2, K_3). Модель может быть представлена зависимостями (3.17):

$$x_{corrected} = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8 + K_5r^{10} + K_nr^{(n \times 2)})$$
$$y_{corrected} = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8 + K_5r^{10} + K_nr^{(n \times 2)}) \quad (3.17)$$

Тангенциальная модель коррекции дисторсии использует два параметра P_1 и P_2, чтобы охарактеризовать тангенциальные искажения. Тангенциальная модель дисторсии может быть представлена в виде (3.18):

$$x_{corrected} = x + [2P_1xy + P_2(r^2 + 2x^2)]$$
$$y_{corrected} = y + [P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy] \quad . \quad (3.18)$$

В работе [188] проведены исследования по оценке качества компенсации погрешностей стандартными алгоритмами *Distortion Modeling* и влиянии изменений положения объекта контроля относительно цифровой камеры с целью оценки возможности использования существующих методов корректировки искажений оптической части систем технического зрения в системах контроля геометрических параметров. Для исследования используется специально разработанная установка, позволяющая производить позиционирование объекта контроля с погрешностью менее ±0,15 мм. На рисунке 3.19 показаны графики погрешностей при полиномиальной и тангенциальной калибровке с одним коэффициентом *K1*.

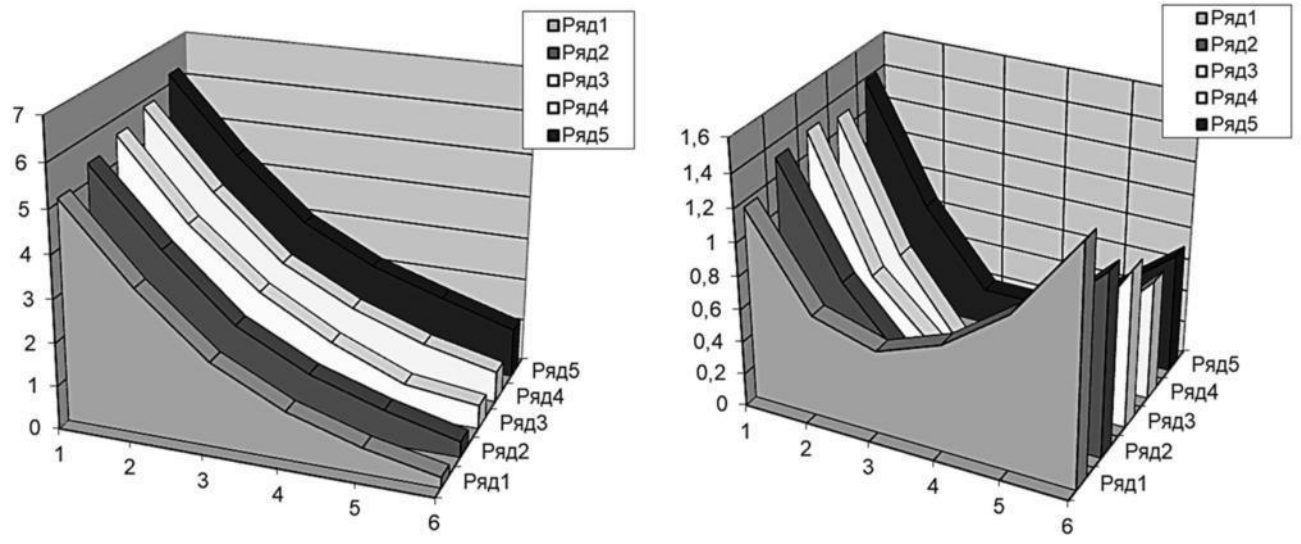
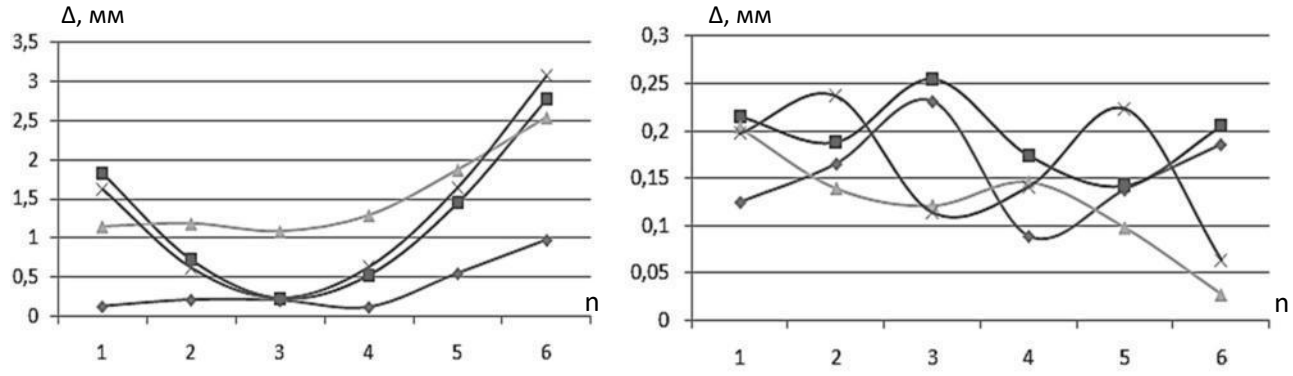


Рисунок 3.19 – Графики погрешностей при применении тангенциальной *K1* и полиномиальной *K1* моделей коррекции

При параллельном расположении тест-объекта относительно матрицы камеры (перпендикулярно оптической оси с отклонением не более ±0,5°) все четыре модели коррекции показали достаточно близкие результаты, как при расчете значений дисторсии, так и при компенсации. Примеры графического отображения для этих зависимостей представлены на рисунке 3.20 соответственно. Маркерами на рисунке обозначены: ♦ – полиномиальная модель коррекции с одним коэффициентом; ■ – полиномиальная модель коррекции с тремя коэффициентами; ▲ – тангенциальная модель коррекции с одним коэффициентом; **x** – тангенциальная модель коррекции с тремя коэффициентами.

По оси ординат отложены рассчитанные значения смещений опорных точек тестового объекта в медианной плоскости (Ряд 3 рисунок 3.20), номера которых отложены на оси абсцисс.



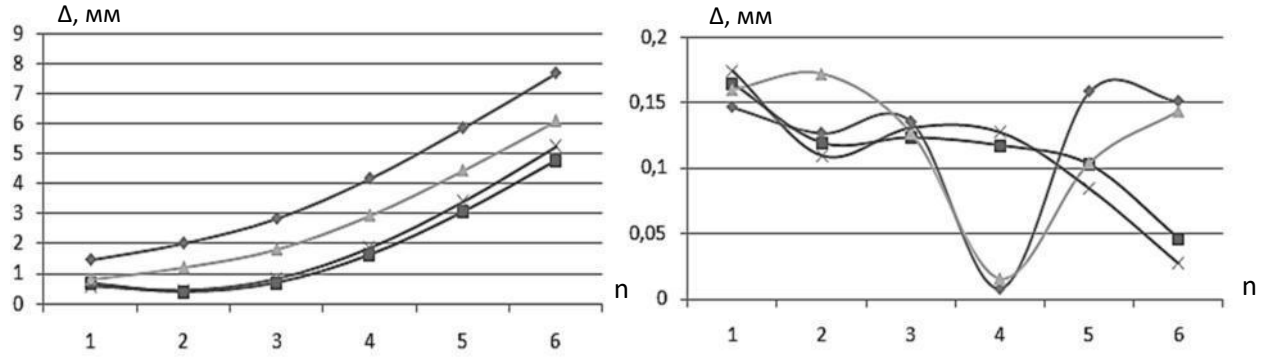
а) б)

Рисунок 3.20 – Сравнительный анализ моделей коррекции при положении объекта контроля перпендикулярно оптической оси:

а) - рассчитанных и б) – скорректированных значений

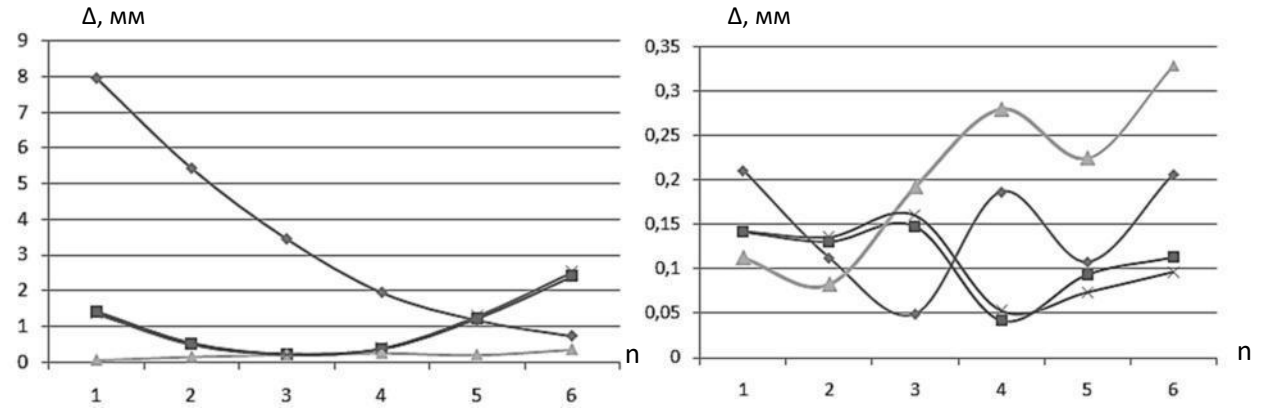
При отклонении от параллельности на пять градусов полиномиальная модель показала большую чувствительность к повороту изображения тест-объекта (рисунок 3.21), данная модель учитывает угол отклонения при расчете значений для коррекции. При этом результаты процедуры коррекции были как минимум не хуже, а в некоторых случаях, как представлено на рисунке 3.22, и лучше. Таким образом, исследования показали, что до настоящего времени не

сформулированы оптимальные параметры калибровки камеры по тест-объекту. Выбор тест-объекта скорее палеотивен, чем имеет строго формализованную процедуру.



а) б)

Рисунок 3.21 – Сравнительный анализ моделей коррекции при повороте изображений: а) - рассчитанных и б) - скорректированных значений



а) б)

Рисунок 3.22 – Сравнительный анализ моделей коррекции при повороте изображений относительно оптической оси: а) рассчитанных
б) скорректированных значений

Однозначных выводов о преимуществах полиномиальной или тангенциальной моделей коррекции дисторсии и использованию полиномов с одним или тремя коэффициентами, реализованных компанией *National Instruments*, сделать невозможно. Результаты сравнения методов калибровки показывают возможность оценки геометрических параметров изделия с погрешностью, не превышающей двух пикселей (или 0,18 мм для объектов

размером 100 мм и разрешении камеры 1 Мп) при использовании нормальных и длиннофокусных объективов только при допустимых отклонениях тест-объекта от условия перпендикулярности оптической оси в пределах пяти градусов. Нарушение этого условия приводит увеличению погрешностей до 5 px.

В результате коррекции искажений с применением данных моделей требуется обрезание (кадрирование) изогнутых краев исправленного кадра, это влияет на разрешение изображения. Коррекция перераспределяет разрешение изображения: при подушкообразной дисторсии после коррекции может подняться резкость по краям кадра по отношению к центру. При исправлении бочкообразной дисторсии — наоборот, резкость по краям кадра может упасть.

Использование данных методов калибровки обеспечивает эквивалентную погрешность определения размеров от одного до трех пикселей в зависимости от разрешения камеры. Коррекция перераспределяет разрешение изображения при подушкообразной дисторсии. После коррекции может подняться резкость по краям кадра по отношению к центру. При исправлении бочкообразной дисторсии, наоборот, резкость по краям кадра может упасть. Для короткофокусной оптики, по краям поля зрения, погрешности могут доходить до 7 px.

3.3 Коррекция искажений, основанная на использовании алгоритма дискретизации пространства изображения

3.3.1 Методика коррекции

Разработанная методика коррекции основана на использовании алгоритма дискретизации пространства изображения (ДПИ) [6], и позволяет скорректировать перспективные искажения, вносимые при неправильном позиционировании объекта контроля относительно оптической системой камеры технического зрения. Методика инвариантна к природе искажений и сохраняет разрешения исходного изображения. Целью разработки данной методики

являлось повышение точности коррекции сильных искажений изображения, особенно характерного для короткофокусных объективов цифровых камер.

Исходное изображение фрагмента тест-объекта в виде сетки взаимно перпендикулярных линий (как на рисунке 3.18з) представлено на рисунке 3.23, где тонкими линиями показана матрица цифровой камеры. То есть отдельная ячейка сетки тонких линий, соответствует фоточувствительной ячейке матрицы – пикселю. Жирными линиями показаны оси линий тест-объекта.

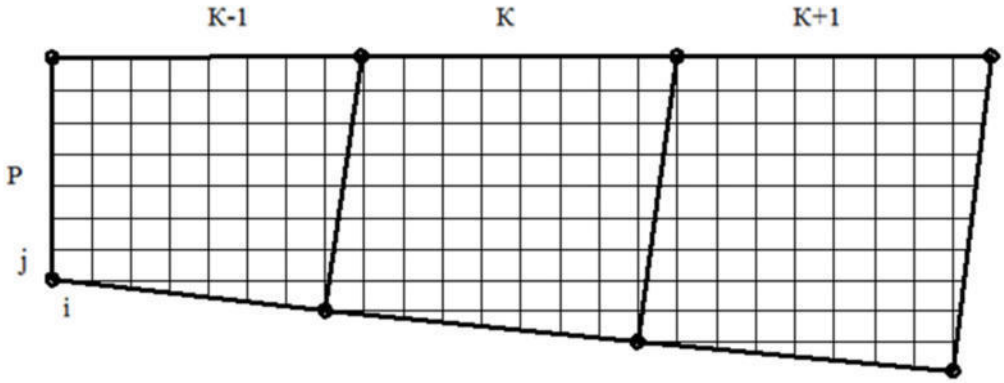


Рисунок 3.23 – Исходное изображение фрагмента тест-объекта

На рисунке 3.23. 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).

Особенностью разработанного алгоритма коррекции искажений (для компенсации с погрешностью не более ±1px) является привязка сетки тест-объекта, к точке пересечения границ пикселов. В большинстве существующих методик калибровки привязка осуществляется к середине марки (точечные тест-объекты) или пересечению (шахматная доска).

Буквами n и m обозначим пиксели в каждой ячейке тест-объекта. Таким образом, каждая ячейка тест-объекта разбивается (по количеству попавших в нее пикселей) на N интервалов по горизонтали и M – вертикали. Закономерность дискретизации ячейки тест-объекта является основой для восстановления изображения.

Размеры вертикальной и горизонтальной границ ячеек тест-объекта, определенные в долях пикселя, определяются выражениями (3.19):

$$R_K = \sqrt{(N^K)^2 + (M^K)^2} \quad , \qquad R_P = \sqrt{(N^P)^2 + (M^P)^2} \quad , \tag{3.19}$$

где N^P, N^K, M^P, M^K – размеры в пикселях ячеек K и P

Изменения размеров горизонтальных и вертикальных ячеек изображения тест-объекта можно определить зависимостями (3.20) и (3.21):

$$\delta_{K+1} = \frac{\Delta_{K+1}}{R_K}, \ \delta_{K-1} = \frac{\Delta_{K-1}}{R_K} \quad , \tag{3.20}$$

$$\delta_{P+1} = \frac{\Delta_{P+1}}{R_P}, \ \delta_{P-1} = \frac{\Delta_{P-1}}{R_P} \quad . \tag{3.21}$$

Для коррекции изображения нужно переразбить ячейки сетки тест-объекта в соответствии с полученными значениями 3.20 и 3.21.

Координаты границы i-го и j-го восстановленного пикселя в текущей ячейке вычисляются по формулам (3.22) и (3.33):

$$X_i^K = i \cdot \frac{L_я - \left(1 - \frac{\delta_{K+1} - \delta_{K-1}}{2}\right)}{N} + \frac{L_я \cdot \frac{\delta_{K+1} - \delta_{K-1}}{2}}{\sum_{i=1}^{N} i} \cdot \sum_{i=1}^{n} i \tag{3.22}$$

$$Y_j^P = j \cdot \frac{L_я - \left(1 - \frac{\delta_{P+1} - \delta_{P-1}}{2}\right)}{M} + \frac{L_я \cdot \frac{\delta_{P+1} - \delta_{P-1}}{2}}{\sum_{j=1}^{M} j} \cdot \sum_{j=1}^{m} j \ , \tag{3.23}$$

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, n, m - текущее значение координаты i-го и j-го пикселя.

На рисунке 3.24 представлено скорректированное изображение тест-объекта.

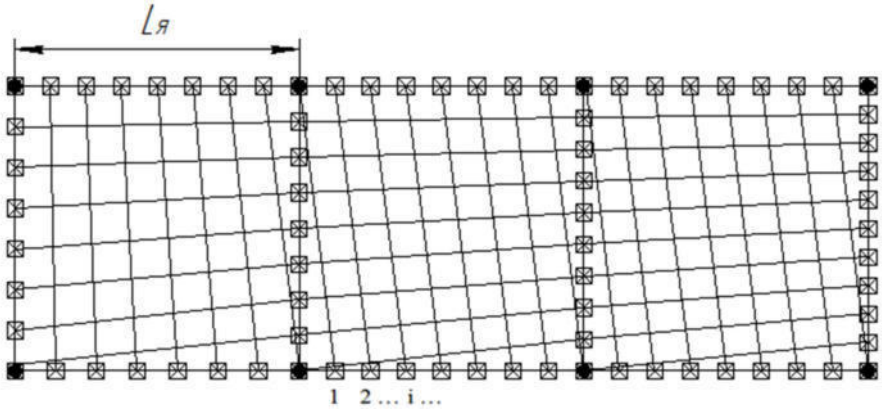


Рисунок 3.24 – Изображение тест-объекта после коррекции

Алгоритм ДПИ метода калибровки представлен на рисунке 3.25.

Рисунок 3.25 – Алгоритм разработанного способа калибровки дискретизации пространства изображения

Использование данной модели возможно не только для фиксированного положения объектов, но и при изменении его пространственного положения в

заданной области. Данная методика может быть использована и для пространственной калибровки цифровых камер.

Наглядное представление влияния не фиксированного положения объекта контроля и сопряженного с ним тест-объекта на формирование его изображения на матрице цифровой камеры дает 3D модель, показывающая разницу получаемого изображения (рисунок 3.26).

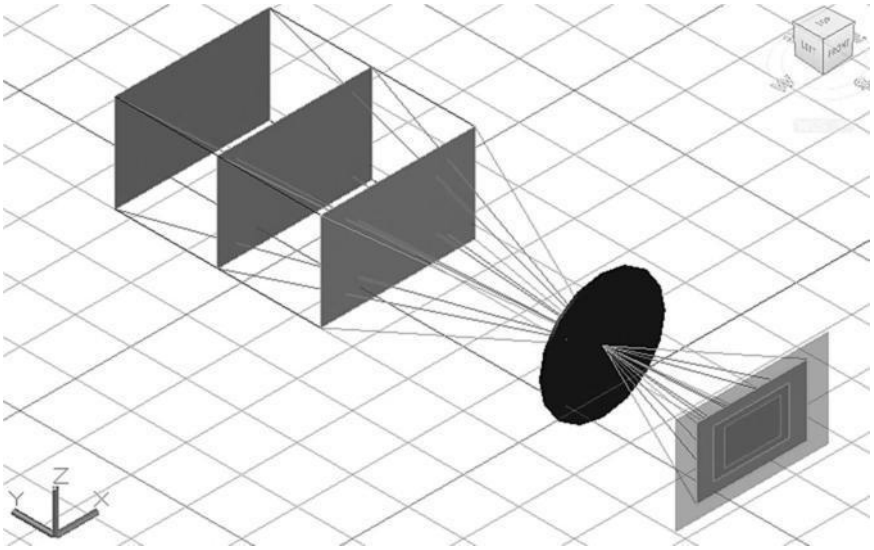


Рисунок 3.26 – Изометрия нестационарного положения калибровочной сетки

Достоинством разработанной модели коррекции искажений, основанной на использовании алгоритма ДПИ, является возможность обеспечения заданной точности калибровки во всем поле зрения.

Недостатки разработанной методики – значительно большая чувствительность к точности изготовления тест-объекта, распознавания его базовых точек и прямого соответствия между пикселями исходного и трансформированного изображения, что обуславливает необходимость передикретизации для дальнейшей обработки полученного изображения.

Первый недостаток возможно компенсировать, рассматривая характер изменения количества пикселей в соседних ячейках, используя нелинейную функцию.

Второй недостаток можно компенсировать, пересмотрев методику передискретизации пространства, например, с использование морфинга изображений.

3.3.2 Реализация методики ДПИ калибровки на основе операции морфинга изображений

Рассмотрим возможность реализации предложенной методики ДПИ калибровки на основе операции морфинга изображений с использованием *warping* – фильтра. Настройка этого фильтра по тест-объекту должна проводится таким образом, что пиксели, характеризующие опорные точки калибровочной сетки из текущих точек на деформированном изображении смещались к исходным значениям координат тест-объекта [235, 273]. Применение данной коррекции к изображениям изделий позволит восстановить прямое подобие изображения объекту.

ImageWarping имеет следующие разновидности:

- *Mesh Image Warping* (по сетке),
- *Feature-Based Image warping* (по особенности).

Для реализации предложенной методики калибровки использовался алгоритм *Mesh Warping*, который соотносит особенности изображения с сетками в исходном изображении и конечном изображении.

Деформирование может быть выполнено либо в *x, y* координатах, или в *U, V* координатах, или в обоих.

В *Mesh Warping* алгоритм принимает: исходное изображение, изображение назначения и 2*D* массивов координат (рисунок 3.27).

Основными преимуществами *Mesh Warping* являются: быстрая и интуитивно понятная методика преобразования; наличие эффективных алгоритмов вычисления отображения каждого пикселя из управляющей сетки. В

качестве недостатка можно указать необходимость указания количества точек, используемых для морфинга, заранее.

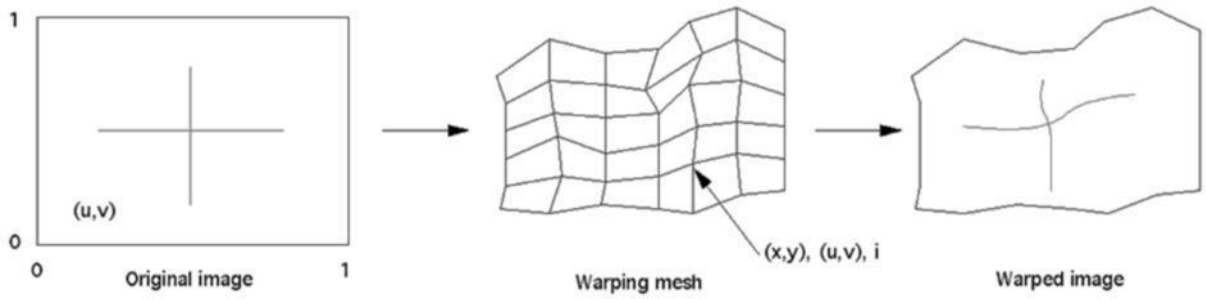


Рисунок 3.27 – Наглядное представление алгоритма реализации преобразования *Mesh Warping*

Сплайны соединяют точки для образования исходного, промежуточного и конечного положения точек.

На рисунке 3.28 показано преобразование изображения тест-объекта, на котором черные окружности характеризуют исходное положение опорных точек, точки обозначенные х-маркером – описывают промежуточное положение, а белые окружность – конечное положение опорных точек. В качестве опорных точек выбран центр пересечения линий тест-объекта в виде сетки.

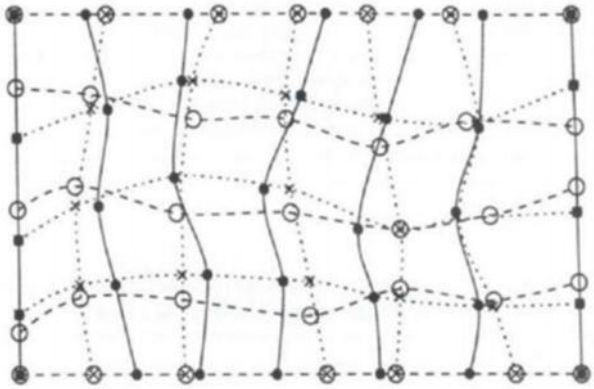


Рисунок 3.28 – Преобразование изображения тест-объекта с использованием технологии преобразования изображения *Warping Techniques*

Алгоритм *Single Line Pair* использует линии для того, чтобы связать функции в исходном изображении с особенностями в конечном изображении (рисунок 3.29).

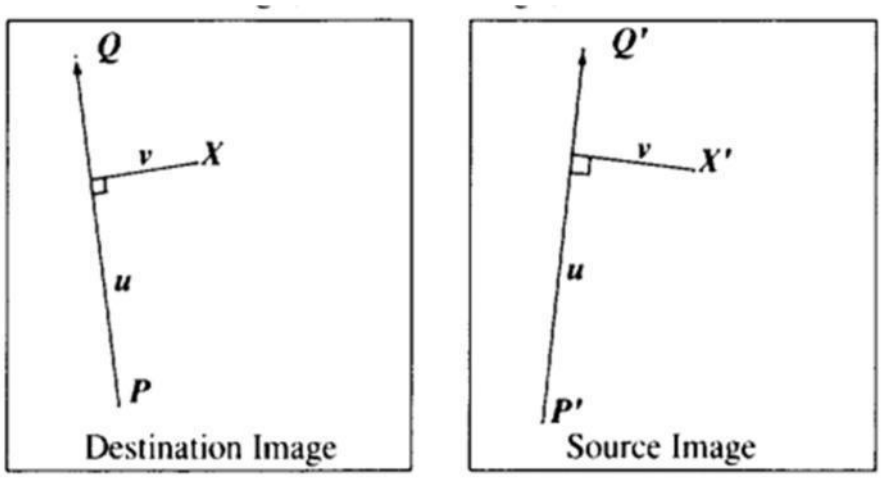


Рисунок 3.29 - Алгоритм *Single Line Pair*

Координаты *u, v и X′* вычисляем по формулам (3.24) … (3.26) [235]:

$$\mathrm{u} = \frac{(X-P)\cdot(Q-P)}{||Q-P||^2} \quad , \tag{3.24}$$

$$v = \frac{(X-P)\cdot Perpendicular(Q-P)}{||Q-P||} \quad , \tag{3.25}$$

$$\mathrm{X}' = P' + u \cdot (Q' - P') + \frac{v \cdot Perpendicular\,(Q'-P')}{||Q'-P'||} \quad , \tag{3.26}$$

где: *Perpendicular()* – функция, возвращающая вектор, перпендикулярный исходному и имеющий ту же длину, что и входной вектор; u – позиция вдоль линии, значение $0 < \mathrm{u} < 1$, когда пиксель двигается из точки *P* в точку *Q*, и $\mathrm{u} < 0$ или $\mathrm{u} > 1$, если пиксель двигается вне диапазона; v – перпендикулярное расстояние от линии; *X* – координата в конечном изображении, *X′* – соответствующая *X* координата в исходном изображении; *PQ* – отрезок в конечном изображении и *P′Q′* – соответствующий *PQ* отрезок в исходном изображении; *V* – длина перпендикуляра в пикселях.

На данный момент наиболее перспективным методами компенсации искажений являются методы, основанные на применении специальных тест-объектов для проведения операции калибровки.

Для реализации предложенной методики разработано программное обеспечение [198]. Изображение окон программы соответствующих исходному и

обработанному изображению представлено для объектива с f=12 мм на рисунке 3.30.

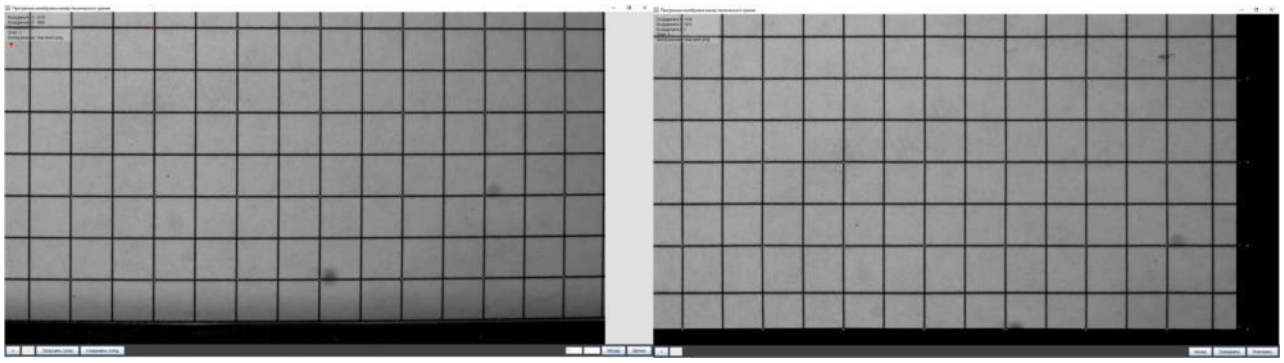


Рисунок 3.30 – Начальное окно программы и окна соответствующие исходному и обработанному изображению

На рисунке 3.31 показан результат обработки в увеличенном виде.

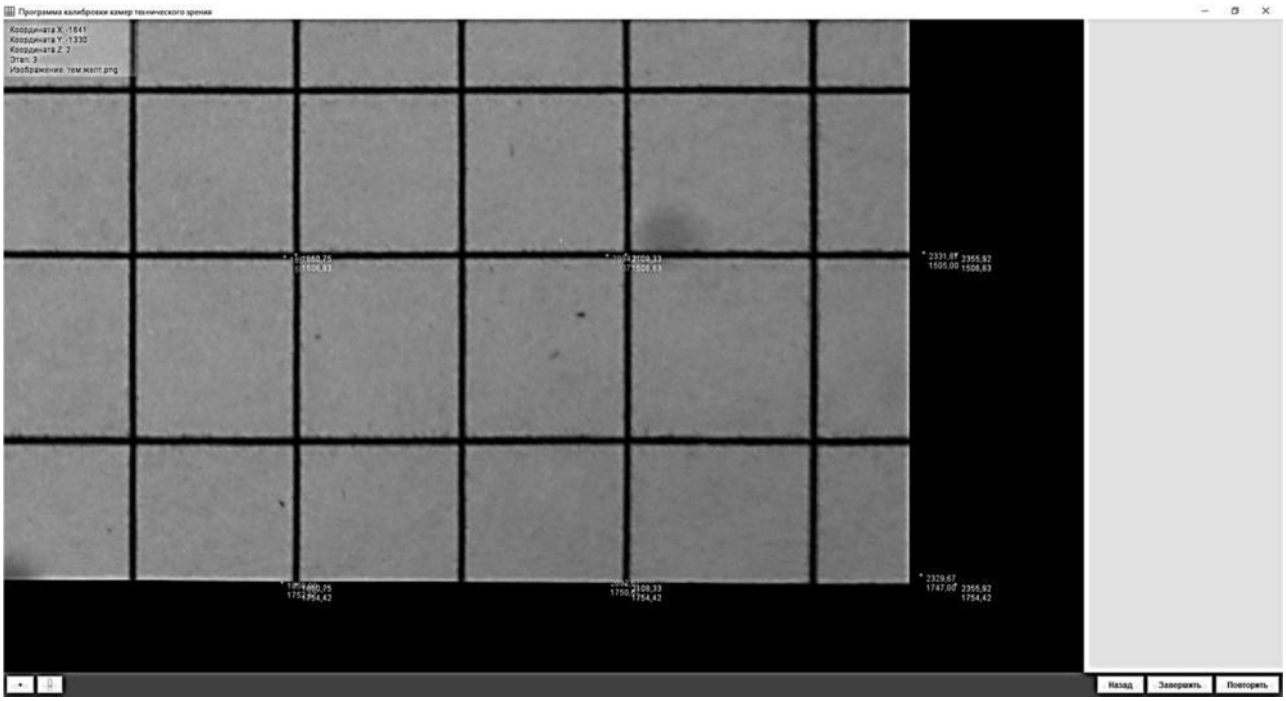


Рисунок 3.31 – Результат обработки в увеличенном виде

Для наглядности результатов коррекции на рисунке 3.32 показана работа программы при использовании тест-объекта с малым количеством опорных точек и сильными искажениями изображения.

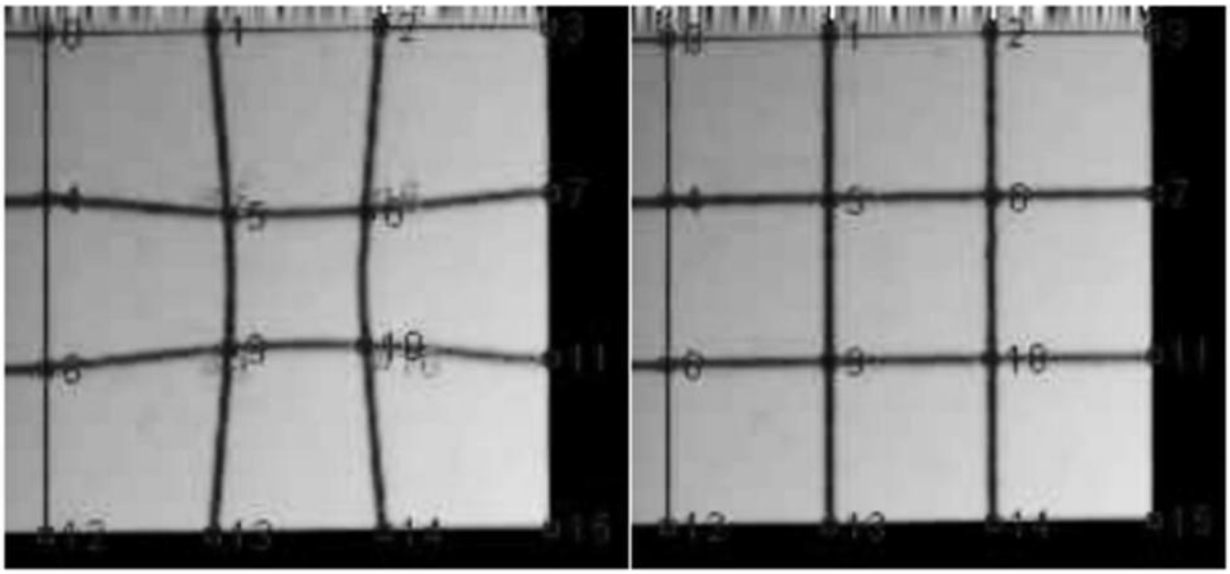


Рисунок 3.32 – Изображение сетки с использованием Image Warping

3.4 Компенсация погрешностей фоновой засветки

Основной способ компенсации погрешностей фоновой засветки — это вычитание фоновой составляющей из текущего кадра. Для этого сначала берется изображение фона, а затем выполняется построение маски активности от разности фона и текущего кадра. Основные методы компенсации фоновой составляющей описаны в работах [7, 228] и сведены в таблице 3.3.

Метод попиксельного вычитания фона и метод усреднения фона могут использоваться в процессе контроля геометрических параметров неподвижных и квазинеподвижных объектов. Алгоритмы данных методов представлены на рисунках 3.33 и 3.34.

Уменьшение погрешностей фоновой засветки и отражения от поверхности объекта возможно за счет применения более совершенных методик выделения объектов контроля на изображении [176].

Таблица 3.3 – Методы вычитания фона

Метод	Суть метода	Достоинства метода	Недостатки метода
Попиксельный метод вычитания фона	Сохраняет первый кадр последовательности, а для каждого следующего кадра применяет порог к модулю разности текущего и сохраненного изображения по каждому пикселю: $\|Bij-Iij\|\geq\delta$, i=0...w, j=0...h где w и h — ширина и высота изображения.	- простота реализации; - высокая производительность; -изменяя параметр порога можно регулировать уровни ошибок.	- высокие требования к стабильности фона; - одинаковое разрешение изображений фона и объекта.
Метод усредненного фона	Фон моделируется усреднением последовательности n кадров. Реализация метода включает следующие этапы: – Обучение. Первые n кадров используются для обучения. По результатам определяется усредненный фон. – Обработка. Обработанный кадр получаем вычитанием усредненного фона из текущего кадра.	- метод адаптирован к медленному изменению фона.	- требуется процедура обучения; - точность алгоритма зависит от частоты кадров; - при постоянном пороге всех пикселей затруднено выделение нескольких объектов.
Метод низкочастотного фильтра рекурсивного сглаживания	Метод предполагает плавное изменение модели фона с каждым кадром путем применения низкочастотного фильтра рекурсивного сглаживания. Реализация метода предполагает «смешивание» текущего кадра с моделью фона с коэффициентом α. Затем к разности фона и кадра применяется пороговый фильтр.	-метод очень прост в реализации; -имеет высокую производительность; - применим в условиях плавного изменения освещения.	- необходимо выбирать коэффициент α, обеспечивая компромисс между вероятностью обнаружения и формой обнаруженного объекта - не применяется для контроля статичных объектов.

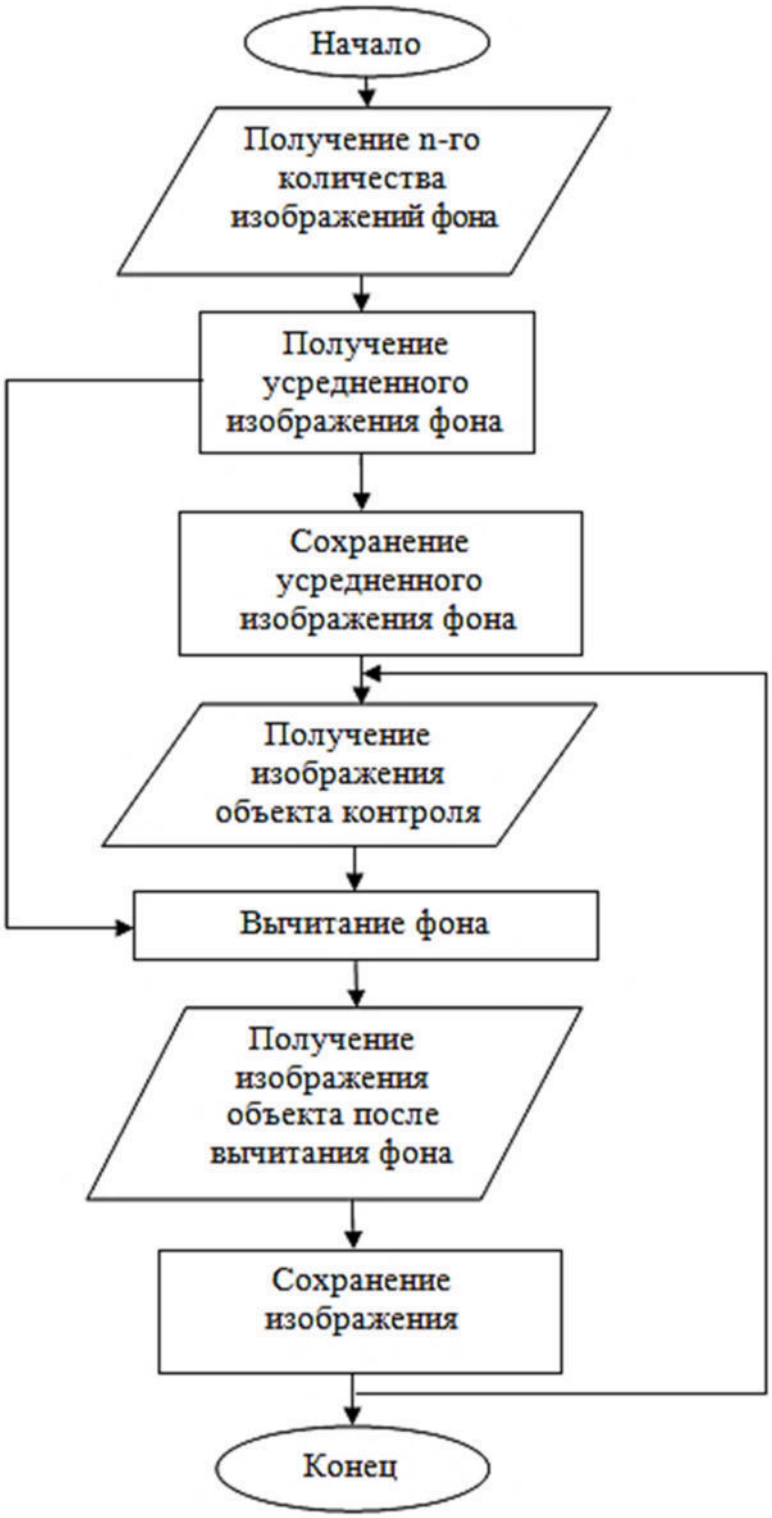


Рисунок 3.33 – Алгоритм процедуры усреднения фона

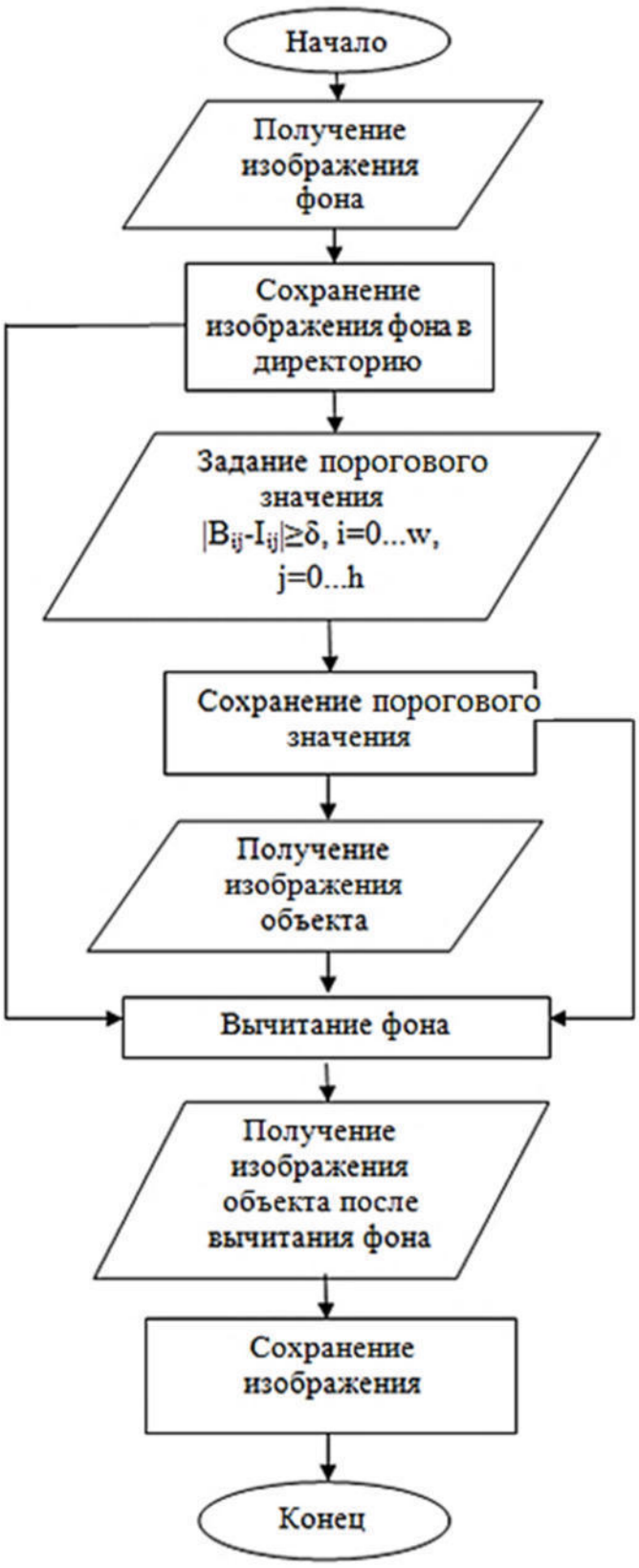


Рисунок 3.34 – Алгоритм процедуры попиксельного вычитания фона

3.5 Оценка погрешностей рефракции оптической среды

Основой для оценки влияния рефракции среды в тракте передачи измерительной информации вследствие температурной неоднородности являются исследования в области геодезии, которые связаны с решением задач тригонометрического нивилирования [66, 67, 150, 255]. Исследования влияния оптической среды на погрешность измерения геометрических размеров в условиях исследования вертикальной рефракции проводилась в основном для решения геодезических задач.

Для оценки погрешностей предложено использовать коэффициенты рефракции, вычисляемой по формуле (3.27) предложенной в [78]:

$$k = 1 - \frac{R}{D}\ \frac{(z_1 - z_2) - 18}{\rho} \quad , \tag{3.27}$$

где D – наклонное расстояние; z_1 и z_2 – зенитное расстояние в 1 и 2 точках цели, R – радиус Земли (6 371 км).

И возможности на основании той же работы вычисления рефракционной погрешности из формулы (3.28):

$$k = 1 - \frac{2R}{D^2}\ (h - D\ \cos z)\ , \tag{3.28}$$

где h – превышение из геометрического нивелирования.

Эти зависимости позволяют оценить угловое отклонение хода лучей на значительных расстояниях и относительно небольших градиентах температур.

Для исследования влияния рефракции от тепловых потоков при обработке резаньем была выбрана концепция оценки величины смещения координат точек тест-объекта. Исследования, проведенные в работе [80], носили качественных характер и показали значимость отклонений при контроле объектов вблизи источников нагрева с T=300…400°C. Результаты оценки погрешности представлены в таблице 3.4. Из таблицы видно, что максимальное значение погрешности может достигать 0,5% при среднем отклонении в 0,2% при высокой интенсивности теплового потока, что является существенной погрешностью для оценки геометрии изделий в машиностроении.

Таблица 3.4 – Погрешности определения положения опорных точек тест-объекта

Погрешность, px/ %	Нагрев		
	минимальный	средний	максимальный
Максимальная	2,76/ 0,12	3,85/ 0,17	9,97/ 0,45
Средняя	0,93/ 0,04	2,03/ 0, 09	4,22/ 0,19

Программа для оценки величины смещения опорных точек тест-объекта разработана в среде *VisionBuilder AI* (рисунок 3.35).

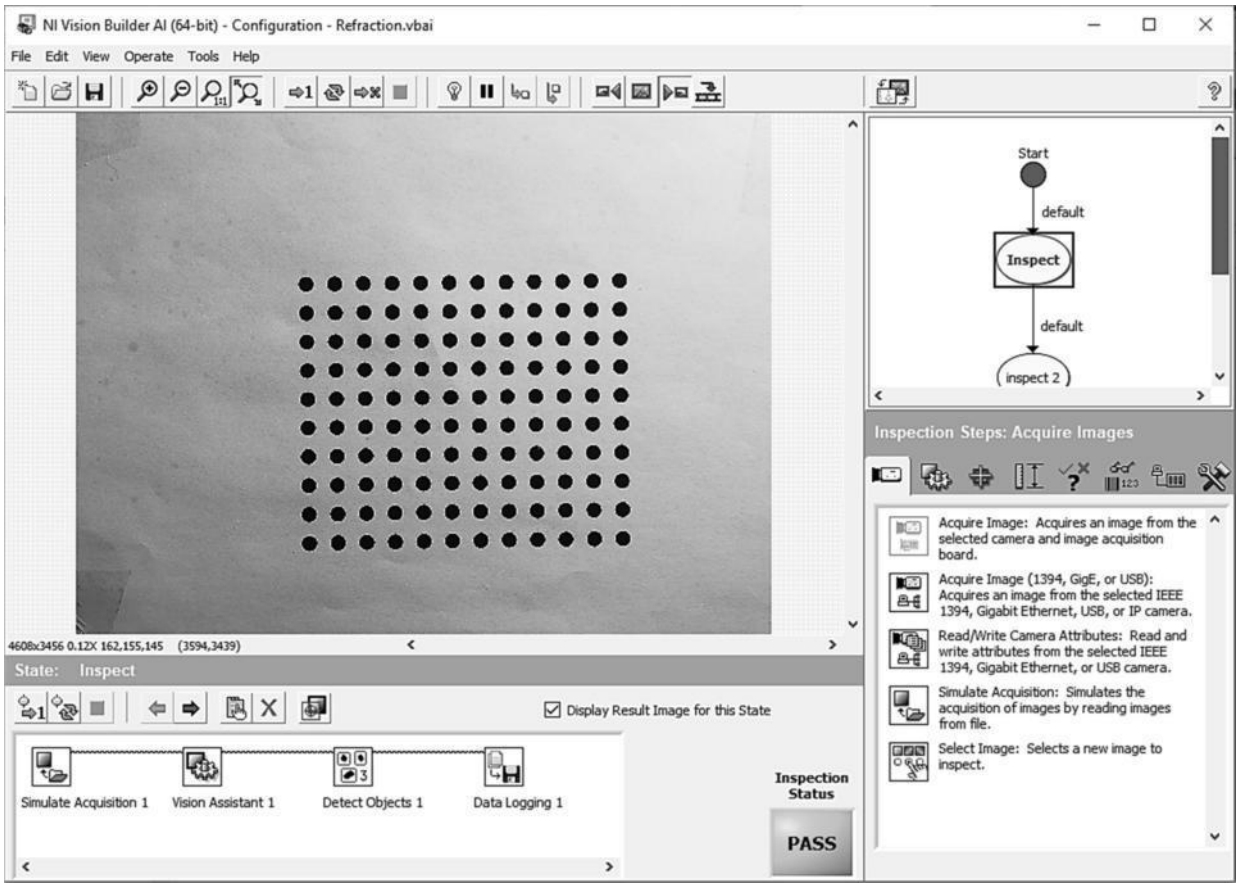


Рисунок 3.35 – Рабочее окно программы для оценки величины смещения опорных точек тест-объекта в следствии рефракции в ПО *VisionBuilder AI*

3.6 Методика компенсации погрешностей оптических систем комплексного контроля изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением для фиксированного положения объекта контроля

Для компенсации основных источников погрешностей оптических систем комплексного контроля изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением для фиксированного положения объекта контроля разработана методика [8]. Для ее реализации, кроме изображения объекта контроля, необходимо получить калибровочное изображение тест-объекта и изображение фона.

Обработка изображения включает следующую последовательность действий:

1. Вычитание фона;
2. Подавление шума матрицы;
3. Компенсации геометрических искажений изображения в оптическом тракте;
4. Бинаризация изображения.

Определение геометрических параметров производится на бинаризированном изображении.

Наглядное представление основных этапов реализации предложенного алгоритма представлено на рисунке 3.36.

Подавление фоновой составляющей осуществляется путем попиксельного вычитания изображения объекта и изображения фона, рассмотренного в предыдущем разделе.

Подавление шумовой составляющей матрицы осуществляется при помощи медианной фильтрации [83]. Двумерный медианный фильтр с окном размера *LxL* имеет наибольшую из всех рассмотренных методов шумоподавления эффективность, ему соответствует коэффициент ослабления шума 5,86 PSNR. Это свидетельствует о том, что при его помощи удается значительно снизить уровень шума на изображении.

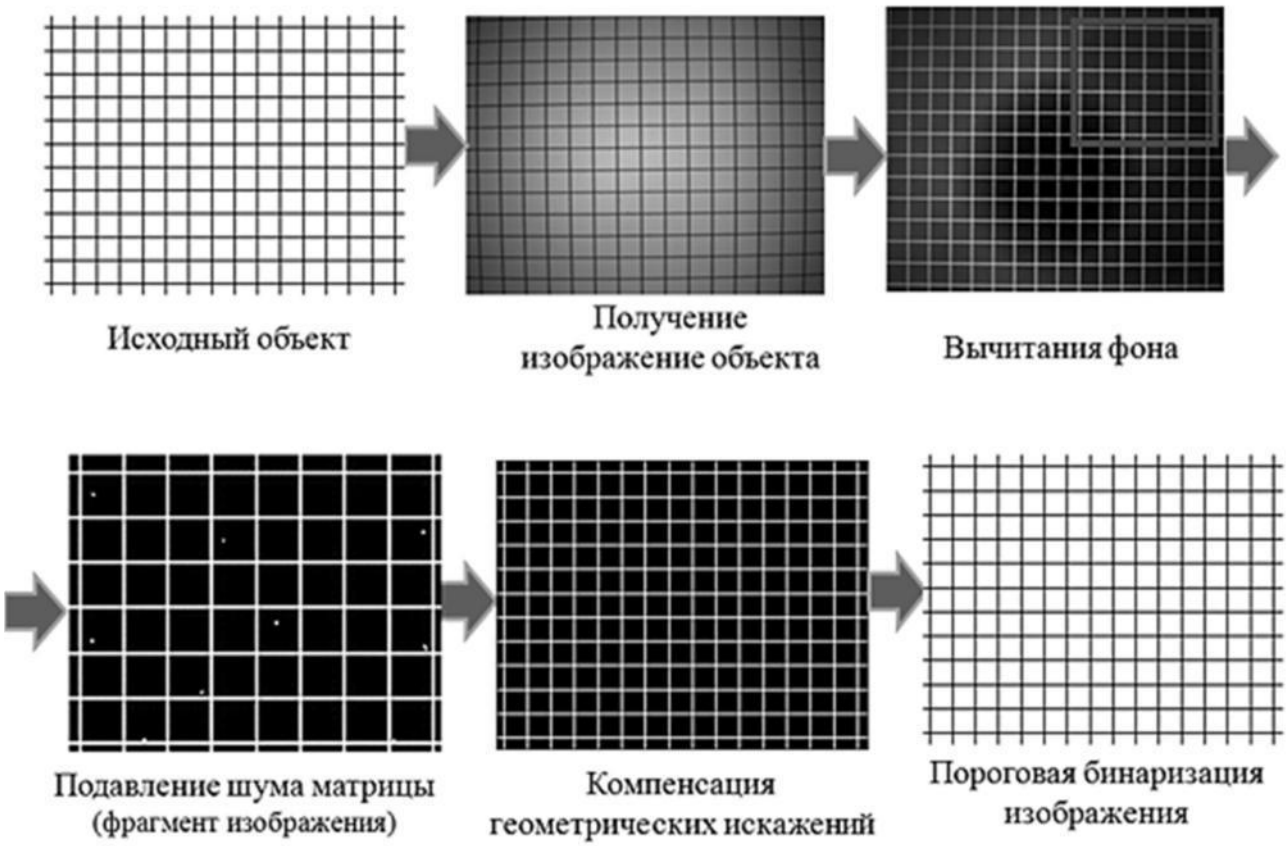


Рисунок 3.36 – Последовательность трансформации изображения объекта контроля, лежащая в основе методики компенсации погрешностей

На основе полученных экспериментальных данных [7] систем контроля геометрических параметров использующих цифровые камеры с матрицами размером 2/3" и более рекомендуется применять фильтр со значением L=3. При использовании цифровых камер с малыми размерами матриц и высоким уровнем шумовой составляющей (для камер с матрицами менее 2/3") рекомендуется применять фильтр со значением L=5 или L=7.

Компенсация геометрических искажений изображения объекта контроля реализуется за счет процедуры калибровки по тест-объекту. При использовании в системах контроля камер с низким разрешением (с матрицами 2 Мп и ниже и объективов с f=12 мм и более) достаточным является использование стандартных алгоритмов калибровки *National Instruments* (преимущественно *Polynomial k3*). При использовании цифровых камер с разрешением от 5 Мп и сильных искажениях изображения (характерных для короткофокусной оптики)

предпочтительным будет использование разработанной методики коррекции изображения методом ДПИ, которая рассмотренная в разделе 3.3.1.

Для операции бинаризации рекомендовано использовать адаптивный алгоритм. Условия реализации данного алгоритма представлены системой (3.39):

$$f'(m,n)=\begin{cases}0, f(m,n)\le t_i\\ 1, f(m,n)>t_i\end{cases},\ t_i=\begin{cases}t_1(m,n)\in D_1\\ t_2(m,n)\in D_2\\ .....\\ t_n(m,n)\in D_n\end{cases}, \qquad (3.39)$$

где t_i – пороговые значения бинаризации, D – области с установленными порогами.

Пороговые значения (минимум и максимум) определяются на основе гистограмм яркости и с учетом геометрических параметров марок, которым для стандартного точеного тест-объекта *National Instruments* соответствует диаметр окружностей, а для методики коррекции, основанной на дискретизации пространства изображений, – значение ширины линий сетки, и вычисляются для каждой линии измерений отдельно в пределах каждой ячейки тест-объекта.

Блок-схема обобщенного алгоритма реализации разработанной методики компенсации основных погрешностей системы комплексного контроля изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением для фиксированного положения объекта контроля и использующая в качестве приемников информации цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием приведена на рисунке 3.37.

На основе алгоритма представленного на рисунке 3.37 была разработана программа комплексной компенсации погрешностей оптико-электронных систем контроля геометрии изделий в среде *LabVIEW* [200]. Блок диаграмма рабочего окна разработанной программы приведена на рисунке 3.38

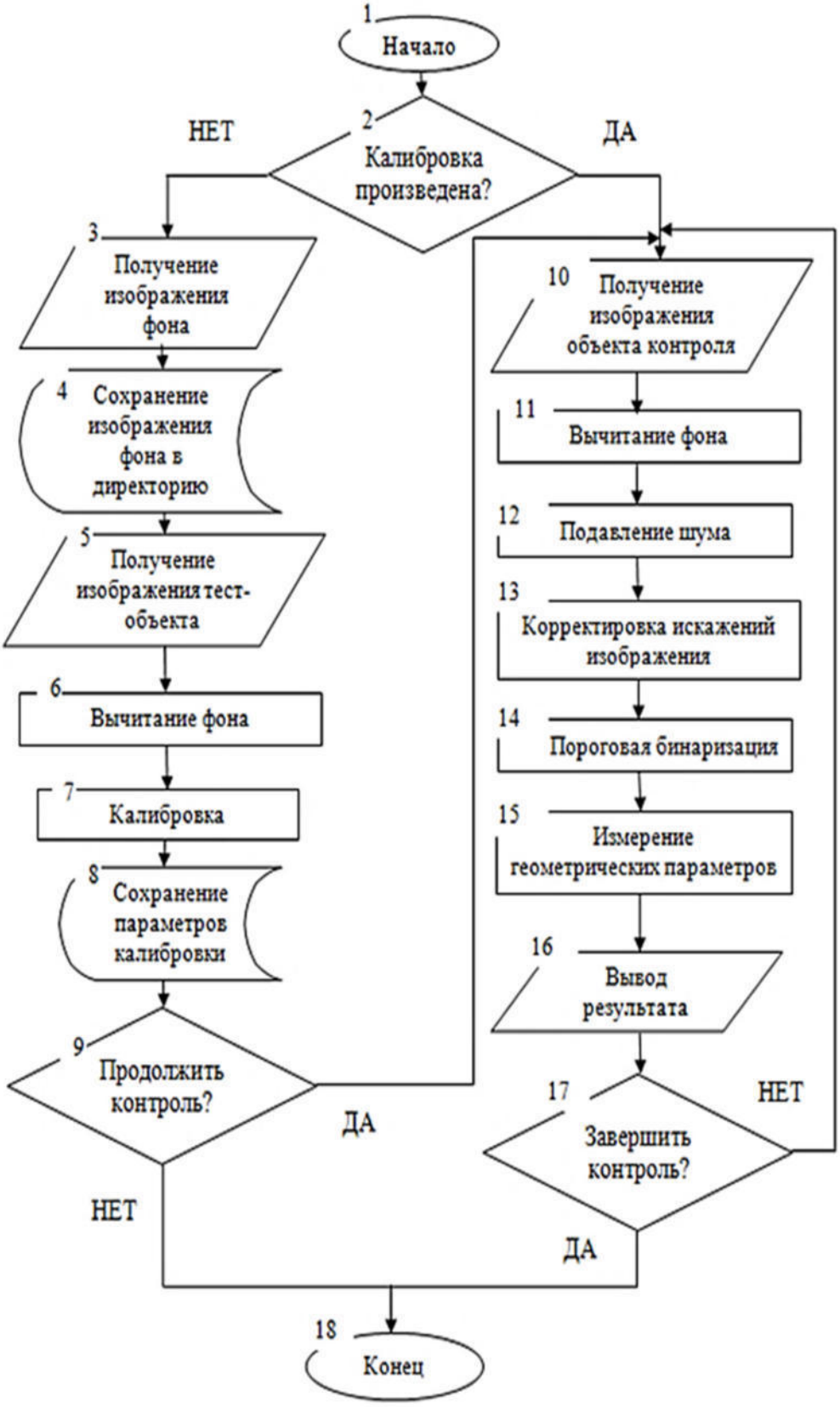


Рисунок 3.37 – Блок схема обобщенного алгоритма компенсации погрешностей системы комплексного контроля геометрических параметров изделий

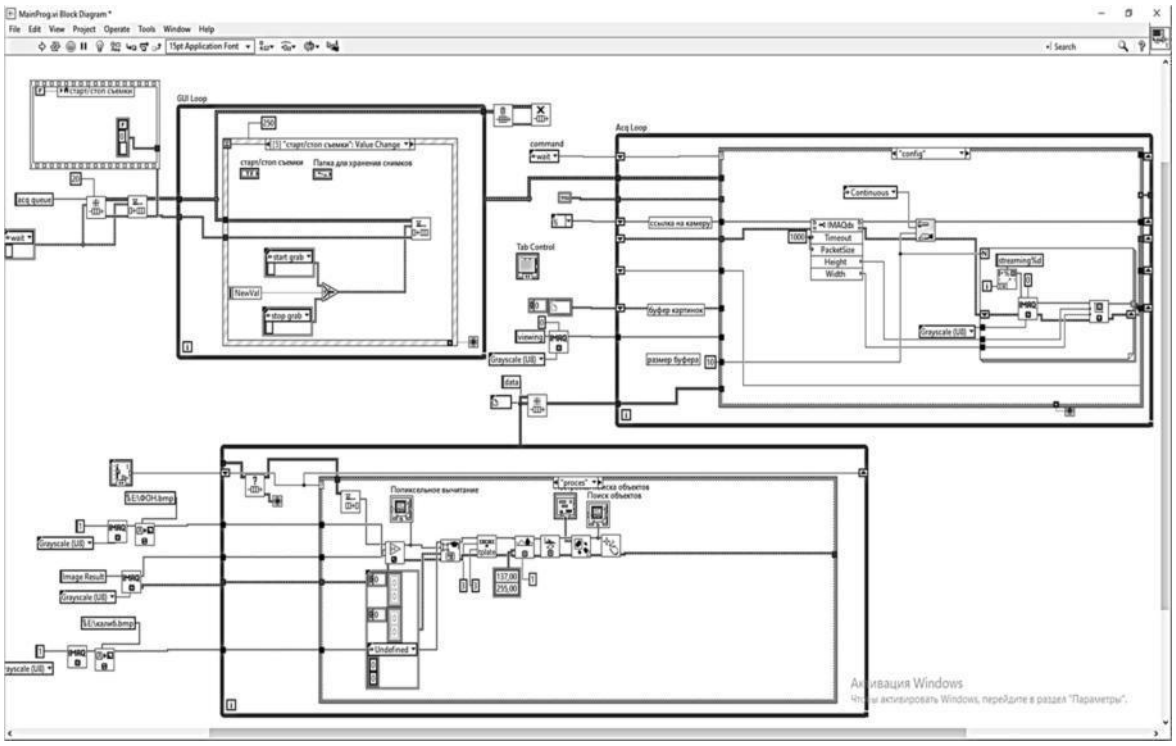


Рисунок 3.38 – Блок-диаграмма программы компенсации погрешностей системы комплексного контроля геометрических параметров изделий

3.7 Выводы по Главе 3

1. Анализ литературных источников и проведенные исследования позволили выявить и оценить восемь основных источников погрешностей пассивных оптических систем контроля: определения координат, положения объекта контроля, фокусного расстояния объектива, аберрации оптической системы, шум матричного фотоприемника, рефракция оптической среды, посторонние засветки и отражение от поверхности объекта.
2. Использование ромбовидной штрих-марки в инкрементных датчиках контроля положения позволит повысить точность как растровых измерительных преобразователей при интерполяции траектории, так и дальномерных, при изменении размеров пятна засветки.
3. При применении активных систем контроля доминирующими являются погрешности фокусного расстояния – Δf и смещения изображения штрих-марки на расстояние $\Delta L'$.

4. Результаты сравнения стандартных алгоритмов калибровки *National Instruments LabVIEW* показывают возможность оценки геометрических параметров изделия с погрешностью, не превышающей двух пикселей (или 0,18 мм для объектов размером 100 мм и разрешении камеры 1 Мп) при использовании нормальных и длиннофокусных объективов только при допустимых отклонениях тест-объекта от условия перпендикулярности оптической оси в пределах пяти градусов. Нарушение этого условия приводит увеличению погрешностей до 5 px. Для короткофокусной оптики, по краям поля зрения, погрешности могут доходить до 7 px.
5. Разработанная методика калибровки цифровых камер, основанная на модели дискретизации пространства изображения (ДПИ), позволяет повысить надежность процедуры восстановления геометрического подобия образа прообразу объекта контроля за счет равномерной компенсации по всему полю зрения за счет уменьшения искажений до ± 1 px, однако требует более высокой точности изготовления тест-объекта.
6. Программную реализацию методики ДПИ калибровки можно выполнить с помощью *warping* – фильтра.
7. Разработанная методика компенсации погрешностей системы комплексного контроля геометрических параметров изделий в проходящем неколлимированном свете, позволяет учесть основные составляющие погрешностей измерения размеров как систематические, так и случайных составляющие при фиксированном положении объекта контроля.
8. Исходя из принципа системности, для повышения точности оптических систем контроля размеров геометрическим методом с пространственным разрешением необходимо учесть влияние следующих факторов: особенности трансформации светового потока контролируемыми объектами (прозрачными плоскими и непрозрачными осесимметричными), погрешности их базирования при закреплении или возможные смещения (возникающие по причине смещения от положения калибровки) и расположение источников подсветки (получении информации в отраженном свете).

ГЛАВА 4 НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

4.1 Контроль геометрических параметров листовых объектов

4.1.1 Задача контроля изделий из листовых материалов

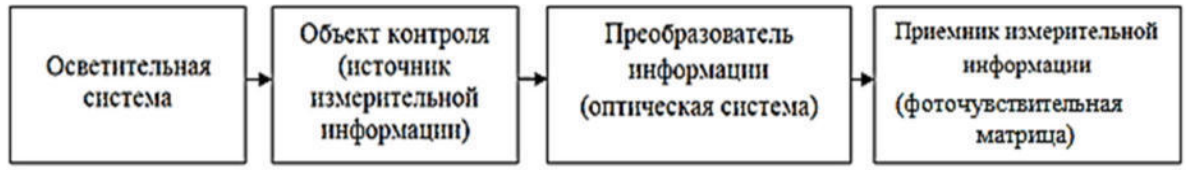
Под объектами контроля - листовыми материалами будем понимать изделия, в которых толщина много меньше любого из двух других габаритных размеров. При определении параметров листовых материалов их поверхность можно соотносить с геометрическим понятием плоскости и считать задачу контроля размеров листовых объектов двухмерной. Параметры, связанные с третьим измерением (толщиной), считаются несущественными.

Как было ранее сказано (п. 1.1), объекты контроля, в зависимости от способа трансформации внешнего светового потока, могут быть оптически прозрачными и непрозрачными. В задачу контроля светонепроницаемых изделий входит определение геометрических параметров контура изделий и при необходимости поверхностных дефектов. В задачи контроля изделий из листовых светопроницаемых материалов помимо определения их геометрии может входить и контроль наличия как наружных, так и внутренних дефектов.

Рассмотим задачу контроля геометрии изделий из листовых материалов светонепроницаемых материалов.

Получение измерительной информации может быть реализовано как в проходящем свете (рисунок 4.1а) по теневому отображению, так и в отраженном свете (рисунок 4.1б).

а)



б)

Рисунок 4.1 – Схемы контроля изделий из листовых материалов

Если объект контроля расположен в плоскости перпендикулярной оптической оси объектива, то любые его размеры можно рассматривать как соотношение сопряженных отрезков L и L', которые связаны линейной функцией (4.1):

$$L' = V_P L \quad , \tag{4.1}$$

где Vp – линейное увеличение в точке пересечения оптической оси объектива с плоскостью P (рисунке 4.2).

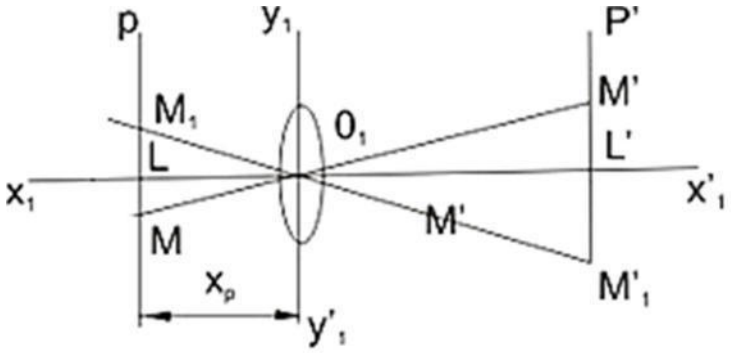


Рисунок 4.2 – Схема измерения

Линейное увеличение V_p вычисляется по формуле (4.2):

$$V_p = 1/\left(X_p / f - 1\right) . \tag{4.2}$$

Точность вычисления V_p зависит от погрешностей положения плоскости P и фокусного расстояния f объектива камеры. Оценить влияние этих факторов можно через частные производные (4.3) и (4.4):

$$\frac{\partial V_p}{\partial X_p} = -V_p^2 \frac{1}{f}, \tag{4.3}$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial f} = V_p^2 \frac{X_p}{f^2}. \tag{4.4}$$

Из (4.3) и (4.4) следует, что погрешность расчетного соотношения (4.1) может быть значительной, особенно при использовании короткофокусных объективов. Поэтому требуется калибровка системы. Для настроенной и калиброванной системы ошибки фокусного расстояния скомпенсированы, а ошибки положения плоскости P проявляются иначе, чем по (4.3). Характер их влияния поясняется на рисунке 4.3.

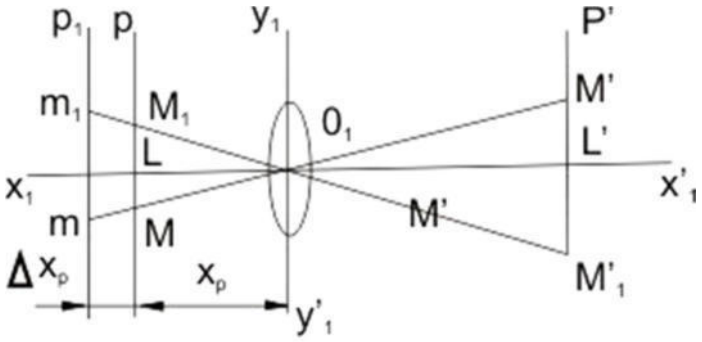


Рисунок 4.3 – Схема возникновения ошибок фокусного расстояния

При смещении плоскости P в положение P_2 отрезок MM_1, измеренный в плоскости P', сопряжен с отрезком mm_1, большим чем MM_1, который вычисляется по формуле (4.1). Погрешность ΔL определения отрезка $L_1=mm_1$ можно определить по формуле (4.5):

$$\Delta L_p = (Y_{1M_1} - Y_{1M}) \frac{\Delta X_p}{X_p} \tag{4.5}$$

Из (4.5) видно, что погрешность ΔL_p прямо пропорциональна абсолютной величине перемещения L и обратно пропорциональна удалению предметной

плоскости *P* от объектива. Эту погрешность удается практически устранить, создавая телецентрический ход лучей, передающих измерительную информацию как показано на рисунке 4.4.

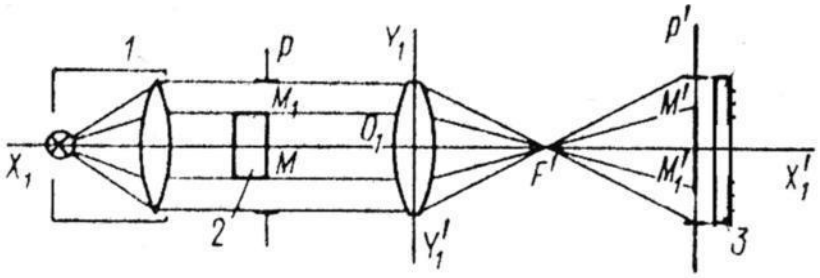


Рисунок 4.4 – Схема контроля размеров с использованием телецентрического хода лучей

Световой поток от осветителя 1 проектирует через объектив O_1 теневое изображение краев объекта измерения 2 в плоскость P' фоточувствительной матрицы 4 цифровой камеры. Размер изображения $M'M'_1$ определяется количеством затененных пикселей. Недостатком этого способа является высокая стоимость оборудования (поскольку требуется использование и коллимированного источника света) и его ограниченный типоразмерный ряд, который не позволяет контролировать изделия с размерами более 250…300 мм. Последний недостаток в ряде случаев может быть преодолён, когда для определения конкретного параметра в поле зрения помещается не весь объект, а его край (рисунок 4.5). Такая схема позволяет сделать систему контроля более компактной и боле универсальной, однако дополнительным источником погрешности будет является базирование объекта контроля.

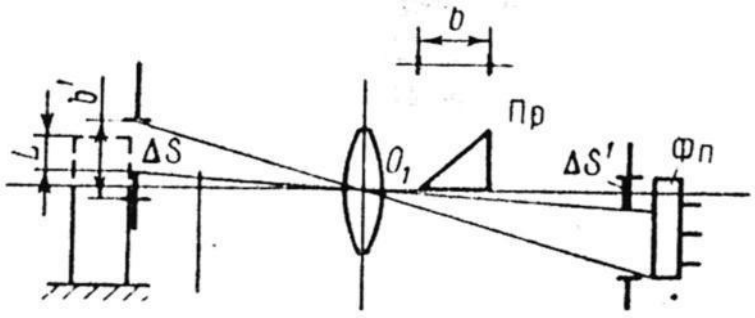


Рисунок 4.5 – Проекционный относительный способ контроля

Однако в этом случае при комплексном контроле параметров изделия несколькими системами такого типа возникает погрешность базирования объекта и взаимного расположения этих каналов системы контроля.

При нарушении условия перепендикулярности объекта оптической оси происходит перспективное искажение объекта контроля. При невысоких требованиях к точности контроля (при которых допустимая погрешность контроля значительно больше аббераций оптической системы) возможно использование афинных преобразований пространства для коррекции изображения. При более высоких требованиях к точности задача коррекции изображения решается с использованием процедуры калибровки системы для заданного относительного положения цифровой камеры и плоскости контроля по методикам, рассмотреным в разделе 3.2.

Обобщая вышесказанное, можно выделить следующие основные источники погрешности определения геометрических параметров:

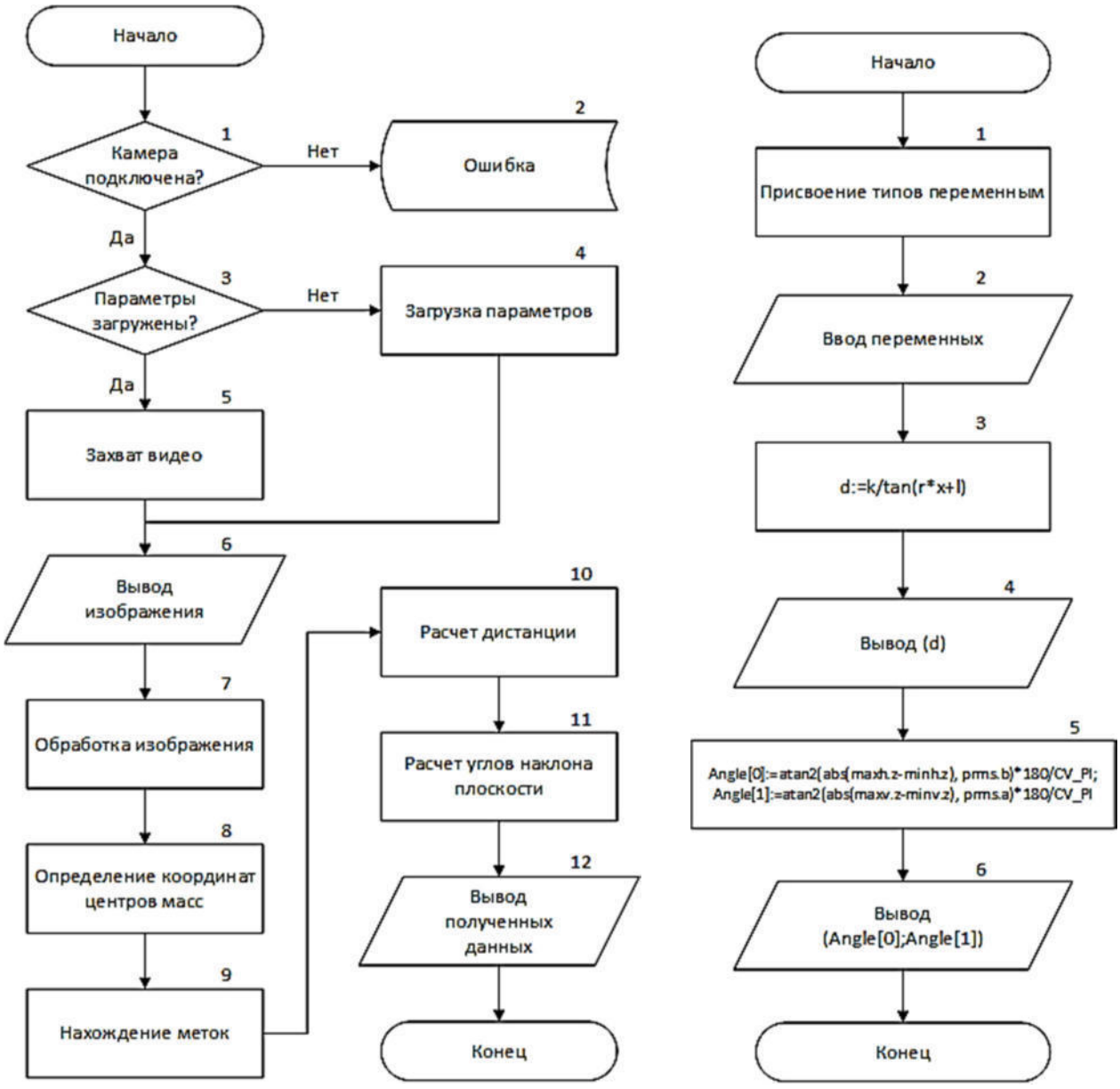
- позиционирования объекта относительно цифровой камеры;
- аберрации оптической системы;
- от фоновой засветки и (или) отражения от поверхности объекта.

Появление фоновой засветки и отражения от поверхности является следствием применения систем подсветки для более контрастного выделения объекта из окружающей среды при его распознавании. Использование нетелецентрической подсветки (с условно точечным или рассеяным источником) приводит к размытию изображения при получении теневого сечения объекта в проходящем свете. Контроль объектов в отраженном свете возможен для объектов с матовой поверхностью или с использованием поляризационного фильтра.

При нефиксированном положении контролируемых плоских объектов для установления соответствия объекта его изображению необходимо определить текущее положения плоскости контроля в пространстве. Данная задача рассмотрена в [34]. Основой данной идеи является использование

триангуляционного метода для измерения расстояний до плоскости, а по разности расстояний – определение углового положения.

Активная четырехканальная система триангуляционного типа контроля положения контролируемой плоскости использует четыре точечных излучателя попарно симметрично размещенных относительно оптической оси цифровой камеры. Алгоритм работы системы показан на рисунке 4.6.



а) б)

Рисунок 4.6 – Блок-схема работы программы определения плоскости в пространстве а) общая, б) измерения дальности и угла наклона плоскости

На основе предложенного алгорогитма разработанно ПО [199].

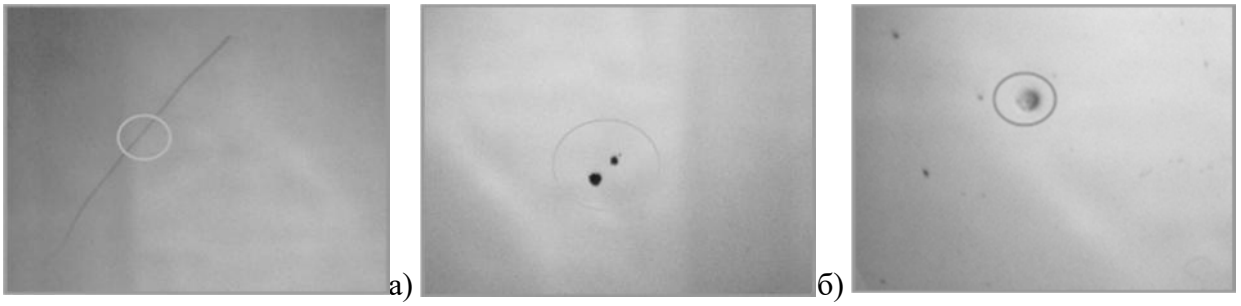
4.1.2 Контроль качества листового стекла

Контроль качества стекол относится к частной задаче контроля листовых изделий, применительно к оценке характеристик светопроницаемых материалов.

В работах [234, 244, 245, 279] представлены различные подходы к классификации дефектов стекла, основанные в основном на цифровой обработке изображения.

Системы автоматизированного детектирования пороков светопрозрачных материалов до сих пор не получили широкого распостранения на отечественных предприятиях. Прежде всего это связано со сложностью разработки классификатора, который бы с достаточной достоверностью осуществлял распознавания объектов контроля в соответствии с требованиями национальных стандартов и дополнительными требованиями заказчиков. В [43] представлены основные требования к качеству стекла, а в [48] приведен список из 34 пороков стекла и 17 пороков изделий из стекла.

На рисунке 4.7 представлены изображения основных пороков изделий из стекла и стекол: царапина, имеющая 4 разновидности, камень и пузырь, имеющий 5 разновидностей. Более подробно классификационные признаки дефектов стекол представлены в работах [104, 183].



а) б) в)

Рисунок 4.7 – Основные виды пороков светопрозрачных материалов:
а – царапина; б – камень; в – пузырь

На данный момент отсутствует комплексная автоматизированная система распознавания пороков стекла. Одним из путей решения данной проблемы является применение нейросетевых технологий. Пример такой классификации

представлен в [170]. Однако для реализации такого метода требуется сбор обширной выборки эталонов для обучения, что может привести к значительным временным и материальным затратам. В [73] представлен подход к распознаванию пороков стекла на основе применения вейвлет-преобразования коэффициентов функций яркости пикселей строк, столбцов и диагоналей. Таким образом, распознавание дефектов осуществляется только на базе обработки изображения без учета физических свойств материала, системы освещения и оптической части системы машинного зрения.

В зависимости от типа порока осуществляются определенные процедуры. Например, сравнение с эталоном может быть применено для классификации сколов, посечек, трещин, выщелачиваний. Выявление царапин, пузырей, камней можно осуществлять, применяя фильтрацию изображений с использованием дополнительных решающих правил. Однако следует учитывать, что фильтрация при высоких коэффициентах масок может вызывать зашумленность изображения, искажать геометрические параметры и мешать поиску связных объектов на изображении.

Таким образом, для комплексной оценки качества изделий из стекла эти два подхода должны применяться одновременно. На рисунке 4.8 показан предлагаемый обобщенный алгоритм оценки качества изделий, учитывающий эти два подхода.

В настоящее время как процесс классификации дефектов светопрозрачных материалов, так и выбор признаков зависит от конкретных целей и условий распознавания и является процедурой эвристической.

Требования к качеству светопрозрачных материалов, например стекол, определяются государственными стандартами [52, 54], но могут быть дополнены более жесткими требованиями заказчиков, например [217]. Поскольку в требованиях для каждого из пороков оговариваются допустимые размеры и количество, то первоначально необходимо идентифицировать порок, отнеся его к тому или иному классу и категории.

Рисунок 4.8 – Обобщенный алгоритм оценки качества светопрозрачных изделий (листовых стекол)

Рассмотрим классификацию признаков, которая отражает особенности распознавания дефектов листовых светопрозрачных материалов. К основным яркостным характеристикам можно отнести: гистограмма распределения значений яркости на изображении, начальные ν_k и центральные μ_k моменты функции яркости (4.6):

$$\nu_k = E(X^k),\ \mu_k = E\left\{(X - E(X))^k\right\} \quad , \tag{4.6}$$

где X - среднее значение функции яркости на изображении, E - математическое ожидание.

Исходя из вышесказанного выделено три основных группы признаков, на которых будет базироваться алгоритм распознавания пороков:

- яркостные,
- цветовые,
- геометрические или признаки формы (прямая, эллипс, кривая и т.д.).

При этом яркостные и цветовые признаки являются первичными. На основе информации, полученной по первичным признакам, формируются вторичные – геометрические.

Для детектирования таких пороков листового стекла как царапина, трещина, камень достаточно применения только геометрической оценки, так как это связано с природой происхождения порока. К этой группе относятся те признаки, расчет которых основан на использовании геометрических характеристик, представленных на изображении пороков. В работе Кузьмича И.В. выделены: «следующие признаки:

– геометрические размеры изображенного дефекта по вертикали или горизонтали;

– расстояние между наиболее удаленными точками на изображенном дефекте;

– периметр и площадь изображенного дефекта;

– компактность дефекта (как соотношение между его площадью и периметром);

– числовые характеристики описанных или вписанных в изображение дефекта геометрических фигур, таких как окружности, многоугольники, и т.д.» [104].

Геометрические признаки используются для решения выявления пороков, которые характеризуются:

– дефектами с ярко выраженной геометрической структурой (границей);

– малым уровнем шумов и динамических искажений.

Для детектирования пороков листовых стекол достаточным является использование цифровой монохромной камеры, на изображении с которой, можно выделить непрозрачные пороки, используя пороговую фильтрацию по яркости.

Для распознавания светопрозрачных внутренних дефектов стекла (пузырь и свиль) необходимо ввести дополнительный признак – теневой. Методологическая сущность теневого признака заключается в его проявлении при определенных

углах освещения и показана на рисунке 4.9. На увеличенных фрагментах стекла А и Б наглядно показано формирование теневого изображения при попеременном использовании верхнего 1 или нижнего 4 источника подсветки объекта контроля, освещающих листовое стекло 2, содержащее порок пузырь 3, с пороком.

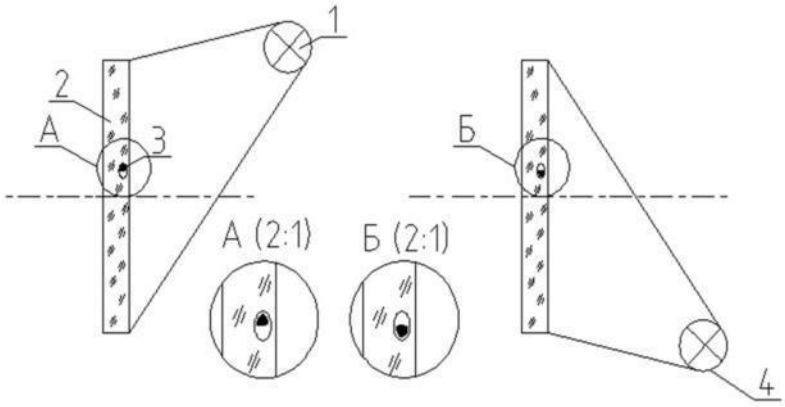


Рисунок 4.9 – Теневой признак для выявления светопрозрачных внутренних пороков листового стекла

Таким образом, для классификации светопрозрачных пороков необходима управляемая система освещения. Проведенные исследования установили, что наилучшие результаты показывает светодиодная подсветка. Примеры реализации системы освещения автоматизированной системы контроля пороков стекла рассмотрены в [28].

Источник подсветки следует выбирать в соответствии с требованиями [46] и с условием обеспечения контрастного выделения дефектов на изображении.

Исследования показали преимущества использования рассеянного освещения, поскольку оно позволяет осуществлять контроль диффузно-отражающих изделий и обнаруживать включения по методу темного поля и осуществлять анализ спектральных и яркостных характеристик стекол.

На рисунке 4.10 представлена предложенная схема системы контроля светопрозрачных листовых материалов [165]. Система освещения 5 с экраном 6 показана условно: количество и вид источников уточнены в [26]. Расстояние L от объекта контроля 3 (с дефектами 4) до фона (экрана) 6 определяется габаритными расчетами исходя из фокусного расстояния размеров матрицы и контролируемого

объекта. Оптическая схема представлена с учетом технических характеристик объектива 2 *Computar M0814-MP2* и цифровой камеры 1 *NI* 1722.

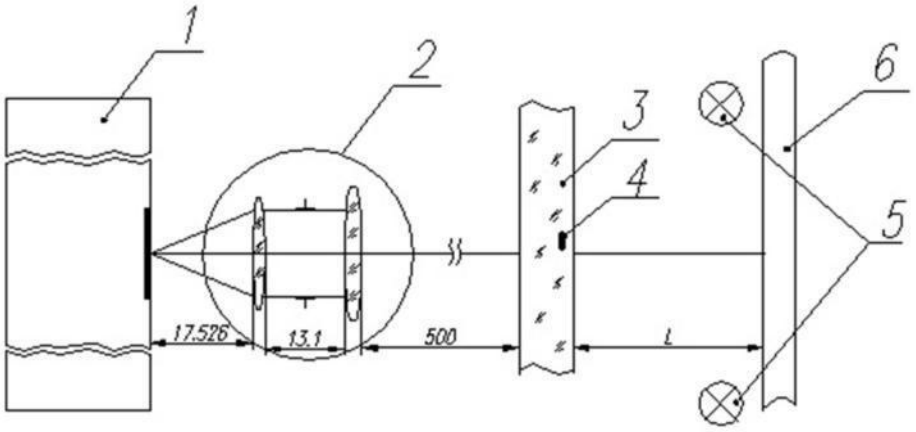


Рисунок 4.10 – Схема системы контроля пороков светопрозрачных листовых материалов

Для детектирования пороков стекла использовались яркостные первичные признаки, что определило выбор в качестве устройства фиксации изображения монохромной цифровой камеры. Монохромное изображение стекла обрабатывалось последовательно в два этапа. Первый – предварительная обработка, и второй – анализ изображения с использованием матричных преобразований.

Предварительная обработка производится для выделения элементов изображения, не соответствующих основной структуре контролируемого объекта (пороков стекла). «Выделение нехарактерных элементов изображения производится посредством пространственной фильтрации, обнаружением резких изменений яркости пикселей или высоких пространственных частот и разделением этих частотных компонентов на двухмерные данные» [30]. Предварительная обработка необходима для определения границы самого объекта контроля и границ дефектов или самих дефектов (например, царапины). Обработка осуществляется при помощи алгоритма свертки – взвешенным усреднением пикселя, который подвергается операции матричного сложения, и его ближайших соседей [240].

Свертку производим по матрице 3х3, типа (4.7):

$$\begin{vmatrix} a1 & a2 & a3 \\ a4 & a5 & a6 \\ a7 & a8 & a9 \end{vmatrix} . \quad (4.7)$$

Проведем анализ монохромного изображения двухкамерного стеклопакета (рисунок 4.11).

Рисунок 4.11 – Изображение стеклопакета

Для выделения возможных дефектов на изображении воспользуемся оператором Лапласа. Поочередно накладываем матричные маски (горизонтальные, вертикальные, диагональные) (4.8), которые в соответствии с алгоритмом покажут возможные «линейные» пороки:

$$\begin{vmatrix} -a1 & -a1 & -a1 \\ 0 & 0 & 0 \\ a1 & a1 & a1 \end{vmatrix} \text{ горизонтальные } \begin{vmatrix} -a1 & 0 & a1 \\ -a1 & 0 & a1 \\ -a1 & 0 & a1 \end{vmatrix} \text{ вертикальные} \quad (4.8)$$

$$\begin{vmatrix} 0 & a1 & a1 \\ -a1 & 0 & a1 \\ -a1 & -a1 & 0 \end{vmatrix} \text{ диагональные } \backslash \begin{vmatrix} -a1 & -a1 & 0 \\ -a1 & 0 & a1 \\ 0 & a1 & a1 \end{vmatrix} \text{ диагональные } /.$$

Сравнительный анализ, проведенный в работе [30], показал, что наилучшие результаты для выделения пороков стекол показывает матрица вида (4.9):

$$A = \begin{vmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 3 \end{vmatrix} . \quad (4.9)$$

На обработанном изображении (в выделенном элементе) четко выделяется белая линия (царапина) на черном фоне, как показано на рисунке 4.12.

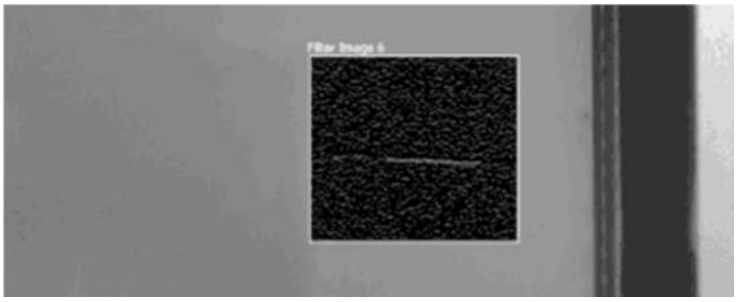


Рисунок 4.12 – Царапина на стекле при наложении фильтра *Laplace* (горизонтальная матрица)

Использование фильтров с более высокими коэффициентами верхней и нижней строки (например, «10» и «-10») приводит к появлению дополнительных линейных шумовых структур, которые физически не являются дефектами, а представляют собой саму структуру стекла (рисунок 4.13).

Как показали исследования, для выделения царапин, идущих под разными углами, необходимо использовать набор фильтров интегрированного преобразования Лапласа, которые будут производить свертку изображения в 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 градусах, обеспечив надежность детектирования порока «царапина».

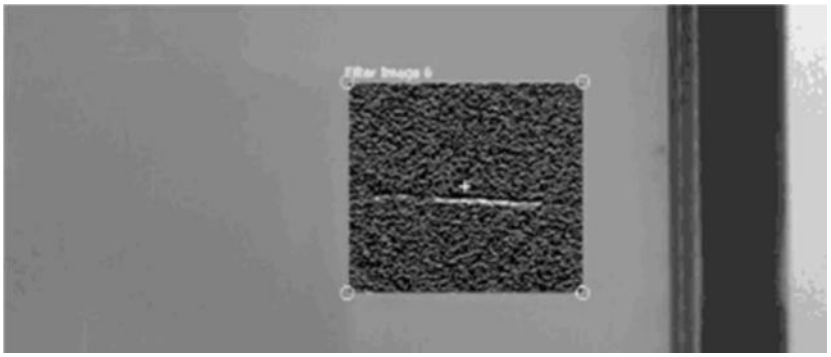


Рисунок 4.13 – Царапина на двухкамерном стеклопакете при наложении фильтра *Laplace*

Следовательно, важной задачей контроля светопрозрачных материалов является установление порога между двумя максимальными значениями яркости.

Кроме фильтра *Laplace* для выделения пороков могут применяются масочные фильтры *Sobel* и *Roberts.* Сравним вышеперечисленные фильтры для решения задачи детектирования порока «царапина» на образце стекла, представленном на рисунке 4.14.

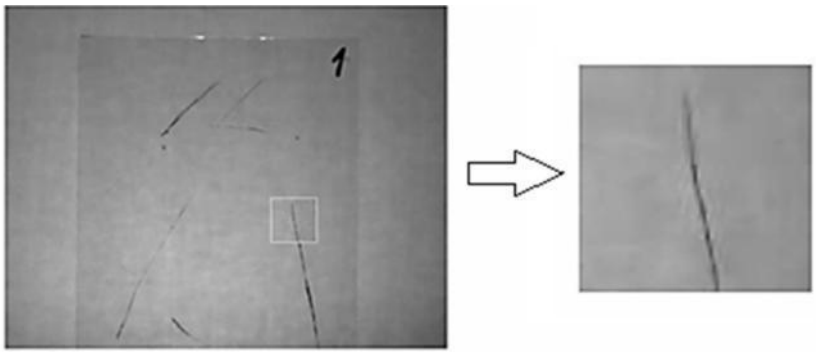


Рисунок 4.14 - Образец стекла с пороками «царапина» (справа показана выделенная область исследования)

Значений яркостей пикселей определялось в ПО *Image-ProPlus* 6.0. Проведем оценку значений яркостей по трем линиям *Line* 1, *Line* 2 и *Line* 3, как показано на рисунке 4.15, и определим среднее значение яркости пикселей в выбранных диапазонах.

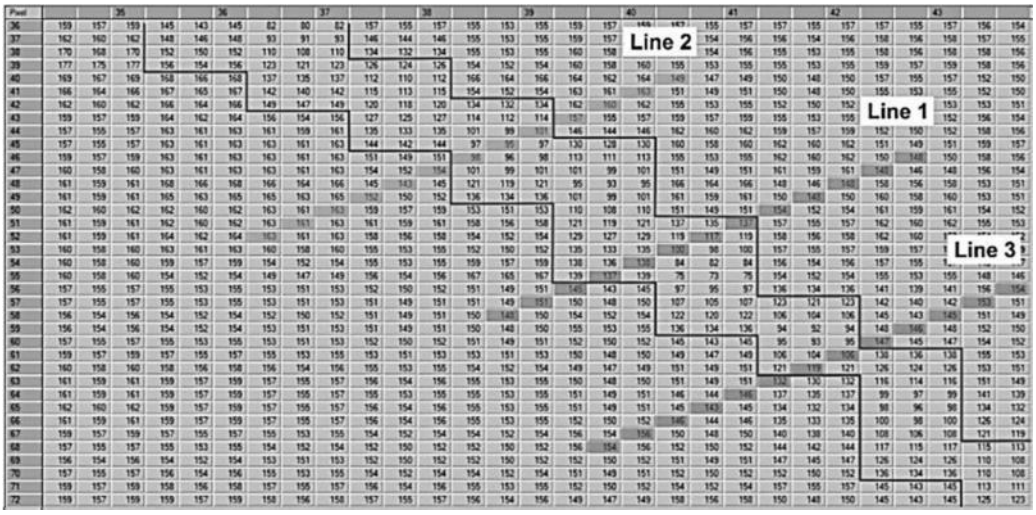


Рисунок 4.15 – Выборка значений пикселей для определения среднего показателя яркости

На основании рассчитанных средних показателей графическим методом получаем изменения яркостного перепада после фильтрации изображения масками *Sobel, Roberts* и *Laplace,* которые представлены на рисунке 4.16.

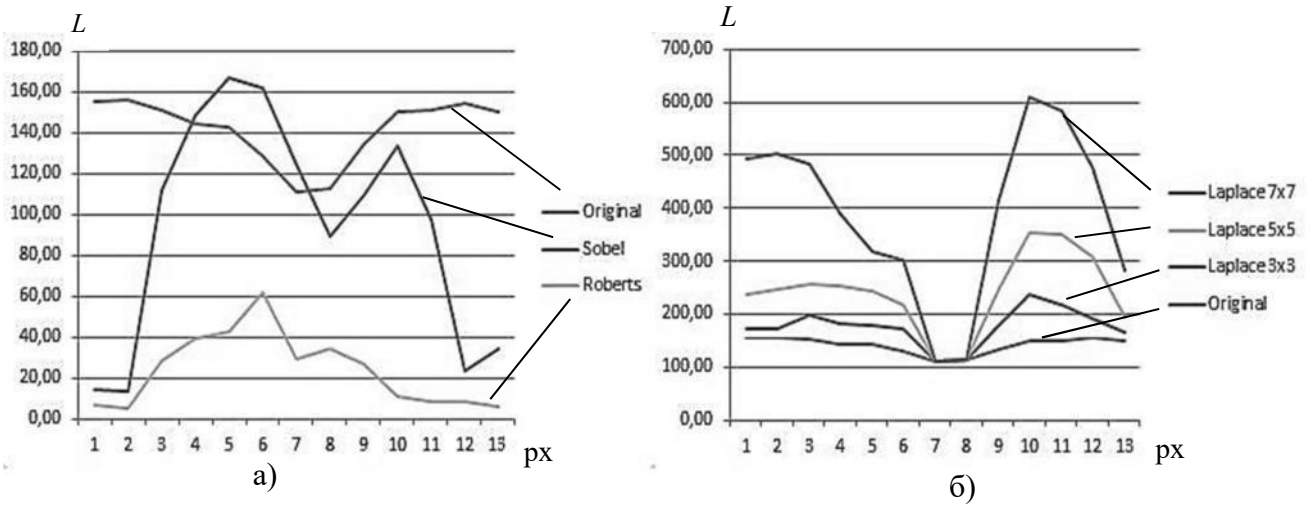


Рисунок 4.16 – Изменение значений яркости после применения фильтров

Очевидно, что применение фильтров *Sobel* и *Roberts* дает смещение центра масс дефекта относительно изображения (рисунок 4.16а). Применение фильтра *Laplace* не дает смещение дефекта относительно оригинала (рисунок 4.16б). Увеличение размера маски приводит к повышению значений яркости, смещению границ дефекта и увеличению его ширины (при оригинале h_0= 5 увеличивается до h_l=15 при применении фильтра *Laplace* с маской 7x7). Таким образом, при использовании фильтра *Laplace* происходит наименьшее смещение границ и наибольшее изменение значений яркости.

В работе [31] подробно рассмотрено применение фильтра *Laplace* для выделения у порока «царапина» границ на изображении на примере пяти изображений листовых стекол, показанных на рисунке 4.17, полученных при различных условиях освещенности. На рисунке 4.18 приведены изображения пороков, обработанные фильтром *Laplace* с маской 3x3.

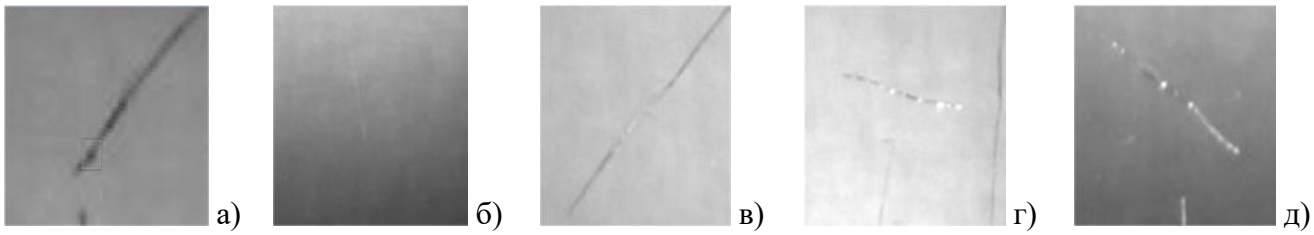


Рисунок 4.17 – Исходные изображения образцов листовых стекол с пороком «царапина»

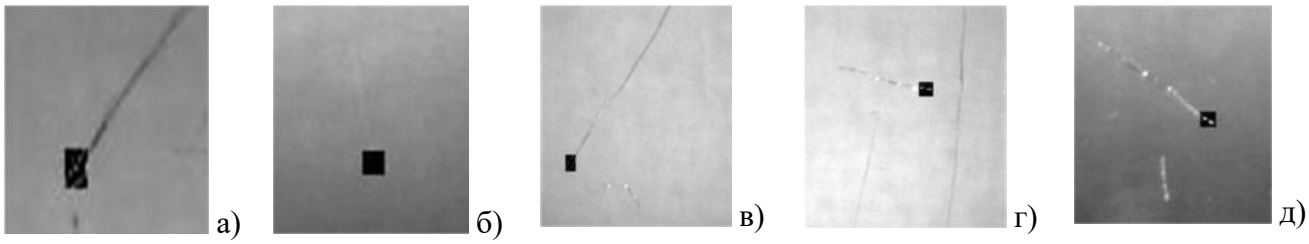


Рисунок 4.18 – Изображения образцов листовых стекол с пороком «царапина», обработанные фильтром *Laplace* с маской 3х3

Результаты обработки изображений были сведены в таблицу 4.1, отображающие расчет яркостного перепада для образцов. По результатам обработки тестового образца (рисунок 4.18а) наблюдается увеличение значения перепада яркости (с Δ_0=14,2 до Δ=69,1), что свидетельствует об эффективности применения фильтра *Laplace* для подчеркивания границ дефекта «царапина».

На изображении 4.18б представлен образец с недостаточной освещенностью.

Значение яркостного перепада для оригинала и обработанного изображения остается практически неизменным (для оригинала - Δ=2,7, для обработанного изображения - Δ=2,5). Таким образом, для процесса классификации дефекта «царапина» данного образца необходимо использовать другие механизмы фильтрации.

Среднее значение перепада яркости оригинала изображения (рисунке 4.18в) составляет Δ=7,7, а после обработки Δ=28,1, что свидетельствует о недостаточной освещенности объекта контроля.

Таблица 4.1 – Перепады яркости исходного и обработанного фильтром *Laplace* 3x3 изображения

Образец						Образец					
а)						б)					
исходное			обработанное			исходное			обработанное		
max	min	Δ	max	min	Δ	max	min	Δ	max	min	Δ
145	142	Δ_1=3	62	29	Δ_1=33	123	119	Δ_1=4	1	0	Δ_1=1
141	135	Δ_2=6	35	0	Δ_2=35	126	125	Δ_2=1	4	0	Δ_2=4
133	122	Δ_3 =11	60	0	Δ_3 =60	128	125	Δ_3 =3	3	0	Δ_3 =3
147	129	Δ_4 =18	107	7	Δ_4 =100	130	126	Δ_4 =4	5	0	Δ_4 =5
116	101	Δ_5 =15	135	0	Δ_5 =135	138	136	Δ_5 =2	6	0	Δ_5 =6
125	100	Δ_6 =25	75	0	Δ_6 =75	126	123	Δ_6 =3	1	0	Δ_6 =1
136	107	Δ_7 =29	64	0	Δ_7 =64	127	125	Δ_7 =2	4	3	Δ_7 =1
148	131	Δ_8 =17	52	19	Δ_8 =33	125	122	Δ_8 = 3	2	0	Δ_8 =2
144	135	Δ_9 =9	89	32	Δ_9 =57	125	122	Δ_9 = 3	2	0	Δ_9 =2
128	119	Δ_{10} =9	148	49	Δ_{10} =99	126	124	Δ_{10} =2	0	0	Δ_{10} =0
Δ= 14,2			Δ= 69,1			Δ= 2,7			Δ = 2,5		
в)						г)					
исходное			обработанное			исходное			обработанное		
max	min	Δ	max	min	Δ	max	min	Δ	max	min	Δ
178	170	Δ_1=4	178	170	Δ_1=4	223	209	Δ_1=14	26	0	Δ_1=26
173	165	Δ_2=8	173	165	Δ_2=8	250	213	Δ_2=37	205	0	Δ_2=205
177	169	Δ_3 =8	177	169	Δ_3 =8	246	211	Δ_3 =35	186	0	Δ_3 =186
174	167	Δ_4 =7	174	167	Δ_4 =7	228	205	Δ_4 =23	105	0	Δ_4 =105
176	167	Δ_5 =9	176	167	Δ_5 =9	220	214	Δ_5 =6	25	4	Δ_5 =21
178	169	Δ_6 =9	178	169	Δ_6 =9	216	206	Δ_6 =10	22	0	Δ_6 =22
180	172	Δ_7 =2	180	172	Δ_7 =2	239	218	Δ_7 =21	44	0	Δ_7 =44
185	172	Δ_8 = 12	185	172	Δ_8 = 12	222	214	Δ_8 =8	54	0	Δ_8 =54
172	162	Δ_9 = 10	172	162	Δ_9 = 10	255	236	Δ_9 =19	158	0	Δ_9 =158
183	175	Δ_{10} =8	183	175	Δ_{10} =8	223	216	Δ_{10} =7	59	0	Δ_{10} =59
Δ= 7,7			Δ= 28,1			Δ= 18			Δ= 82,6		

При обработке изображения (рисунке 5г) получаем более высокое значение перепада яркости (Δ=82,6), при перепаде яркости оригинального изображения Δ=18, что является граничным значением для применения фильтра *Laplace* 3х3.

Влияние размера маски фильтра *Laplace* было исследовано на примере образца на рисунке 4.18д. Оригинал и обработанные изображения масками 3х3, 5х5 и 7х7 представлены на рисунке 4.19.

а) б) в) г)

Рисунок 4.19 – Изображение листового стекла с дефектом «царапина»
а) исходное, обработанное фильтрами: б) *Laplace* 3х3, в) *Laplace* 5х5,
г) *Laplace* 7х7

Результаты обработки изображений тремя различными масками (*Laplace* 3х3, 5х5, 7х7) были сведены в таблицы значений яркостей до и после обработки таблице 4.2.

Наблюдается увеличение яркостного перепада обработанного изображения с Δ=30,3 до Δ=204,3. Однако при увеличении маски фильтра происходит изменение максимальной ширины дефекта до 1,5 раз.

Проведенные исследования показывают, что использование фильтра *Laplace* с матрицами 3х3 и 5х5 дает возможность выделить границы линейных пороков при обработке изображений стекол без изменений их размеров, что позволяет повысить коэффициент выделения дефектов (для стекол соответственно пороков) при оценке качества стекла.

Алгоритм детектирования порока «царапина» представлен на рисунке 4.20.

Помимо использования теневого признака и фильтрации изображения, классификацию дефектов можно проводить по статистическим критериям. В [27]

представлена методика выделения линейных и эллипсовидных объектов на изображении на основе расчета коэффициента корреляции, которая может быть применима для таких дефектов, как царапина, скол, пузырь, свиль, камень.

Таблица 4.2 – Перепады яркости исходного и обработанного фильтром *Laplace* 3x3, 5x5 и 7x7 изображения

перепад яркости исходного изображения			перепад яркости обработанного изображения фильтром *Laplace* 3x3		
max	min	Перепад пары точек исходного изображения	max	min	Перепад пары точек обработанного изображения
173	141	Δ_1=32	160	7	Δ_1=153
180	145	Δ_2=35	124	0	Δ_2=124
168	138	Δ_3 =30	63	0	Δ_3 =63
159	128	Δ_4 =31	50	0	Δ_4 =50
151	134	Δ_5 =17	73	3	Δ_5 =70
161	142	Δ_6 =19	63	0	Δ_6 =63
167	140	Δ_7 =27	71	0	Δ_7 =71
157	138	Δ_8 = 19	20	4	Δ_8 =16
211	155	Δ_9 = 56	255	0	Δ_9 =255
172	135	Δ_{10} =37	52	0	Δ_{10} =52
Δ = 30,3			**Δ** = 91,7		
перепад яркости обработанного изображения фильтром *Laplace* 5x5			перепад яркости обработанного изображения фильтром *Laplace* 7x7		
max	min	Перепад пары точек исходного изображения	max	min	Перепад пары точек обработанного изображения
139	0	Δ_1=139	255	0	Δ_1=255
255	0	Δ_2=255	255	0	Δ_2=255
126	0	Δ_3 =126	255	0	Δ_3 =255
95	0	Δ_4 =95	255	0	Δ_4 =255
214	24	Δ_5 =190	255	230	Δ_5 =25
99	0	Δ_6 =99	255	0	Δ_6 =255
181	0	Δ_7 =181	255	0	Δ_7 =255
127	0	Δ_8 =127	255	22	Δ_8 =233
255	132	Δ_9 = 123	255	255	Δ_9 =0
255	0	Δ_{10} =255	255	0	Δ_{10} =255
Δ = 159			Δ =204,3		

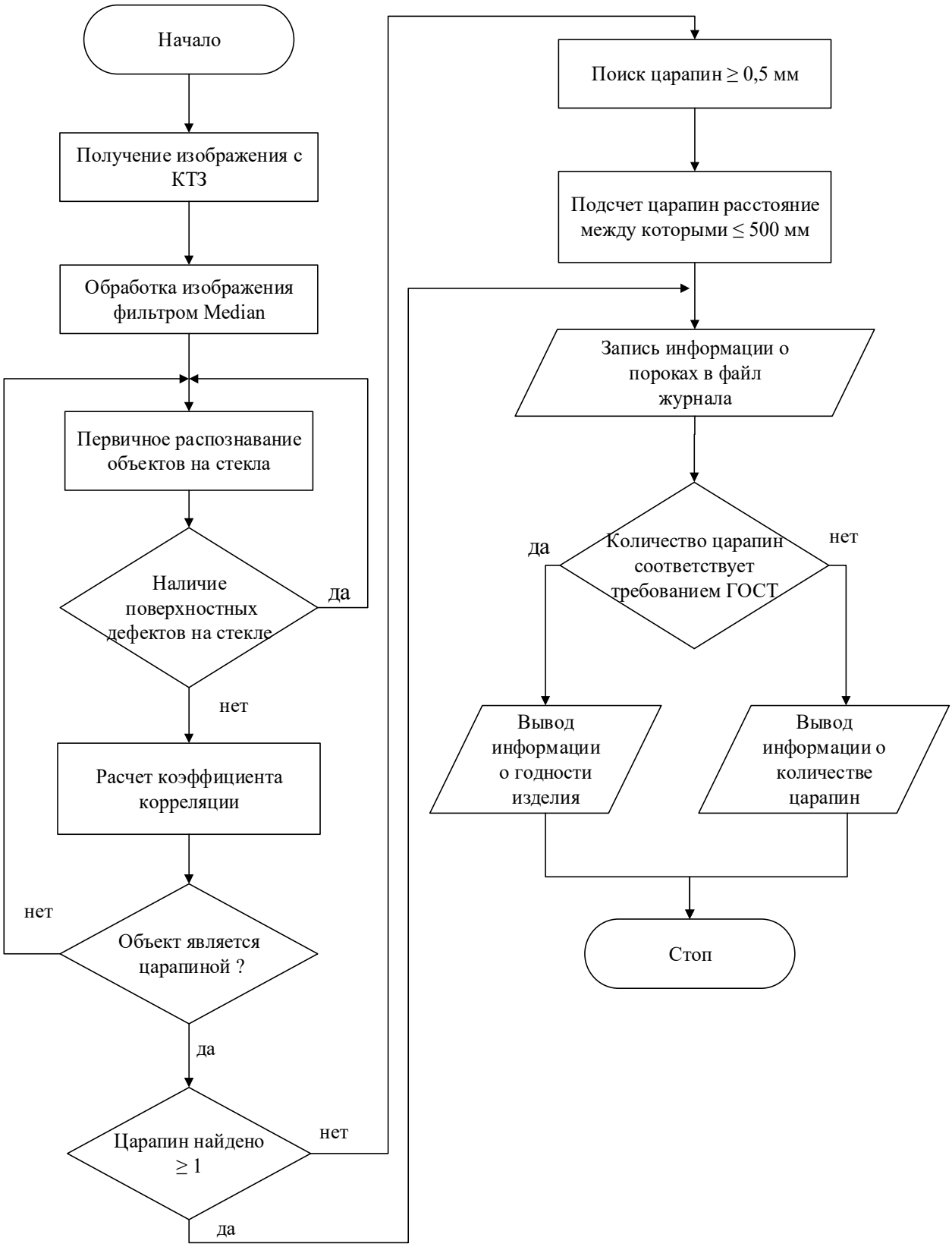


Рисунок 4.20 – Блок-схема алгоритма детектирования порока «царапина»

Рассмотренная методология распознавания дефектов стекла может быть применена как в лабораторных исследованиях, так и на предприятиях изготовителях стекла и изделий из стекол (стеклопакетов).

Следует обратить внимание на подбор параметров фильтров при обработке изображения, которая может принести как положительный (удаление на изображении объектов, не являющихся дефектами), так и отрицательный результат (удаление искомых объектов) при классификации дефектов.

Из нерешенных задач открытой остается определение глубины залегания дефектов. Несмотря на то, что данный параметр не нормирован национальными стандартами, он является важным при оценке критичности дефекта и влиянии на эксплуатационные характеристики изделий из стекла.

4.2 Контроль геометрии изделий типа «тело вращения»

Особенностью использования геометрического метода контроля с пространственным разрешением (проекционного) осесимметричных деталей состоит в том, что контролируется основная формообразующая поверхность посредством контроля сечений. Если требуется оценить качество изделия по совокупности параметров на основе 3D модели объекта контроля, то в процессе получения информации требуется поворачивать деталь для получения совокупности сечений.

При контроле объемных объектов одними из основных источников погрешности определения геометрических параметров являются искажения изображений вследствие перспективных и краевых эффектов преломления света на исследуемом предмете. Появление перспективного изображения, искажение формы объекта и «размытие» границ происходит в силу зависимости линейного увеличения от расстояния до контролируемой точки и разнонаправленности лучей света. Минимизировать погрешности измерения можно, стабилизировав внешние условия процесса измерения.

Как было отмечено ранее в п. 4.1.1, использование телецентричной оптики с коллимированным источником подсветки позоляет сохранять заданный коэфициент линейного увеличения во всем рабочем диапазоне. Оптическая схема системы контроля в проходящем свете для тел вращения представлена на рисунке 4.21 [69, 70]. На рисунке обозначены: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – объект; 4 и 6 – оптические элементы телецентрического объектива; 5 – апертурная диафрагма; 7 – фотоприемная матрица.

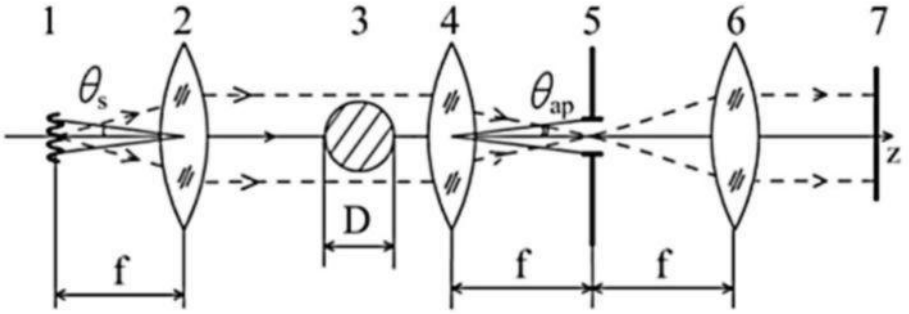
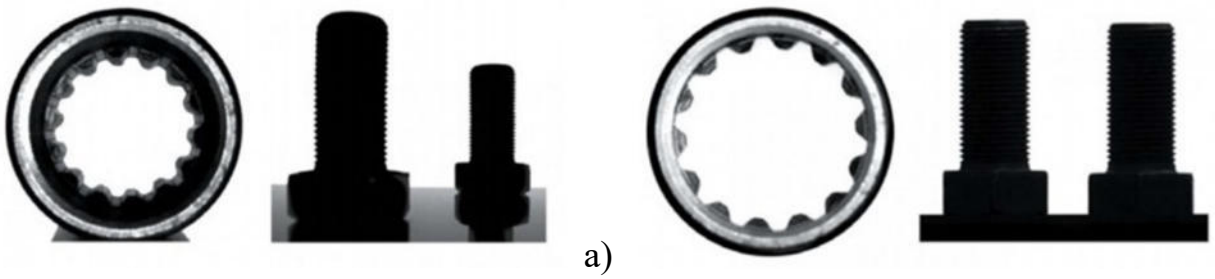


Рисунок 4.21 – Оптическая схема системы контроля в проходящем свете

Применение телецентрической оптики в проходящем свете колиматорного осветителя (световым пучком с плоским волновым фронтом) помимо минимизации перспективных искажений и увеличения глубины резкости позволяет минимизировать «посторонние» засветки, что особенно важно при контроле тел вращения, имеющих в отличие от плоских объектов параметры глубины изображения, что наглядно представлено на рисунке 4.22 [278].



а) б)

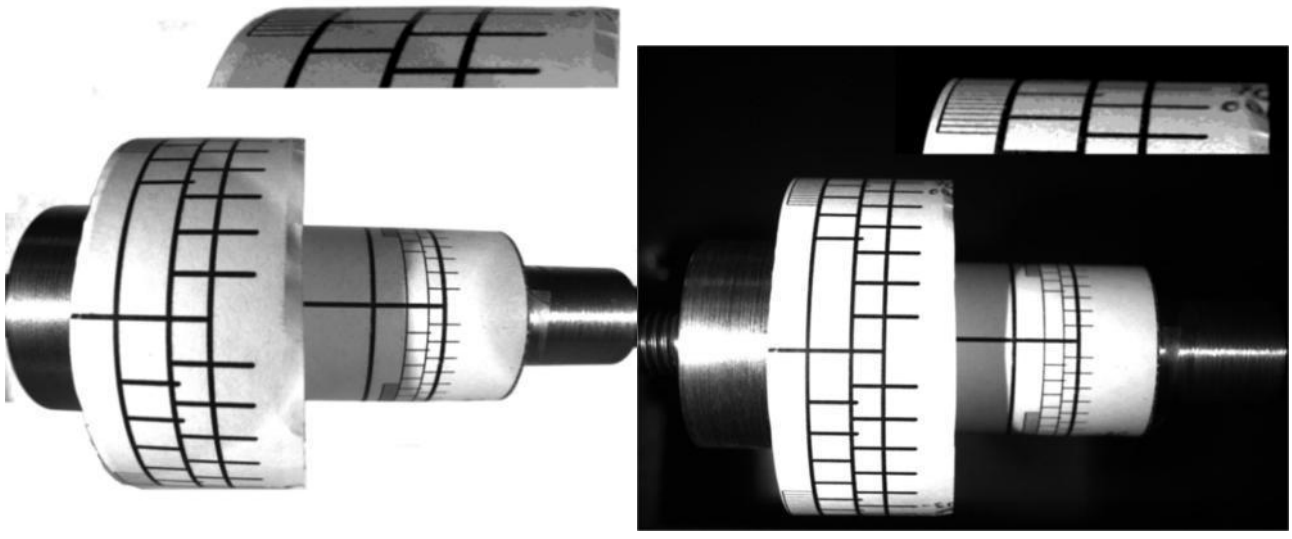
Рисунок 4.22 – Изображения одинаковых деталей, отстоящих на разном расстоянии от объектива, полученные с помощью: объектива с фиксированным фокусным расстоянием (а) и телецентрического (б) объектива

Показанная схема позволяет проводить измерения только в контролируемой области, размеры которой не должны превышать диаметр поля зрения объектива, составляющего не более 250…300 мм, и следовательно, его применение для измерения больших диаметров затруднительно, так как требует использования высококачественной широкоапертурной и дорогостоящей оптики.

4.2.1 Особенности контроля изделий типа «тел вращения» цифровой камерой с объективом с фиксированным фокусным расстоянием

Рассмотрим получение изображения тела вращения цифровой камерой с объективом с фиксированным фокусным расстоянием, полагая оптическую систему идеальной.

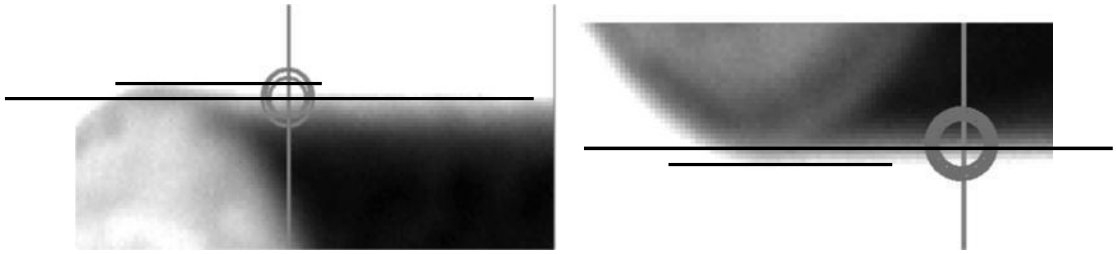
На рисунке 4.23 представлены изображения детали «Ступенчатый валик» D_{max}= 49,27 мм, выполненные цифровой камерой *Basler PILOT piA*2400-17*gm* с объективами с *f*=6 мм – *Ricoh FL-HC0612A*-VG и с *f* =12 мм – *Computar M1214-MP2*. Для наглядности на поверхность нанесена шкала, отградуированная в градусах. Шкала справа имеет цену деления в 10°.



а) б)

Рисунок 4.23 – Изображение детали «Ступенчатый валик» с увеличенным фрагментом шкалы:
а) объектив с *f* = 6 мм и б) объектив с *f* =12 мм

Из рисунка видно, что видимое значение соответствует для 6 мм чуть больше 60°, а для 12 мм объектива около 70 градусов. Разница в наблюдаемом и действительном размерах сечений тела вращения наглядно продемонстрирована на рисунке 4.24.



f = 6 мм

Рисунок 4.24 – Фрагмент изображения детали в окне поиска края объекта

На рисунке 4.25 представлена схема формирования 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 (4.10):

$$\gamma_D = \arctan\frac{D/_2}{L-f} \quad , \tag{4.10}$$

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

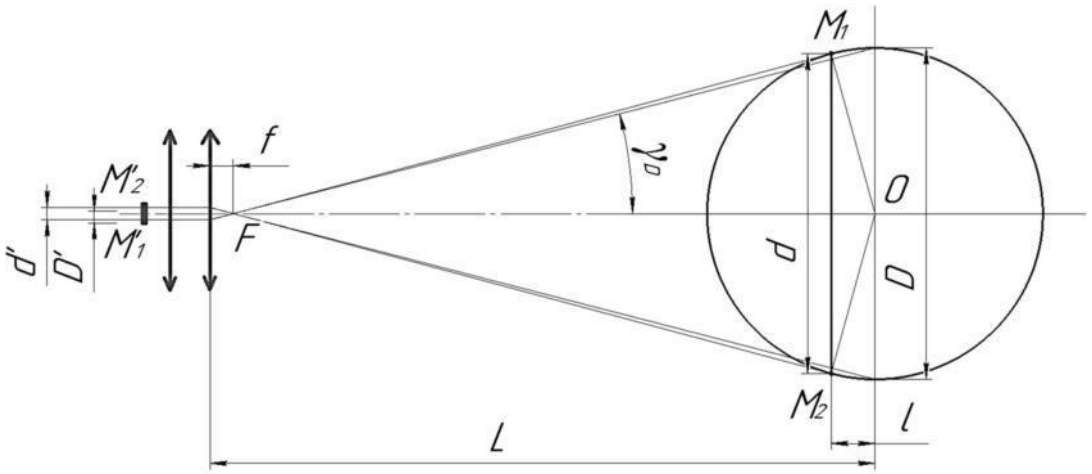


Рисунок 4.25 – Формирование изображения тела вращения цифровой камерой, оснащенной объективом с фиксированным фокусным расстоянием

Из рассмотрения рисунка 4.25 видно, что фиксируемый прообраз сечения тела вращения *D* имеет видимый размер *d,* наблюдаемый соответственно под углом$\gamma_d \geq \gamma_D$.

Для наглядности представления на рисунке 4.26 показаны соотношения углов наблюдения для различных диаметров для случая использования объектива с фокусным 7 мм.

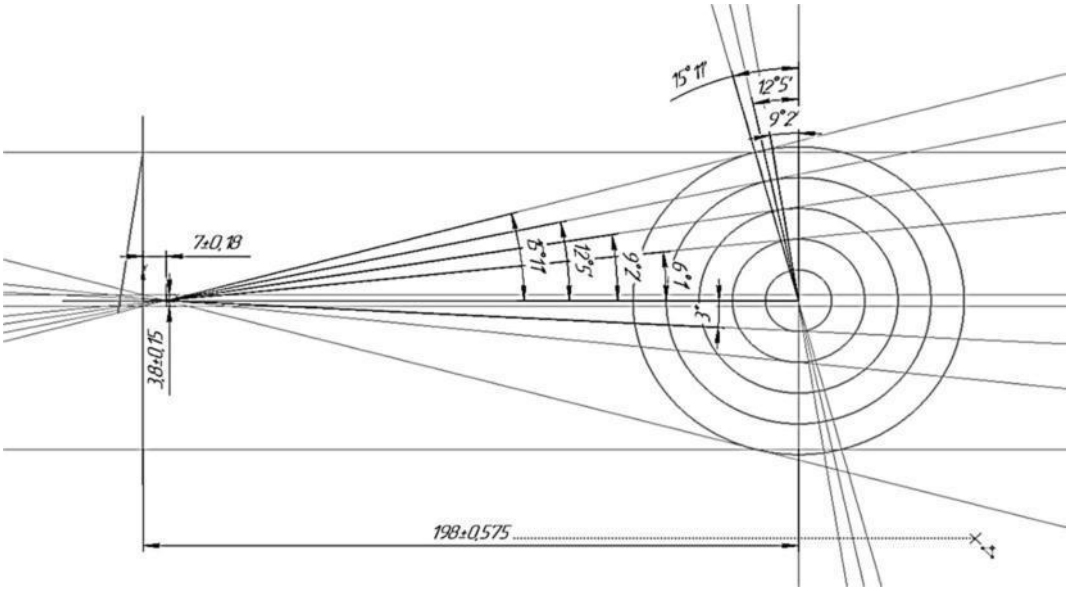


Рисунок 4.26 – Формирование изображения тела вращения камерой с объективом f=7 мм

Из треугольника M_1OF можно определить значение угла наблюдения γ_d, проходящего через фокус к видимому размеру поверхности вращения радиусом d по формуле (4.11):

$$\gamma_d = \arcsin\frac{D/_2}{L-f} \quad , \tag{4.11}$$

Из рисунка 4.23 видно, что фиксируемый прообраз сечения тела вращения *D* имеет видимый размер *d* (4.12):

$$d = D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{D/_2}{L-f}\right)^2} \, . \tag{4.12}$$

Видимое изображение меньше объекта, причем с уменьшением фокусного расстояния эта разница только растет. При этом видимый размер *d* смещается вдоль оптической оси на расстояние *l*, которое можно определить по (4.13):

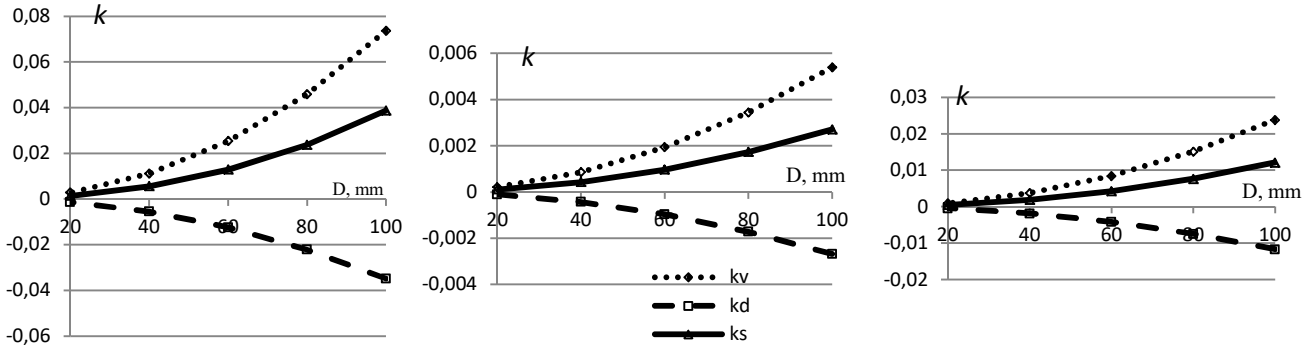
$$l = \frac{D^2}{4 \cdot (L-f)} \quad . \tag{4.13}$$

Из анализа рисунка 4.25 видно, что размер образа сечения тела вращения по оси симметрии D' меньше изображения видимого d' [249]. Это наглядно видно из хода вспомогательных лучей, проходящих через фокус. Это приводит к возникновению ошибок при измерении размеров поверхностей вращения. Величины относительной погрешности определения размеров тела вращения при использовании цифровых камер объективов с фокусным расстоянием 7, 12 и 25 мм представлены как зависимости составляющих погрешностей и суммарная погрешность от отношения определяемых размеров к величине поля зрения *D/B* на рисунке 4.27.

Из анализа графиков видно, что для рассмотренных фокусных расстояний уменьшение фиксируемого размера, обозначенное k_d, происходит медленнее изменения коэффициента увеличения k_v, связанного со смещением на расстояние l вдоль оптической оси. Коэффициенты можно вычислить по (4.14):

$$k_d = \frac{d}{D} \ , \ k_v = \frac{V}{V_l - 1}, k_s = k_d + k_v \ , \tag{4.14}$$

где: V – коэффициент линейного увеличения в плоскости калибровки, $V_l = \frac{f}{(L-f-l)}$ коэффициент линейного увеличения в плоскости смещенной на расстояние l от плоскости калибровки, k_s – суммарное уменьшение фиксируемого размера.



а) в) б)

Рисунок 4.27 – Коэффициенты влияния погрешностей смещения сечения k_v, изменения размера k_d и суммарной погрешности k_s на полученные значения диаметров, для систем с фокусным расстоянием: а) -7 мм, б) - 12 мм, в) - 25 мм

Оценим величину перспективной погрешности, основываясь на законах геометрической оптики без учета искажений в передаточном тракте. Тогда образ d' сечения тела вращения на матрице цифровой камеры можно определит зависимостью (4.15):

$$d' = d \cdot \left(\frac{f}{L-l-f}\right) \quad . \tag{4.15}$$

При использовании простой калибровки по тест-объекту, размещённому перпендикулярно оптической оси и совмещенному с осью симметрии тела вращения, относительную погрешность определения его размера можно вычислить по формуле (4.16):

$$\delta D = \frac{d'/_V - D}{D} \quad , \tag{4.16}$$

где V – коэффициент линейного увеличения.

На основе полученной зависимости построен график (на рисунке 4.28), на котором показаны суммарные погрешности определения размеров ступенчатого тела с D ступеней 20, 40, 60, 80 и 100 мм цифровой камерой с f = 7, 12 и 25 мм, при расположении объекта контроля на расстоянии L = 198, 340 и 708 мм соответственно.

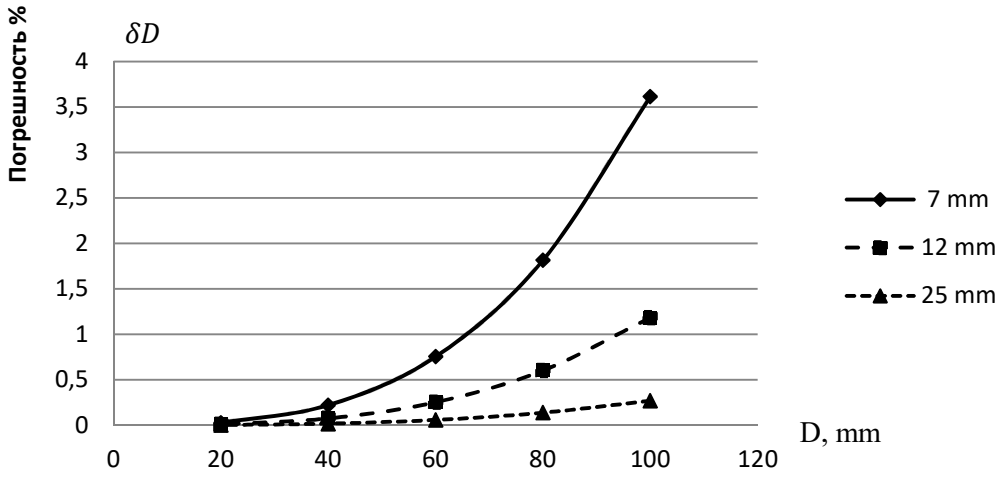


Рисунок 4.28 – Суммарные погрешности определения размеров тела вращения, для систем с фокусным расстоянием 7, 12 и 25 мм

Для компенсации перспективной погрешности можно использовать зависимости (4.17) и (4.18):

$$D = D_{\text{нк}} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{d'}{2f}\right)\right) \tag{4.17}$$

или

$$D = D_{\text{нк}} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{D_{\text{нк}}}{2(L-f)}\right)\right) \quad , \tag{4.18}$$

где $D_{\text{нк}}$ – диаметр, полученный в результате измерений по изображению.

Используя полученную зависимость для коррекции перспективной погрешности, можно значительно повысить точность определения размеров. Результаты моделирования коррекции ошибки для идеальной оптической системы при определении размеров элементов вращения представлены на рисунке 4.29.

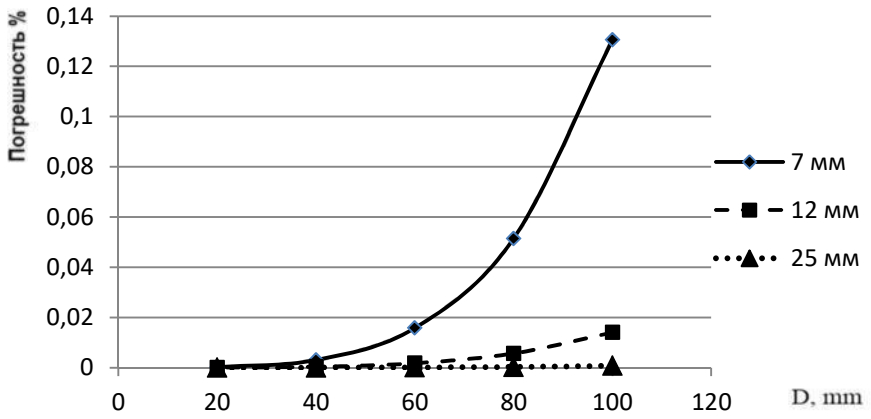


Рисунок 4.29– Оценка погрешности определения размеров тела при использовании коррекции перспективной погрешности

Источником погрешности при контроле тел вращения является также смещение оси симметрии тела вращения относительно оптической оси. Оценим его влияние. Для этого рассмотрим схему формирования изображения, которая представлена на рисунке 4.30.

При смещении оси симметрии тела вращения относительно оптической оси цифровой камеры на *y* происходит поворот изображения на угол α, определяемый зависимостью (4.19):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y}{L-l}\right) \quad . \tag{4.19}$$

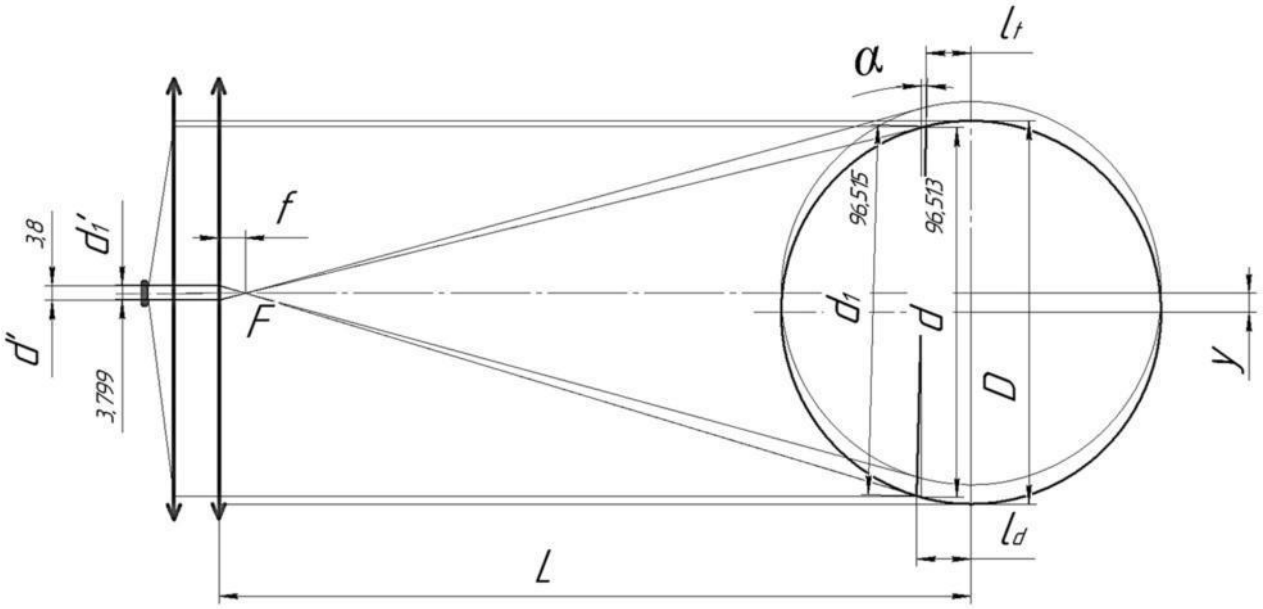


Рисунок 4.30 – Схема формирования изображения поверхности вращения при смещении оптической оси относительно оси симметрии тела

Это приведет к смещению изображения в горизонтальной плоскости и изменению размера изображения на величину Δ_α, определяемую по формуле (4.20):

$$\Delta_\alpha = D \cdot \cos\alpha. \quad . \tag{4.20}$$

То есть рассмотренные факторы будут вызывать проекционную погрешность.

На рисунке 4.31 приведен график зависимости относительной погрешности определения размеров тел вращения при нарушении условия пересечения оси симметрии тела вращения оптической оси цифровой камеры, представленный в относительном виде зависимости для объективов с f=6 мм и L = 39 мм и f= 12 мм и L = 145 мм.

Таким образом, для минимизации данной погрешности при настройке поля зрения цифровой камеры следует стараться обеспечить условие пересечения оптической оси с осью вращения контролируемого тела, а при невозможности соблюдения данного условия учитывать это поправочным коэффициентом.

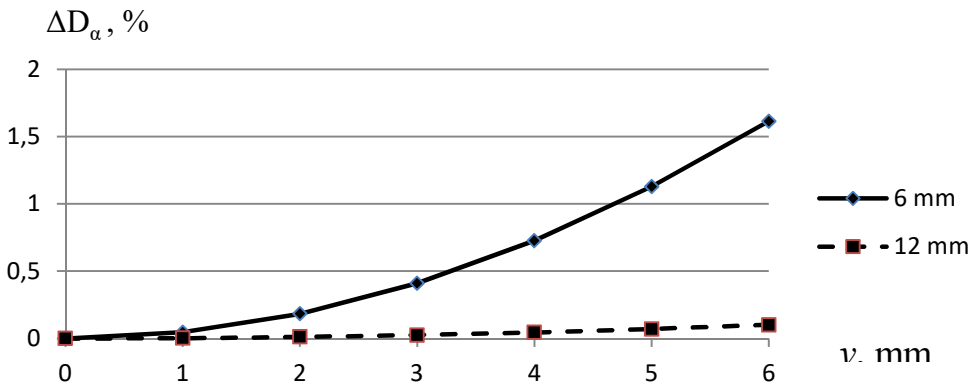


Рисунок 4.31 – Величина погрешности определения диаметральны размеров тел вращения при не пересечении оптической оси с ось вращения контролируемой детали

Для компенсации проявления перспективной погрешности в горизонтальной плоскости необходимо учесть изменение коэффициента линейного увеличения при смещении видимого изображения вдоль оси x на l, которое может быть определено по формуле 4.8. Сечение наблюдается под углом угол ν, который можно определить из зависимости (4.21):

$$\nu = \arcsin\frac{z}{L-f} \quad , \tag{4.21}$$

где z – смещение относительно оптической оси вдоль оси симметрии тела вращения.

Тогда изменение Δl можно определить из зависимости (4.22):

$$\Delta l = \frac{D^2(1-\cos\nu)}{4\cdot(L-f)} \quad . \tag{4.22}$$

Таким образом, при контроле основных формообразующих размеров тел вращения цифровыми камерами с фиксированной оптической системой нужно дополнительно к погрешностям, рассмотренным в п. 3.2, учитывать: проекционную погрешность, погрешность нарушении условия пересечении оси симметрии тела вращения оптической оси цифровой камеры и перспективной погрешности в горизонтальной плоскости.

4.2.2 Особенности калибровки проекционной системы контроля изделий типа «тела вращения»

При калибровке системы контроля тел вращения следует добиваться условия перпендикулярности тест-объекта оптической оси объектива, поскольку его смещение вызовет проекционную погрешность, величину которой можно оценить выражением (4.23):

$$\Delta_\beta = D \cdot \cos\beta. \qquad (4.23)$$

где β – угол наклона тест-объекта.

На рисунке 4.32 приведен график зависимости относительной погрешности определения диаметральных размеров тела вращения от угла наклона тест-объекта при нарушении условия его перпендикулярности оптической оси объектива.

Если задаться требуемой относительной погрешностью измерений в ± 0,05% – допустимыми будут отклонения тест-объекта до 1°.

Отклонения менее 3° плохо регистрируются визуально (рисунок 4.33), поэтому необходимо разработать методику определения положения тест-объекта.

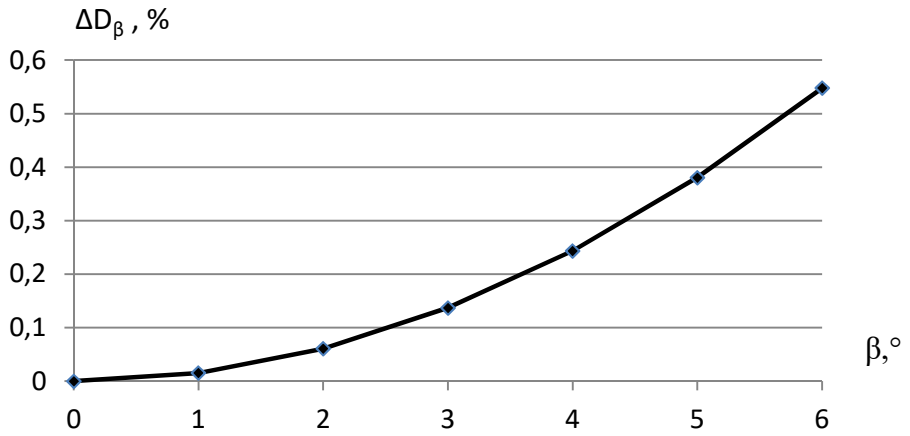


Рисунок 4.32 – Величина погрешности определения диаметральных размеров «тел вращения» при нарушении условия перпендикулярности к оптической оси

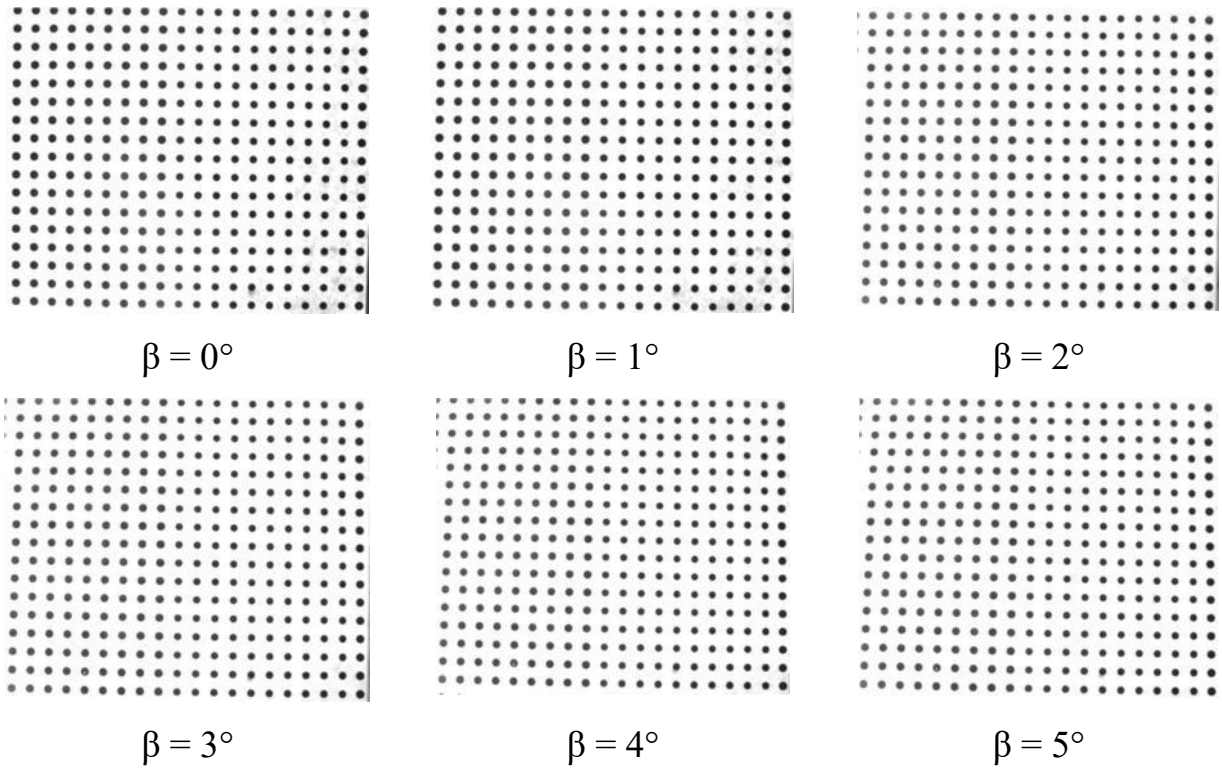


Рисунок 4.33 – Изображения тест-объекта при разных углах его наклона

Поскольку оптическая ось является неявно выраженной базой для определения положения тест-объекта, необходимо разработать алгоритм определения параметров его положения на основе анализа параметров изображения тест-объекта. Основой для этого алгоритма являются положения классической геометрической оптики, вполне корректно описывающей формирование изображения без привлечения теории дифракции. Исходя из ее положений, каждая прямая линия имеет сопряженную ей прямую линию в пространстве изображений. Исходя из этого положения, рассматривая сопряженные отрезки *AB* и *CD* и их изображения *AB′* и *CD′* можно утверждать, что если расстояние *AB=CD* (рисунок 4.34), то условием равенства изображений этих отрезков *AB′=CD′* будет их симметричное расположение относительно оптической оси, которое будет означать равное удаление от главной плоскости и соблюдение условия перпендикулярности тест-объекта оптической оси. При несоблюдении данного условия определить угол наклона можно, сравнивая размеры изображений *AB′* и *CD′*.

Известными параметрами для расчета являются расстояния между опорными точками тест-объекта *AB*=*CD* и размеры изображений $\mathrm{AB}'_{\mathrm{p}}$ и $\mathrm{CD}'_{\mathrm{p}}$ (определяемые в px), фокусное расстояние объектива *f*. Для упрощения введем несколько допущений. Будем полагать, что отрезки *AB*, *CD* и *AD*, *BC* расположены симметрично относительно оптической оси. При малых углах наклона тест-объекта (до 5°) такие допущения не вызовут серьезных ошибок.

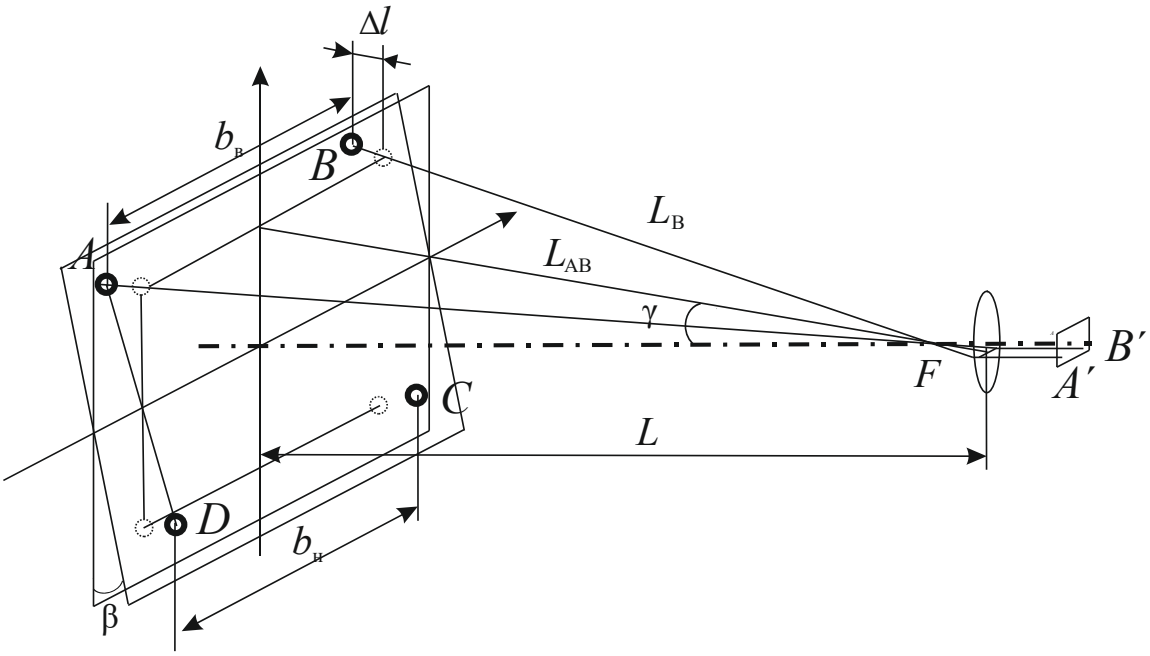


Рисунок 4.34 – Расчетная схема для контроля положения тест-объекта

Для определения угла наклона тест-объекта β нужно определить значение Δl – изменения расстояния до опорных точек. При принятых малых углах отклонений β погрешностью хода лучей, определяемых углом γ пренебречь. Тогда β можно вычислить по (4.24):

$$\beta = \arctan\frac{2\Delta l}{AD} \tag{4.24}$$

Для расчета Δl используем базовые зависимости геометрической оптики – (2.2) и (2.4), на основании которых линейное увеличение V_{AB} можно определить по формулам (4.25):

$$V_{AB} = \frac{AB'}{AB} \quad \text{и} \quad V_{AB} = \frac{f}{X_{L_{AB}} - f} \quad . \tag{4.25}$$

Откуда можно вычислить рабочее расстояние до отрезка *AB* по зависимости (4.26):

$$X_{L_{AB}} = f \cdot \left(\frac{AB}{AB'} + 1\right) \tag{4.26}$$

Приняв упрощения малости углов и зная, что рабочее расстояние можно определить по (4.27):

$$X_{L_{AB}} = \frac{L_{AB}}{\cos\gamma} \ , \tag{4.27}$$

получим соотношение (4.28):

$$\frac{L_{AB}}{\cos\gamma} = \frac{L}{\cos\gamma} + \Delta l \tag{4.28}$$

где $\gamma = \tan^{-1}\frac{(AD'_p + BC'_p)\cdot p}{4f}$, $AB'_p, BC'_p, CD'_p, AD'_p$ — расстояние между контрольными точками [*px*], p – размер пикселя.

Откуда изменение расстояния можно определить по (4.29):

$$\Delta l = \frac{L_{AB}}{\cos\gamma} - \frac{L}{\sin\gamma} \tag{4.29}$$

Используя допущение о симметричности отрезков *AB*=*CD* относительно оптической оси, определим расстояние до тест-объекта по (4.30):

$$L = f \cdot \left(\frac{2}{\left(\frac{AB'}{AB} + \frac{CD'}{CD}\right)} + 1\right) \quad , \tag{4.30}$$

или при подстановке размеров изображений в *px* по (4.31):

$$L = f \cdot \left(\frac{2}{\left(\frac{AB'_p \cdot p}{AB} + \frac{CD'_p \cdot p}{CD}\right)} + 1\right) \quad . \tag{4.31}$$

Тогда, используя (4.29) и (4.31), получим (4.32):

$$\Delta l = f \cdot \left(\frac{AB}{AB'_p \cdot p} + 1\right) - \frac{f \cdot \left(\frac{2}{\left(\frac{AB'_p \cdot p}{AB} + \frac{CD'_p \cdot p}{CD}\right)} + 1\right)}{\cos\left(\arctan\frac{(AD_p + BC_p)\cdot p}{4f}\right)} . \tag{4.32}$$

Подставив (4.32) в (4.24), получим можно определить значение угла наклона тест-объекта β по формуле (4.33):

$$\beta = \tan^{-1}\frac{2f\cdot\left(\left(\frac{AB}{AB'_p\cdot p'}+1\right)-\frac{\left(\frac{2}{\left(\frac{AB'_p\cdot p}{AB}+\frac{CD'_p\cdot p}{CD}\right)}+1\right)}{\sin\left(\arctan\frac{(AD_p+BC_p)\cdot p}{4f}\right)}\right)}{AD} \quad . \qquad (4.33)$$

Упростив (4.33) получим окончательное выражение для определения угла наклона тест-объекта (4.34):

$$\beta = \arctan\frac{2f\cdot\left(\left(\frac{AB}{AB'_p\cdot p}+1\right)-\left(\frac{2}{\frac{AB'_p\cdot p}{AB}+\frac{CD'_p\cdot p}{CD}}+1\right)\cdot\sqrt{1+\left(\frac{\left(AD'_p+BC'_p\right)\cdot p}{4f}\right)^2}\right)}{AD} \quad . \qquad (4.34)$$

По аналогичной зависимости можно рассчитать и наклон плоскости калибровки в перпендикулярном направлении по (4.35):

$$\vartheta = \arctan\frac{2f\cdot\left(\left(\frac{AD}{AD'_p\cdot p}+1\right)-\left(\frac{2}{\frac{AD'_p\cdot p}{AD}+\frac{BC'_p\cdot p}{BC}}+1\right)\cdot\sqrt{1+\left(\frac{\left(AB'_p+CD'_p\right)\cdot p}{4f}\right)^2}\right)}{AD} \quad . \qquad (4.35)$$

Информация о положении тест-объекта может быть использована как для коррекции его положения перед процедурой калибровки, так и для реализации алгоритма компенсации [250].

4.2.3 Компенсация погрешности положения объекта контроля

Компенсация погрешности положения объекта контроля при его нефиксированном положении возможна на основании зависимости (2.4), описывающие линейное увеличение системы. На ее основе при смещении объекта контроля на ΔX относительное изменение линейного увеличения можно вычислить по формуле (4.36):

$$\delta V_x = \frac{L_1 - f}{L - f} = \frac{L \pm \Delta X - f}{L - f}, \qquad (4.36)$$

где L и L_1 – рабочие дистанции в позиции калибровки и в текущем положении соответственно; ΔX – смещение тела вращения вдоль оптической оси относительно плоскости, в которой проводилась калибровка первой камеры. Определение смещения изделия от положения калибровки вычисляется по изображению со второй камеры.

Тогда размеры осесимметричного тела можно определить по (4.37):

$$D = D_{\text{р}} \cdot k_x \quad , \tag{4.37}$$

где $k_x = \frac{L \pm \Delta X - f}{L - f}$.

Поскольку при определении положения осесимметричного тела в перпендикулярной плоскости (или по соотношениям изображений) в общем случае имеется та же погрешность определения положения, то компенсация будет неполной. Достигнуть нужной степени приближения можно, сделав несколько итераций уточнения положений.

Введение поправочного коэффициента на основе данной зависимости позволит компенсировать основную составляющую погрешности определения размеров осесимметричных изделий. Данная методика не позволяет полностью скомпенсировать данную погрешность из-за возникающей ошибки определения положения стержня (для рассматриваемых камер 1,8… 2,5%). Некомпенсированная погрешность определения диаметра штыря σD для смещений в пределах ± 5% от расстояния X_P до плоскости контроля не превысит 0,06 и 0,03% для камер 2 и 5 МРх соответственно (рисунке 4.35).

Реализовать такой метод компенсации возможно при использовании **системы контроля осесимметричных изделий с двумя камерами, расположенными под углом 90°** (рисунке 4.36). Такая схема получения измерительной информации позволяет учесть и скомпенсировать доминирующую для нефиксированного положения объекта контроля составляющую погрешности определения размеров тел вращения – позиционирования объекта относительно цифровой камеры [16, 171]. На рисунке 4.36 под «Положение 1» определена

позиция изделия, для которой проводилась процедура калибровки, а под «Положение 2» – произвольное положение при производственном контроле.

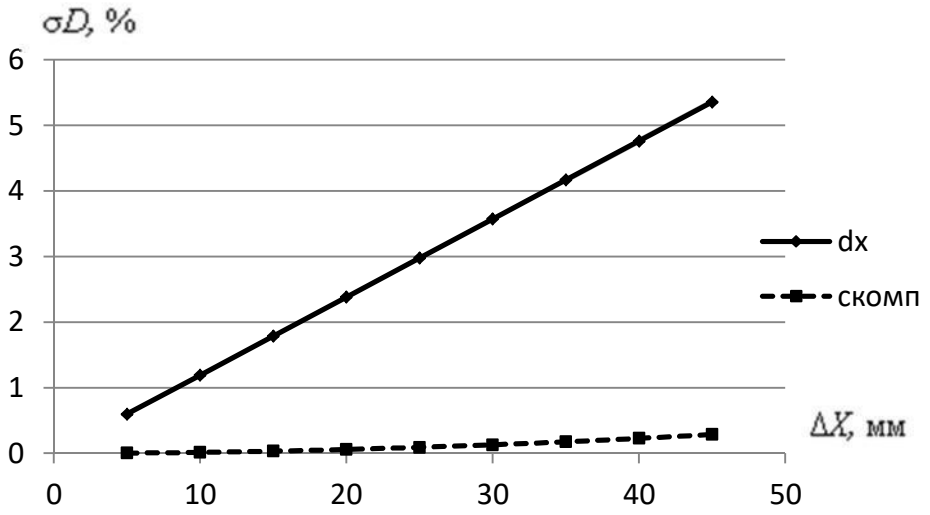


Рисунок 4.35 – Графики ошибок определения линейных размеров без компенсации и с компенсацией положения объекта контроля для камеры с разрешением 5Мп

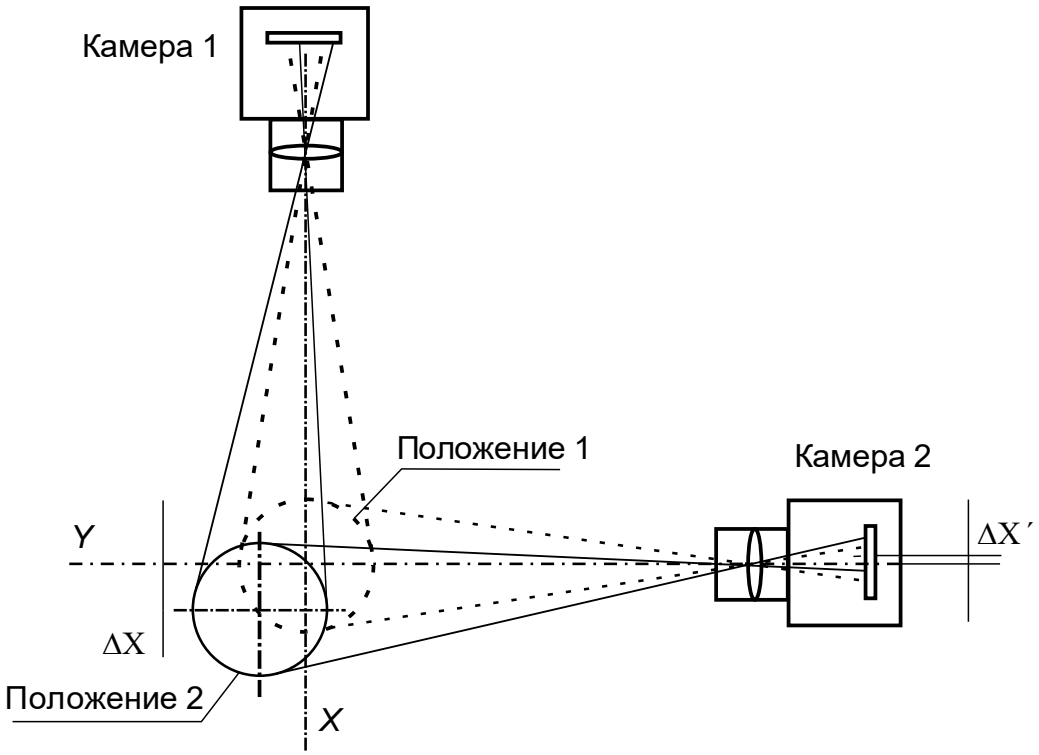


Рисунок 4.36 – Определения погрешности позиционирования

Аналогично для второй камеры можно определить погрешность положения и по оси *Y*. Повторение алгоритма позволит скомпенсировать погрешность положения до заданной величины, однако даже однократное повторение делает погрешность позиционирования несущественной в рамках имеющихся в настоящее время цифровых камер с объективами.

Возможным вариантом совершенствования систем контроля тел вращения путем упрощения структуры системы регистрации является использование свойств оптических преобразователей на базе плоских зеркал – зеркальных преобразователей (ЗП).

Схема системы контроля осесимметричных изделий с угловым зеркальным преобразователем

Рассмотрим расчётную схему системы контроля осесимметричных изделий с зеркальным преобразователем, представленную на рисунке 4.37, полагая оптическую систему идеальной, положение объекта контроля фиксированным и что его ось симметрии пересекает оптическую ось и перпендикулярна ей [128]. Данную расчетную схему можно использовать для расчета как системы с одиночным зеркалом, так и с угловым зеркальным преобразователем (УЗП). Для последнего в качестве упрощения будем считать, что на рисунке 4.37 представлено только одно вторичное (зеркальное) изображение, поскольку закономерности формирования второго будут полностью идентичны.

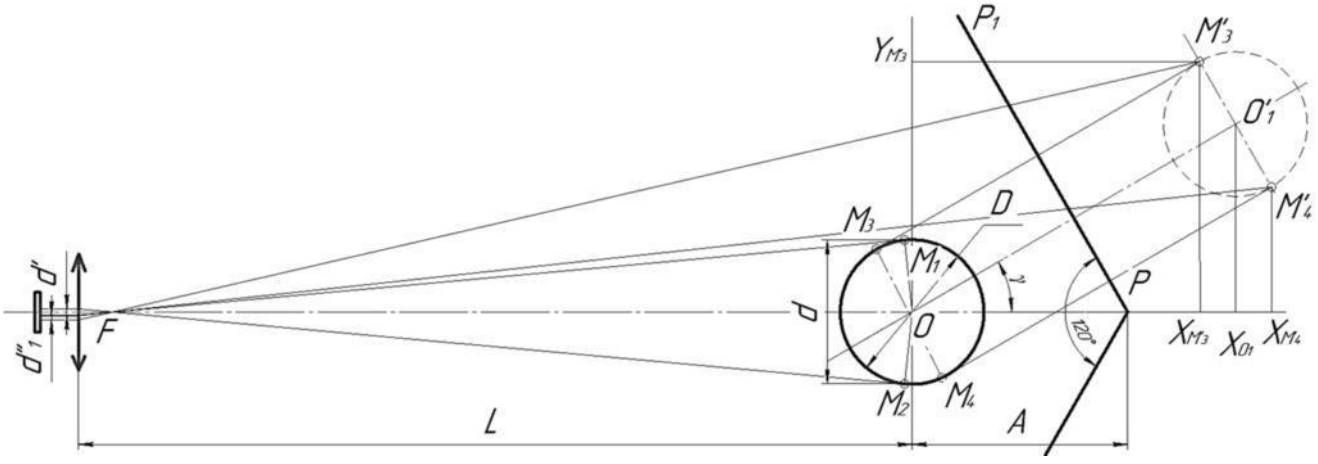


Рисунок 4.37 – Расчетная схема системы контроля с УЗП

Образы M_1 … M_4 показывают крайние наблюдаемые точки изделия, по которым определяем его размеры. При этом M_1 и M_2 регистрируются непосредственно, и для камер с нетелецентрическими объективами оно смещено вдоль оптической оси (закономерности описаны в п. 2.2.1), а M_3 и M_4 через зеркало PP_1, образуя первичные образы $M_3^{'}$ и $M_4^{'}$.

Расстояние между объектом контроля и зеркалом обозначим A. Для максимального использования возможности регистрирующей цифровой камеры, которая достигается за счет минимизации расстояний между образами (первичным $M_1^{'}M_2^{'} = d'$ и вторичным $M_3^{''}M_4^{''} = d_1^{''}$, в пространстве изображений), рекомендуется выбирать соотношение A=(1,5…2) $\cdot D_{max}$, где D_{max} – максимальный контролируемый размер осесимметричного изделия. При меньшем значении возможно слияние изображений, при большем снижается действительное разрешение контролируемого размера. При нестационарном положении объекта контроля для упрощения алгоритмов обработки изображения при определении величин смещения данное соотношениедолжно быть увеличено.

Известно, что одиночное зеркало PP_1 отображает точку M_3 в точку M_3' по известному закону: изображение M_3' лежит на перпендикуляре к поверхности зеркала, проходящем через предметную точку M_3, и удалено от нее на двойное расстояние между предметной точкой и плоскостью зеркала, т. е. точка M_3 и ее изображение M_3' расположены симметрично относительно плоскости P на одной прямой, перпендикулярной к PP_1.

Определив расстояние между центрами объекта и его изображения в зеркале PP_1 можно по (4.38):

$$OO' = 2A \cdot cos\gamma\ , \tag{4.38}$$

можно вычислить 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, по формулам (4.39) и (4.40):

$$X_{M_3'} = 2A \cdot cos^2\gamma - D/2 \cdot sin\gamma \text{ и } Y_{M_3'} = 2A \cdot cos\gamma \cdot sin\gamma + D/2 \cdot cos\gamma; \tag{4.39}$$

$$X_{M_4'} = 2A \cdot cos^2\gamma + D/2 \cdot sin\gamma \text{ и} Y_{M_4'} = 2A \cdot cos\gamma \cdot sin\gamma - D/2 \cdot cos\gamma. \tag{4.40}$$

На рисунке 3.37 координата $Y_{M_4'}$ не обозначена, чтобы не перегружать схему обозначениями. Значение $Y_{M_3'}$ используется для габаритного расчета оптической системы для контроля системы при стационарном положении объекта контроля. Зависимости, для $Y_{M_3'}Y_{M_4'}$ выведенные для верхнего отражения, будут соблюдаться и для нижнего (не показанного) изображения точек M_5 и M_6, но со сменой знаков. Образ $d_1^{''}$ можно вычислить по формуле (4.41):

$$d_1^{''} = f \cdot \left(\frac{Y_{M_3'}}{L - f + X_{M_3'}} - \frac{Y_{M_4'}}{L - f + X_{M_4'}} \right) . \quad (4.41)$$

Соответственно размер изображения $d_{12}^{'}$ определяется на основании (4.15) выражением (4.42):

$$d_{12}^{'} = \frac{f}{L - f - \frac{D^2}{4 \cdot (L-f)}} \cdot D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{D}{2 \cdot (L-f)} \right)^2}, \quad (4.42)$$

Соотношение размеров изображений d' и $d_1^{''}$ 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) $d'/d_1^{''} = 1{,}484$.

Для учета особенностей реальной оптической системы необходимо проводить процедуру калибровки системы по тест-объекту для каждого изображения отдельно. Особенностью калибровки вторичных (зеркальных) отображений является необходимость использования тест-объектов, размеры которых не должны превышать 1,2…1,5 · D_{max} (чтобы избежать перекрытия изображений). Если задаться относительной эквивалентной погрешностью процедуры калибровки в 1*px* (что составит 0,05% для цифровой камеры с разрешением 5 Мп) допустимыми будут угловые отклонения тест-объекта до ±1° в плоскости, проходящей через ось симметрии объекта контроля.

При определении размеров тела вращения по главному изображению для выбранного объектива с *f*=12мм будет присутствовать проекционная погрешность [249]. Для рассмотренного примера системы контроля она будет равна 0,2 мм или 0,4%.

Рассмотрим методику определения положения объекта контроля при его смещении относительно принятого исходного, когда ось его симметрии находится на пересечении оптической оси с плоскостью калибровки центрального изображения (точка *O*), при его нефиксированном положении.

Оценить величину смещения объекта контроля в плоскости калибровки центрального изображения на Δy (рисунок 4.41), из точки O в $O_{\Delta y}$, возможно по смещению центрального изображения («исходное» положение определяется при выполнении процедуры калибровки). При таком смещении объекта контроля размеры центрального изображения существенно изменяются только в том случае, когда по компоновочным соображениям для регистрации используется цифровая камера с короткофокусным объективом. Использование камер с короткофокусной оптикой приводит к появлению проекционной погрешности, что скажется на точности определения размеров по центральному изображению. Размеры «вторичного» изображения будут меняться, поскольку изменяется положение точек $M_{3\Delta y}$ и $M_{4\Delta y}$ (не обозначена на рисунке 4.38) относительно плоскости зеркал PP_1. При том для рассмотренного примера при смещении Δy=5 мм изображение в зеркале увеличится на 1,49%.

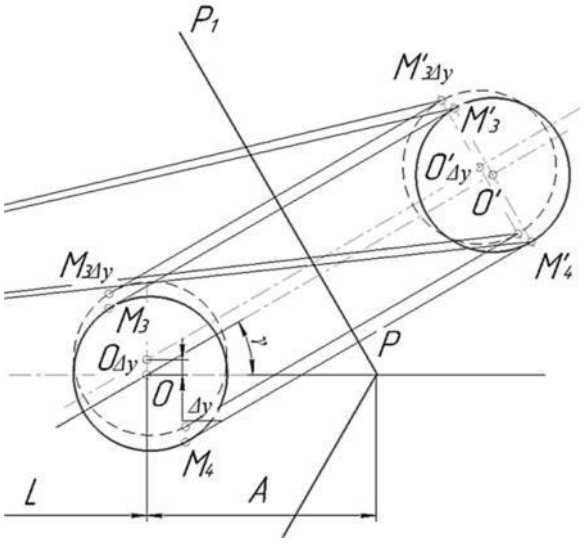


Рисунок 4.38 – Схема смещения зеркального изображения при изменении положения объекта контроля на Δy – поперек оптической оси

Смещение вдоль оптической оси Δx из точки O в $O_{\Delta x}$ (рисунок 4.39) влияет на изменение значений линейного увеличения системы как для вторичных (зеркальных) изображений, так и центрального, что приводит к значительным погрешностям при определении размеров осесимметричного тела. Для компенсации данной погрешности [177] (в пределах до ± 5% от рабочей дистанции L, где изменение калибровочных зависимостей можно принять линейными) нужно определить отклонение объекта контроля от положения калибровки. Для рассматриваемой схемы это можно реализовать 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 простым, но возможна только для системы с УЗП. Тогда на стадии индивидуальной градуировки (калибровки) системы контроля необходимо определить положения центров объекта контроля на всех изображениях в положении калибровки.

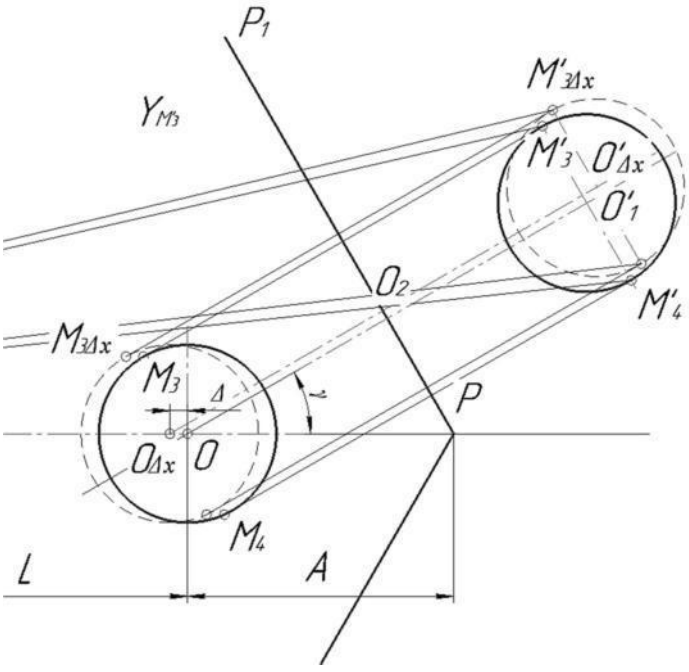


Рисунок 4.39 – Схема смещения зеркального изображения при изменении положения объекта контроля на Δx – вдоль оптической оси

Для определения величины смещения изображения объекта контроля в зеркале рассмотрим схему на рисунке 4.40.

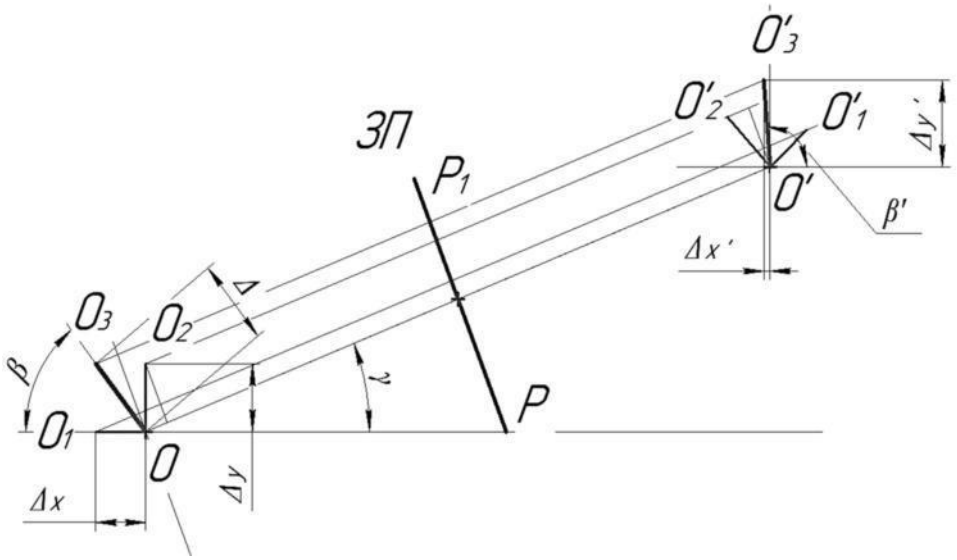


Рисунок 4.40 – Схема формирования изображения в одиночном зеркале

Угол наклона вектора смещения изображения β′можно определить по (4.43):

$$\beta' = 2\gamma + \beta \tag{4.43}$$

где β можно вычислить по формуле (4.44):

$$\beta = \tan^{-1}\frac{\Delta y}{\Delta x} \quad . \tag{4.44}$$

Тогда смещения изображения в зеркале по осям OX и OY можно представить по (4.45):

$$\Delta x' = \Delta xy \cdot \cos\beta' \text{ и } \Delta x\,н' = \Delta xy \cdot \sin\beta' \quad , \tag{4.45}$$

где $\Delta xy = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$.

Используя зависимости (4.39)… (4.42) численно были определены основные геометрические соотношения и расчитаны отношения изображений тела вращения d'/d_1" измерительной системы, которые представлены в таблицах 4.4 и 4.5.

Результаты расчетов сопоставлялись с результатами геометрического моделирования (рисунок 4.39) в ПО Компас и показали полную сходимость (в пределах погрешности отображения в 1 мкм).

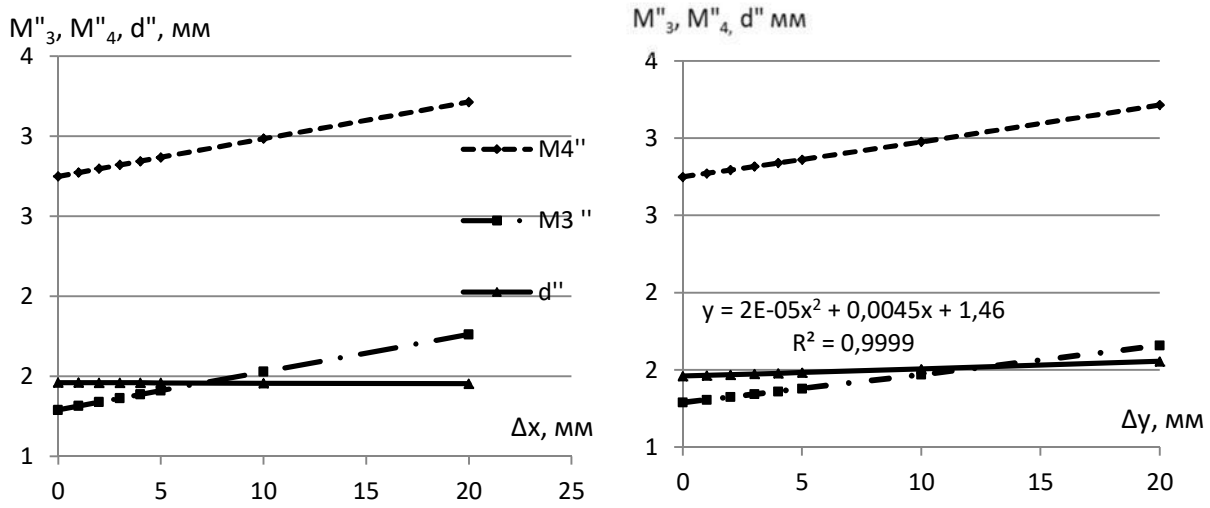
Таблица 4.4 – Координаты и размеры изображения объекта контроля в системе с УЗП при смещении объекта контроля по оси *x*

Смещение контролируемого объекта, мм	M'_1	M'_2	d'	M_3''	M_4''	d_1''	d'/d_1''
0	1,084	-1,084	2,167	2,749	1,289	1,460	1,484
1	1,088	-1,088	2,175	2,773	1,314	1,460	1,490
2	1,092	-1,092	2,183	2,797	1,338	1,459	1,496
3	1,096	-1,096	2,191	2,821	1,362	1,459	1,502
4	1,100	-1,100	2,199	2,844	1,386	1,459	1,507
5	1,104	-1,104	2,207	2,868	1,410	1,458	1,514
10	1,125	-1,125	2,249	2,985	1,528	1,456	1,545
20	1,169	-1,169	2,337	3,214	1,761	1,453	1,608
Изменение положения, мм	0,085	-0,085	0,170	0,465	0,472	-0,007	-
Изменение положения, px	24,638	-24,638	49,275	134,783	136,812	-2,029	-
Относительное изменение положения, px/mm	1,232	-1,232	2,464	6,739	6,841	-0,101	-

Таблица 4.5 – Координаты и размеры изображения объекта контроля в системе с УЗП при смещении объектов контроля по оси *y*

Смещение контролируемого объекта, мм	M'_1	M'_2	d'	M_3''	M_4''	d_1''	d'/d_1''
0	1,084	-1,084	2,167	2,749	1,289	1,460	1,484
1	1,127	1,040	2,167	2,772	1,307	1,464	1,480
2	1,171	0,997	2,167	2,794	1,325	1,469	1,475
3	1,214	0,953	2,167	2,816	1,343	1,474	1,470
4	1,258	0,910	2,167	2,839	1,361	1,478	1,466
5	1,301	0,866	2,167	2,861	1,379	1,483	1,461
10	1,520	0,649	2,168	2,976	1,470	1,506	1,440
20	1,959	0,214	2,173	3,214	1,658	1,556	1,397
Изменение положения, мм	0,875	1,298	0,006	0,465	0,369	0,096	-
Изменение положения, px	253,623	376,232	1,739	134,783	106,957	27,826	-
Относительное изменение положения, px/mm	12,681	18,812	0,087	6,739	5,348	1,391	-

На рисунке 4.41а и 4.41б показаны графики изменения положения координат вторичных изображений точек M''_3 и M''_4 при смещении объектов по осям *x* и *y*.



а) б)

Рисунок 4.41 – Результаты моделирования смещения объектов по осям:
а) – *x* и б) – *y* соответственно

Рассмотренное решение может быть применено к оценке качества шахтных подъемных установок [127].

4.2.4 Алгоритм комплексной компенсации погрешностей системы контроля осесимметричных изделий

На основе полученных аналитических зависимостей, описывающих особенности передачи измерительной информации при контроле осесимметричных изделий разработан алгоритм обработки изображений и коррекции вычисленных значений для комплексной компенсации погрешностей системы контроля тел вращения, который приведен на рисунке 4.42.

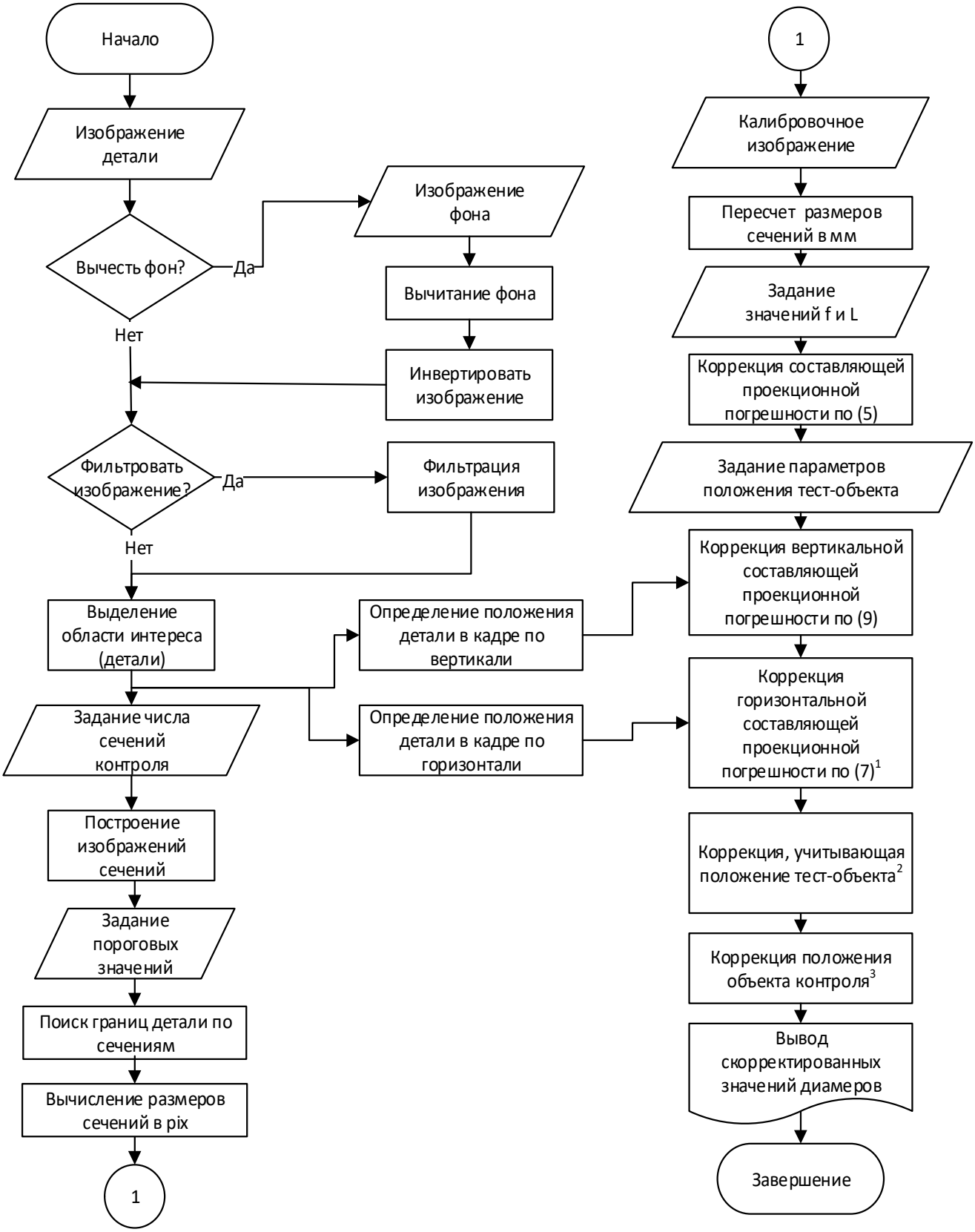


Рисунок 4.42 – Алгоритм комплексной компенсации погрешностей системы контроля осесимметричных изделий

Алгоритм включает основные шаги комплексной компенсации погрешностей определения размеров осесимметричных изделий, такие как вычитание фона, фильтрация изображения, адаптивная бинаризация, калибровка по тест-объекту, а также дополнительные действия по компенсацию перспективных ошибок, погрешностей от смещения оси симметрии тела вращения относительно оптической оси и при нарушения условия перпендикулярности плоскости тест-объекта оптической оси и положения объекта контроля. Для компенсации погрешностей используем дополнительные информативные параметры о положении тест-объекта β, ϑ и объекта измерения L, ΔX.

Коррекция горизонтальной составляющей[1] перспективной погрешности, учитывает поворот тест-объекта α относительно вертикальной оси изменением параметра z (вычисляемого по изображению сечения) из выражения (4.25).

Коррекция, учитывающая положение тест-объекта[2] – β, учитывает нарушение относительно условия перпендикулярности тест-объекта β≠0 оптической оси цифровой камеры (4.23).

Коррекцию положения объекта контроля[3] – ΔX, можно выполнить на основании зависимости измерения линейного увеличения, которое можно вычислить по формуле (4.37).

4.3 Контроль параметров положения

4.3.1 Контроль прямолинейности

Анализ методов и средств измерения, основанных на принципах геометрической оптики, выявил три возможные структуры конструктивного исполнения системы с использованием зеркальных преобразователей [88]:

1) преобразователь перемещается между неподвижными излучателем и приемным устройством (рисунок 4.43).

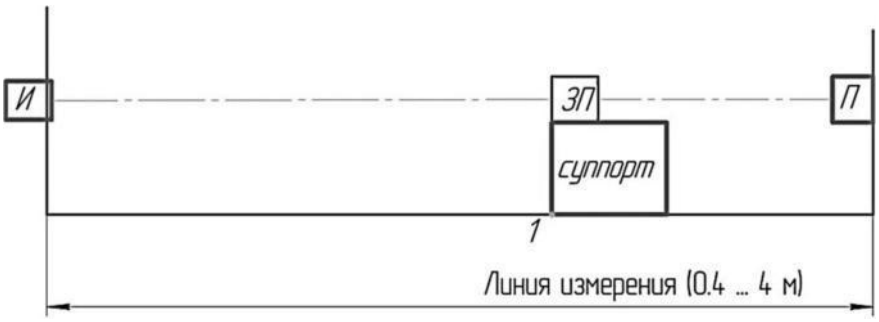


Рисунок 4.43 – Зеркальный преобразователь, перемещающийся между излучателем и приемным устройством

Достоинством такой структуры является возможность обеспечить фиксацию оптической оси объектива; недостатком можно считать зависимость показаний приемного устройства от расстояния между приемным устройством и преобразователем (в случае, когда входной и выходной лучи проходят под углом к горизонту);

2) приемное устройство жестко закреплено относительно преобразователя (рисунок 4.44).

Преимуществом такой структуры является независимость показаний приемного устройства от дальности;

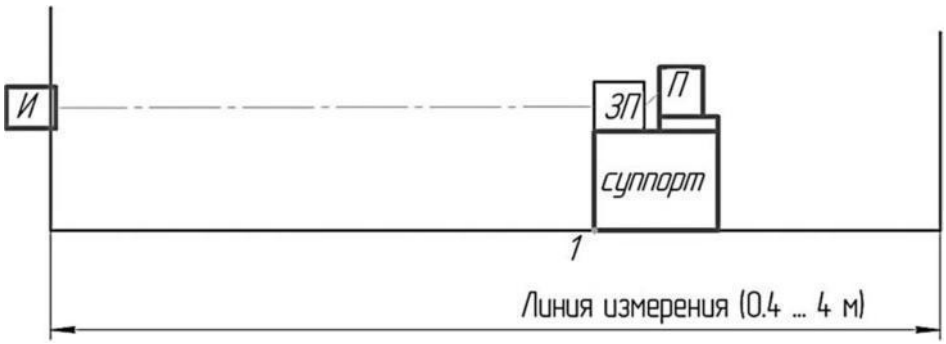


Рисунок 4.44 – Жесткое закрепление приемного устройства относительно преобразователя

3) излучатель и приемное устройство закреплены на одной и той же плоскости (структура с возвращающимся лучом) (рисунок 4.45).

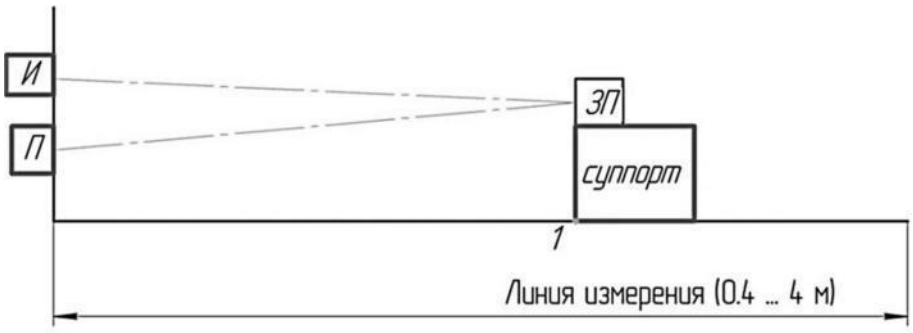


Рисунок 4.45 – Структура с возвращающимся лучом; внизу: влияние непрямолинейности направляющих на преобразователь

Такая структура позволяет обеспечить фиксацию оптической оси объектива, однако в случае негоризонтального положения лучей показания приемного устройства зависят от дальности.

В оптоэлектронных устройствах в качестве носителя информации может использоваться как один луч, так и пучок лучей. В последнем случае в измерительных целях может быть использована также информация о соотношении координат проекций лучей.

4.3.2 Контроль положения плоскости

Для однозначного определения плоскости в пространстве достаточно знать координаты трех точек, не лежащих на одной линии. Примером такого контроля может служить задача определения непараллельности торцевых поверхностей детали или положения плоскости контроя.

Систему контроля непараллельности торцевых поверхностей детали (рисунке 4.46) типа плоской пластины. Непараллельность может быть задана либо максимальной разнотолщинностью Δh_{max}=-h_{max}–h_{min} на диаметре $d_к$, либо углом φ между торцевыми плоскостями. Оба параметра нельзя измерить непосредственно.

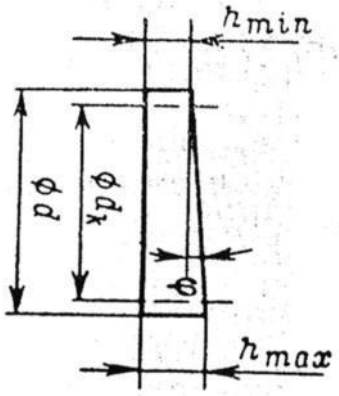


Рисунок 4.46 – Схема контроля непараллельности торцевых поверхностей детали

Максимальная разнотолщинность наиболее просто может быть определена путем непрерывного измерения толщины на окружности d_k и выделения экстремальных ее значений h_{max} и h_{min}.

При этом текущее значение толщины изменяется согласно уравнению (4.46):

$$\Delta h = \frac{1}{2}\Delta h_{max}(1-\cos\alpha), \qquad (4.46)$$

где $\Delta h = h - h_{max}$–приращение текущего значения толщины по отношению к минимальному; α – угол поворота детали от начального положения, соответствующего h_{min}.

Система контроля непараллельности в этом случае включает в себя устройство бесконтактного измерения толщины, фиксации экстремальных значений ее, вычислительное, устройство сравнения и механизм вращения детали или измерителя.

Вращение детали или измерителя не всегда возможно и неизбежно требует значительных затрат времени, поэтому целесообразно рассмотреть способы контроля без механических перемещений. Очевидно, что такие способы базируются на измерениях толщины в дискретных точках на окружности диаметра d_k (рисунок 4.46). Первый вопрос при анализе возможных вариантов: сколько точек контроля обеспечат достаточность измерительной информации.

Двух точек контроля явно недостаточно, ибо при расположении их симметрично относительно экстремальных точек разность результатов измерения равна нулю, а в остальных случаях имеет место неопределенность, если неизвестно положение точек экстремума.

Три точки контроля, расположенные через 120° по окружности d_k, дают информацию, которую на основании (4.46) можно представить уравнениями (4.47):

$$\begin{aligned}
\Delta h_1 &= \frac{1}{2}\Delta h_{\max}(1-\cos\alpha)\,; \\
\Delta h_2 &= \frac{1}{2}\Delta h_{\max}\left[1-\cos(\alpha+120°)\right]; \\
\Delta h_3 &= \frac{1}{2}\Delta h_{\max}\left[1-\cos(\alpha+240°)\right].
\end{aligned} \qquad (4.47)$$

Суммируя эти три уравнения, найдем сумму отклонений толщины по зависимости (4.48):

$$\sum \Delta h_{1-3} = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 = \frac{3}{2}\Delta h_{\max} = \text{const} \quad . \qquad (4.48)$$

Таким образом, сумма трех отклонений от $h_{\min}$ в точках, расположенных на одной окружности через 120°, есть величина постоянная (но зависящая от угла а) для данной детали и пропорциональная $\Delta h_{\max}$. Однако информация, получаемая по (4.47), будет достаточной при условии, когда $h_{\max}$ известно и постоянно.

Четыре точки, расположенные через 90° по той же окружности d_k, дают совокупность результатов, выражаемых подобно (4.48) уравнениями (4.49):

$$\begin{aligned}
h_1 &= h_{\min} + \frac{1}{2}\Delta h_{\max}(1-\cos\alpha); \\
h_2 &= h_{\min} + \frac{1}{2}\Delta h_{\max}\left[1-\cos(\alpha+\frac{\pi}{2})\right]; \\
h_3 &= h_{\min} + \frac{1}{2}\Delta h_{\max}\left[1-\cos(\alpha+\frac{3\pi}{2})\right]; \\
h_4 &= h_{\min} + \frac{1}{2}\Delta h_{\max}\left[1-\cos(\alpha+2\pi)\right],
\end{aligned} \qquad (4.49)$$

где $h_{(1\text{-}4)}$ и $h_{\min}$ – соответственно текущее и минимальное значения толщины детали.

Вычитая один из другого результаты измерений в диаметрально противоположных точках, получим два уравнения (4.50):

$$\begin{aligned} h_3 - h_1 &= \Delta h_{\max} \cos\alpha; \\ h_4 - h_2 &= \Delta h_{\max} \sin\alpha. \end{aligned} \tag{4.50}$$

Возводя оба уравнения в квадрат и складывая затем их почленно, найдем максимальное отклонение толщины по (4.51):

$$\Delta h^2{}_{\max} = (h_3 - h_1)^2 + (h_4 - h_2)^2 \quad . \tag{4.51}$$

Уравнение (4.48) не содержит никаких других параметров, кроме замеряемых. Таким образом, по результатам измерения в четырех точках можно вычислить величину максимальной разнотолщинности и, кроме того, из уравнений (4.50) – угол α, определяющий положение диаметра, который проходит через экстремальные точки $h_{\max}$ и $h_{\min}$

Если непараллельность задана углом φ между торцевыми поверхностями детали, контроль осуществляется также по результатам измерений толщины в дискретных точках с последующим вычислением угла φ методами аналитической геометрии. Как известно, угол между нормалями к двум плоскостям, заданным уравнениями (4.52):

$$\begin{aligned} A_1 x + B_1 y + C_1 z + D_1 &= 0; \\ A_2 x + B_2 y + C_2 z + D_2 &= 0, \end{aligned} \tag{4.52}$$

определяется соотношением (4.53):

$$\mathrm{s}_{\varphi} = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{(A_1^2 + B_1^2 + S_1^2)(A_2^2 + B_2^2 + C^2{}_2)}}. \tag{4.53}$$

Одна плоскость задается положением опорных точек, положение второй определяется измерением толщины детали над опорными точками. Для этого удобно принять систему координат, как показано на рисунке 4.47; точки контроля 1 и 2 лежат в плоскости *xz*.

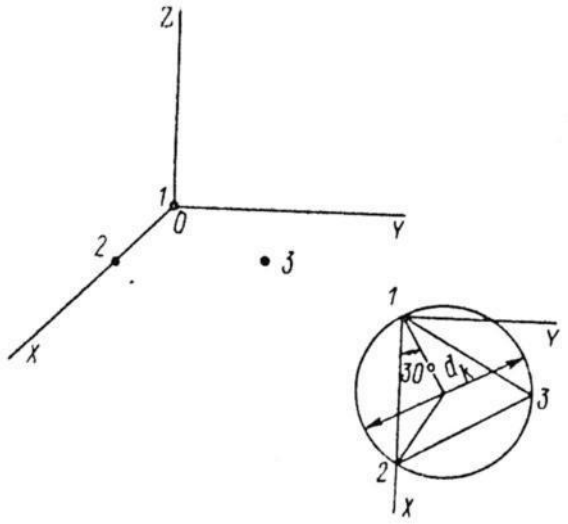


Рисунок 4.47 – Выбор системы координат

Координаты опорных точек можно определить как (4.54):

$$\begin{aligned} &x_1=0, \quad x_2=\frac{d_k}{2}\sqrt{3}, \quad x_3=\frac{d_k}{4}\sqrt{3}; \\ &y_1=0, \qquad y_2=0, \qquad y_3=\frac{3}{4}d_k; \\ &z_1=h_1, \qquad z_2=h_2, \qquad z_3=h_3. \end{aligned} \tag{4.54}$$

Уравнение опорной плоскости z=0, так как коэффициенты уравнения $A_1=B_1=0$ и $C_1=0$.

Координаты точек, в которых изменяется толщина определяются (4.55):

$$\begin{aligned} &x_1=0, x_2=\frac{d_k}{2}\sqrt{3}, x_3=\frac{d_k}{4}\sqrt{3}; \\ &y_1=0, y_2=0, y_3=\frac{3}{4}d_k; \\ &z_1=h_1, \; z_2=h_2, \; z_3=h_3. \end{aligned} \tag{4.55}$$

Коэффициенты в уравнении верхней плоскости будут равны (4.56):

$$\begin{aligned} &A_2=\sqrt{3}(h_2-h_1), \\ &B_2=2(h_2-h_1)-(h_2-h_1), \\ &C_2=-\frac{3}{2}d_k. \end{aligned} \tag{4.56}$$

Подставляя (4.56) в (4.53), после преобразований получим (4.57):

$$\cos_{\varphi} = 1 \Big/ \sqrt{1 + \frac{16}{9d_k^2}\left[(h_2 - h_1)^2 + (h_2 - h_1)^2 - (h_2 - h_1)(h_3 - h_1)\right]} \quad . \qquad (4.57)$$

Уравнение (4.57) отражает характер вычислительных операций, требующихся для осуществления контроля, и соответственно этому машинное обеспечение системы.

Построение систем контроля формы поверхности производится аналогичным образом: составляется функция, связывающая контролируемый и измеряемые параметры, определяется характер вычислительных операций, выбирается способ их выполнения и соответственно этому формулируются требования к выходной информации от измерительного устройства.

Схема измерительного устройства строится по таким же принципам, как и для систем комплексного контроля независимых параметров, но с учетом требований к идентичности выходного сигнала для всех приемных каналов. Последнее требование часто бывает трудновыполнимым для аналоговых методов индикации и заставляет вводить подвижные компенсаторы, усложняющие систему и снижающие производительность.

4.3.3 Контроль положения плоскости вращения

Концепция разработки: простыми движениями плоских зеркал (равномерное вращение) можно задавать различные пространственные траектории точек и векторов, а по фактическим траекториям можно контролировать правильность номинальных параметров зеркальной системы [107, 124].

Схема получения измерительной информации представлена на рисунке 4.60. При вращении зеркала вокруг оси отображающаяся в нем светящаяся точка движется по траектории, которая по форме и параметрам зависит от положения оси вращения и угла наклона вектора нормали зеркала к оси вращения. На рисунке 4.48 показано изменение формы и параметров

траектории а) при изменении угла наклона вектора нормали зеркала (траектория б.) и изменения положения оси вращения (траектория с.).

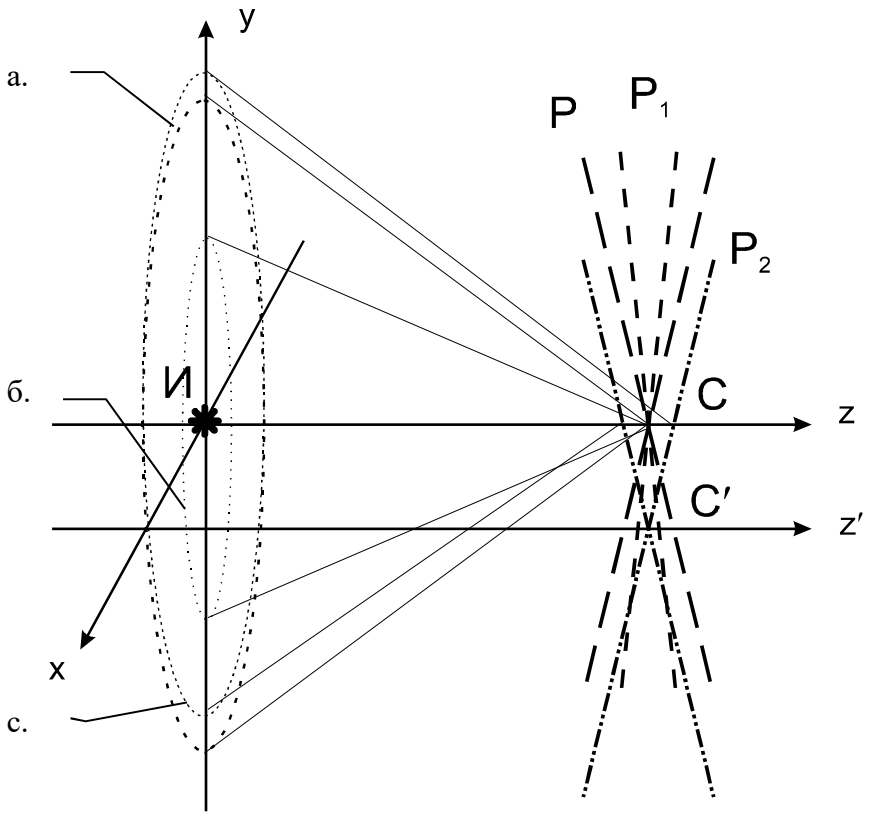


Рисунок 4.48 – Схема получения измерительной информации

Из практики известно, что достижимое разрешение оптико-электронных средств индикации – 1 мкм. Исходя из этого, основная погрешность индикации была принята равной 5 мкм.

Потребная точность контроля положения вращающейся плоскости применительно к техническим измерениям определяется областью применения. Например, для контроля углов установки колес автомобилей погрешность измерения должна быть до 5′, а для точного машиностроения - 15-30 ″.

В качестве информативных параметров могут использоваться:

- форма траектории;
- координаты точек траектории;
- скорость и (или) ускорение движения светящейся марки по траектории.

Использование формы траектории в качестве информативного параметра требует использования устройств индикации, перекрывающих весь диапазон перемещений светящейся марки. Реализация этой схемы измерений возможна на основе цифровой камеры и методик обработки изображений.

Получение измерительной информации на основе анализа координат точек траектории позволяет отказаться от необходимости индицирования всей области перемещений. Измерительная информация считывается в результате дискретных измерений в нескольких точках траектории. Для получения измерительной информации целесообразно использовать свойство неравномерности приращений координат точек траектории движения изображения светящейся марки при изменении параметров ЗС (закономерности формирования описаны в п. 2.3). Сравнивая изменения координат точек траектории, возможно определить параметры ЗС. Для индикации координат точек траектории могут использоваться позиционно чувствительные фотоприемники или цифровые камеры.

Точность определения величин скорости и ускорения движения оптического изображения известными методами зависят от стабильности скорости вращения зеркала, что пока затрудняет их использование в качестве информативных параметров.

Схема построения устройств контроля положения плоскости вращения показана на рисунке 4.49 [197]. В состав устройства входят следующие основные элементы: 1 – источник света, 2 – диафрагма, 3 – объектив, 4 – зеркальный преобразователь, сопряженный с объектом измерения, 5 – поверхность анализа.

Под поверхностью анализа понимается часть пространства изображений, в котором происходит считывание измерительной информации оптико-электронными средствами.

Для уменьшения количества независимых параметров регистрирующую поверхность необходимо связать либо с источником света, либо с плоскостью вращения. Первый вариант предпочтительнее с точки зрения универсализации метода, однако использование регистрирующей поверхности, связанной с осью вращения, упрощает конструкцию.

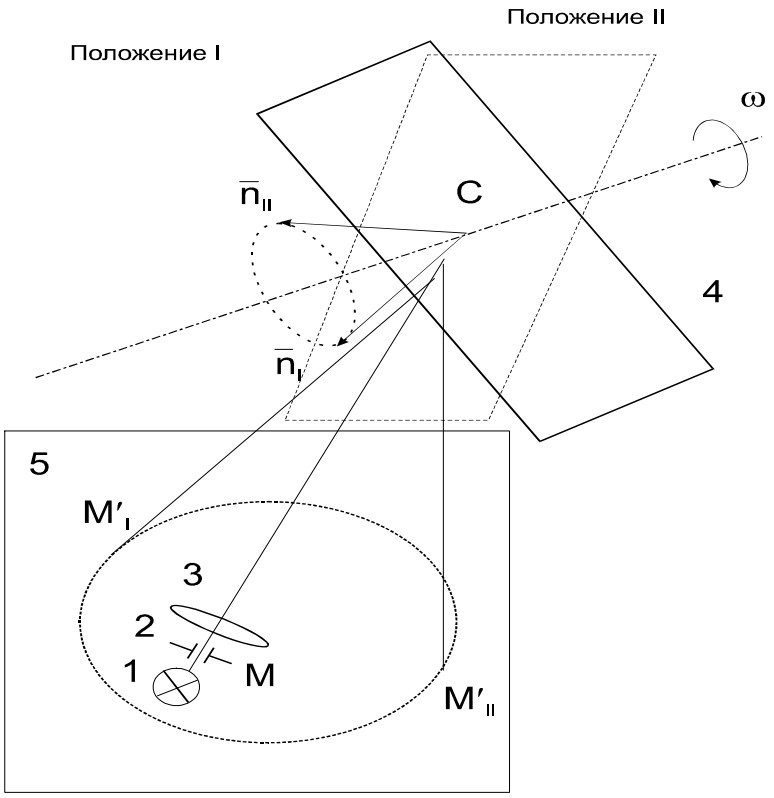


Рисунок 4.49 – Принцип действия устройства контроля положения плоскости вращения

Особенности передачи измерительной информации активных систем описаны в разделе 3.1.2.

Уменьшение влияния неравномерности светоэнергетического распределения отображения светящейся марки во вращающемся зеркале на поверхности анализа возможно при дефокусировке изображения. Технически это может быть осуществлено за счет удаления фотоприемника от картинной плоскости объектива.

Разработано устройство контроля положения плоскости вращения для случая известного положения оси вращения, реализующее оптико-электронный способ контроля, описанный ранее.

Отличительной особенностью предлагаемого устройства является то, что оно позволяет проводить контроль положения вращающейся плоскости независимо от расстояния между объектом контроля и поверхностью анализа.

Схема устройства приведена на рисунке 4.62.

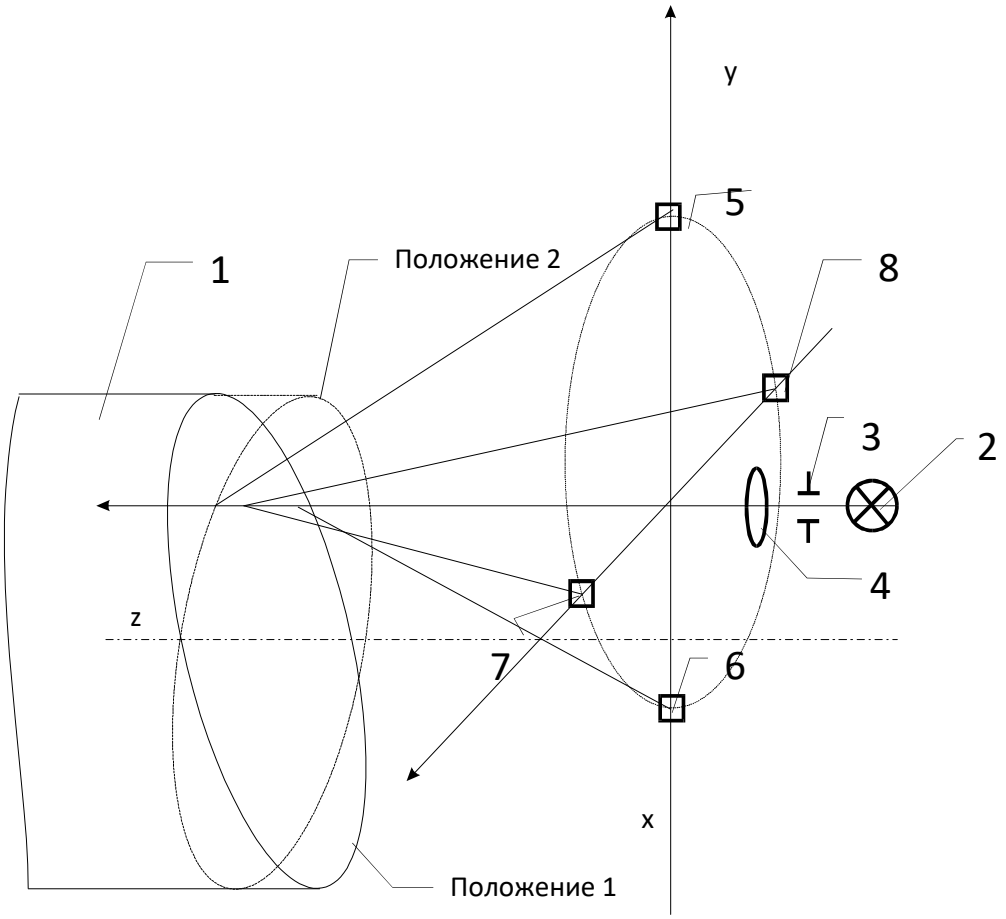


Рисунок 4.50 – Схема контроля положения плоскости вращения

На схеме обозначено: 1 – деталь, 2 – источник света, 3 – диафрагма, 4 - объектив, 5…8 – приемники измерительной информации.

Устройство работает следующим образом: сканирующий световой луч, отражаясь от поверхности вращающейся детали, попадает на чувствительный слой фотоприемников, на выходе которых формируется сигнал. Сравнивая эти сигналы, возможно определить положение плоскости вращения.

Расчетная схема устройства приведена на рисунке 4.51 [115].

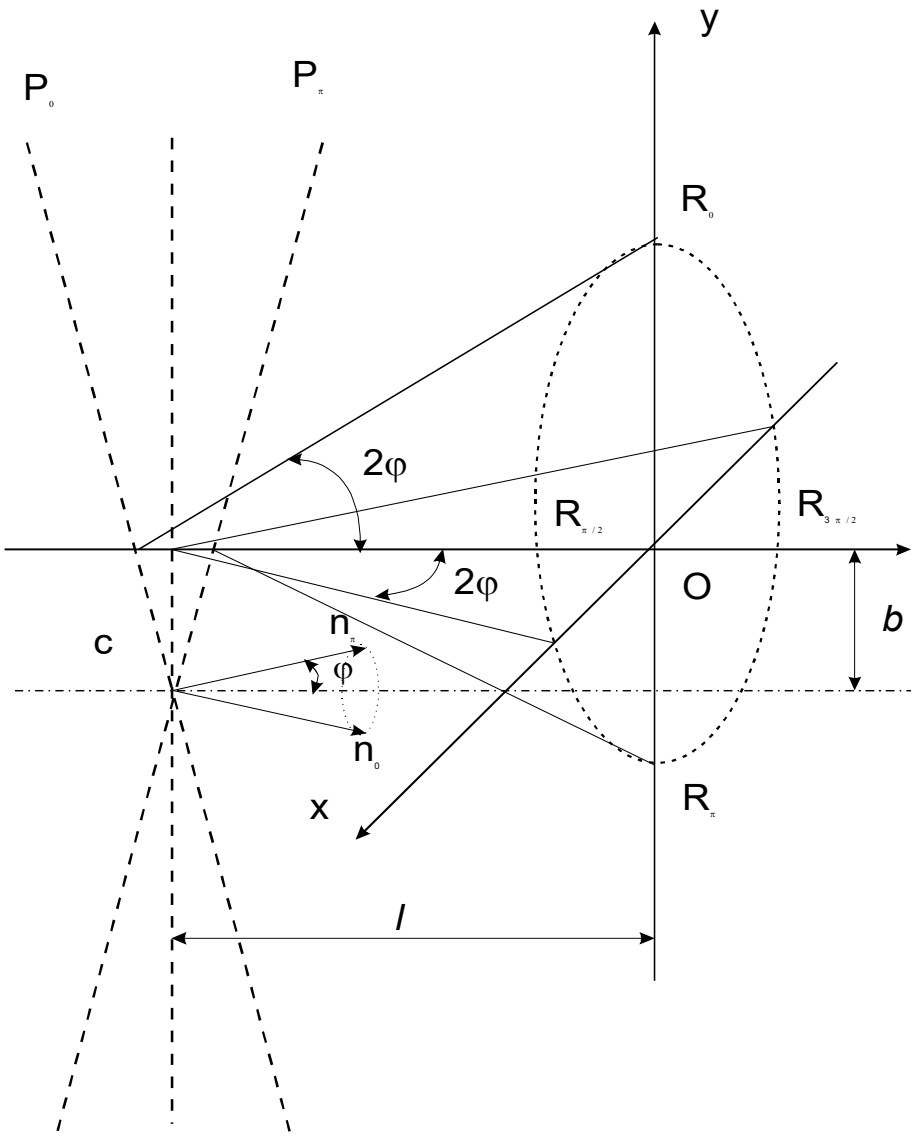


Рисунок 4.51 – Расчетная схема устройства контроля положения вращающейся плоскости

Система координат выбрана таким образом, что ось Z , совпадающая с направлением светового луча, параллельна оси вращения и расположена на расстоянии $в$ от нее в плоскости ZOY. Приемники оптической информации располагаются (или перемещаются) по осям OX и OY. Траектория, образованная отраженным лучом в плоскости XOY, описывается следующей системой уравнений (4.58):

$$\begin{cases} x = tg2\varphi \cdot (l - b \cdot tg\varphi \cdot \cos\alpha) \cdot \sin\alpha \\ y = tg2\varphi \cdot (l - b \cdot tg\varphi \cdot \cos\alpha) \cdot \cos\alpha \end{cases}, \qquad (4.58)$$

где α – угол поворота детали, φ – угол наклона вектора нормали контролируемой плоскости к оси вращения, l – расстояние между точкой С – пересечения контролируемой плоскости с осью вращения и О – пересечения оси OY с осью вращения, b – расстояние между оптической осью и осью вращения.

В полярных координатах уравнение траектории описывается системой (4.59):

$$\begin{cases} \alpha \\ r = tg2\varphi \cdot (l - b \cdot tg\varphi \cdot \cos\alpha) \end{cases} . \quad (4.59)$$

Разница значений радиус векторов при повороте детали можно описать уравнением (4.60):

$$r(\alpha_2) - r(\alpha_1) = b \cdot tg2\varphi \cdot tg\varphi \cdot (|\cos\alpha_1| - |\cos\alpha_2|) , \quad (4.60)$$

которое не зависит от l и позволяет определить угол φ ⁻ наклона вектора нормали контролируемой плоскости к оси вращения по следующей формуле (4.61):

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \arccos\left[\frac{b \cdot (|\cos\alpha_1| - |\cos\alpha_2|)}{(r(\alpha_2) - r(\alpha_1)) + b \cdot (|\cos\alpha_1| - |\cos\alpha_2|)} \right] . \quad (4.61)$$

На рисунке 4.52 приведен график изменений значений r (90) - r(α) при φ = 0, 5...20° и b=1. Максимальная разница $r(\alpha_1)$ - $r(\alpha_2)$ наблюдается в случае, когда α_1 и α_2 принимают следующие значения $\alpha_1 = \pi \cdot n$ и $\alpha_2 = \pi/2 \cdot n$, где n = 0, 1, 2, ... и может быть определена (4.62):

$$h = b \cdot tg\,2\varphi \cdot tg\,\varphi , \quad (4.62)$$

где $h = r_0 - r_{\pi/2}$.

Откуда угол наклона контролируемой плоскости можно определить по (4.63):

$$\varphi = \frac{1}{2} \arccos\left[\frac{b}{h + b} \right] . \quad (4.63)$$

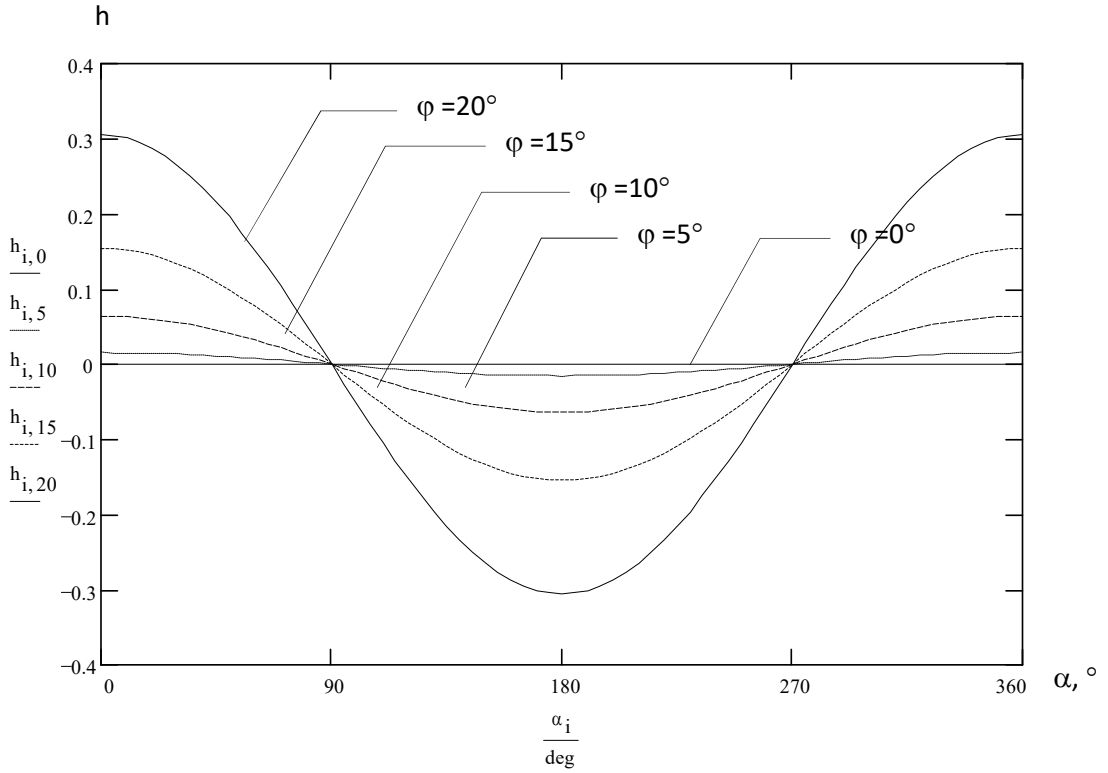


Рисунок 4.52 – График изменений значений $h = f(\alpha)$ при $\varphi = 0, 5...20°$ и b=1

На рисунке 4.53 приведены графики зависимости погрешности измерений от угла наклона контролируемой плоскости при индикации положения изображения траектории с погрешность Δh = 1, 5, 10 мкм.

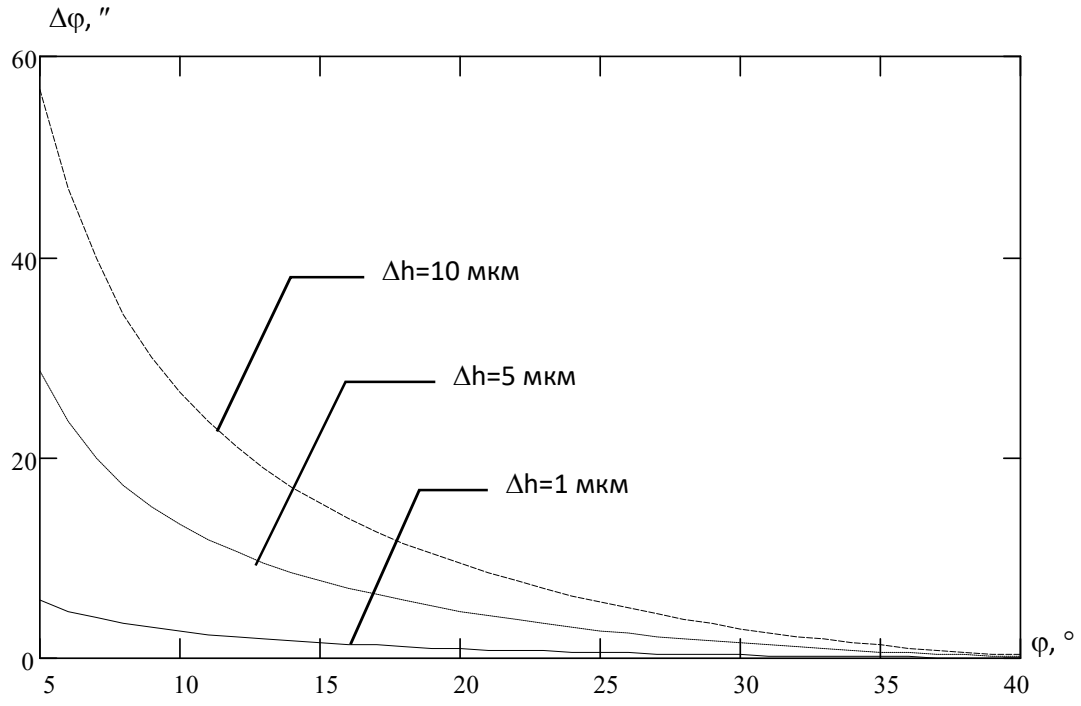


Рисунок 4.53 – График зависимости $\Delta\varphi = f(\varphi)$ при Δh=1, 5, 10 мкм

Значение l можно определить из соотношения (4.64):

$$l = \frac{r(\alpha)}{tg2\varphi} + b \cdot tg\varphi \cdot \cos\alpha \quad . \qquad (4.64)$$

Область применения данного устройства – контроль положения плоскости вращения, значения вектора наклона к оси вращения которого лежат в областях 5 …40° и 50…85°.

Для контроля положения плоскости вращения с углами наклона вектора нормали плоскости к оси вращения, лежащими в пределах 30°≤φ≤ 60°, целесообразно использовать устройство, приведенное на рисунке 4.66, обозначение которого и принцип действия аналогичен устройству, приведенному на рисунке 4.54.

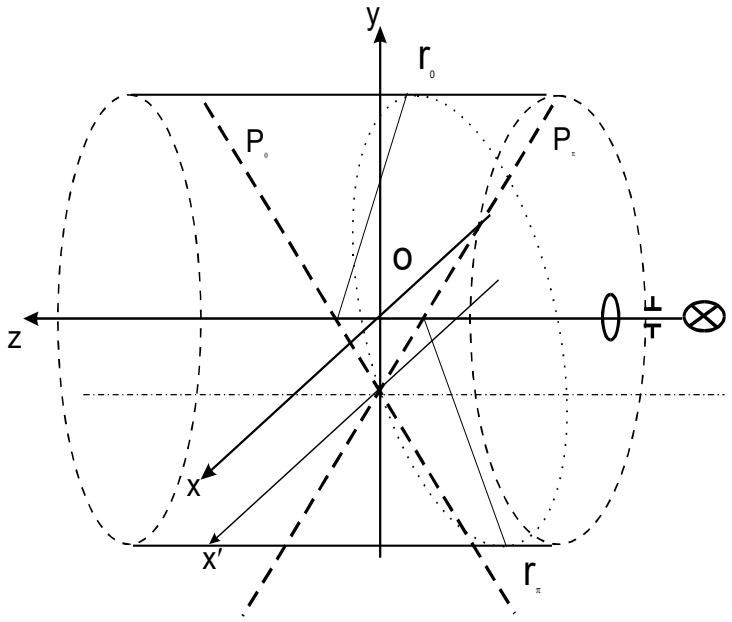


Рисунок 4.54 – Схема устройства контроля положения вращающейся плоскости с углами наклона 30°≤φ≤ 60°

Траектория движения луча по поверхности анализа, в цилиндрических координатах ось которых совпадает с осью светового луча, описывается системой (4.65):

$$\begin{cases} r \\ \alpha \\ y = r \cdot tg2\varphi - b \cdot tg\varphi \cdot \cos\alpha \end{cases} . \qquad (4.65)$$

Разница значений определяется (4.66):

$$y(\alpha_2) - y(\alpha_1) = b \cdot tg\varphi \cdot (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) . \qquad (4.66)$$

Предложенные устройства совместно с существующими коллимационными методами контроля положения плоскости вращения перекрывают весь диапазон значений угла наклона вектора нормали плоскости к оси вращения.

Точность характеризуется величиной абсолютной или относительной погрешности определения угла наклона контролируемой плоскости и определяется суммарным действием элементарных погрешностей измерительной системы в целом.

К инструментальным относятся погрешности, возникающие при отклонении параметров самого устройства как совокупности оптической, кинематической и электронной систем [175].

При совмещении источника излучения и приемников оптической информации в одном блоке инструментальная погрешность складывается из следующих элементарных погрешностей:

1. Погрешности измерения штрих-марки – h.

Для оценки ее влияния воспользуемся методом частных производных для функции φ = F(h). Коэффициент влияния для погрешности Δh можно определить по (4.67):

$$k_{\Delta h} = \frac{d\varphi}{dh} = \frac{(h+b) \cdot b}{2 \cdot h^2 \cdot \sqrt{h^2 + 2 \cdot h \cdot b}} . \qquad (4.67)$$

Подставив (4.62) в (4.67), получим уравнение (4.68) – зависимости коэффициента влияния погрешности измерения положения штрих-марки от угла наклона плоскости :

$$k_{\Delta h}{}' = \frac{\cos^2 2\varphi}{8 \cdot b \cdot \sin^4 \varphi \cdot \sin 2\varphi} . \qquad (4.68)$$

Графики $k_{\Delta h}{}' = F(\varphi)$ приведены на рисунках 4.55 … 4.57.

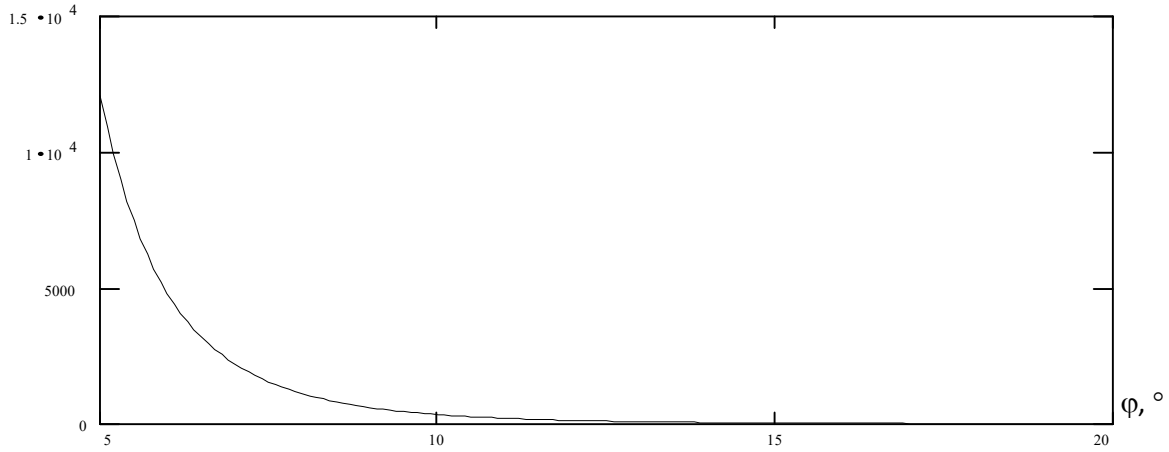


Рисунок 4.55 – График изменения $k_{\Delta h}{}' = F(\varphi)$ при φ = 5 - 20°

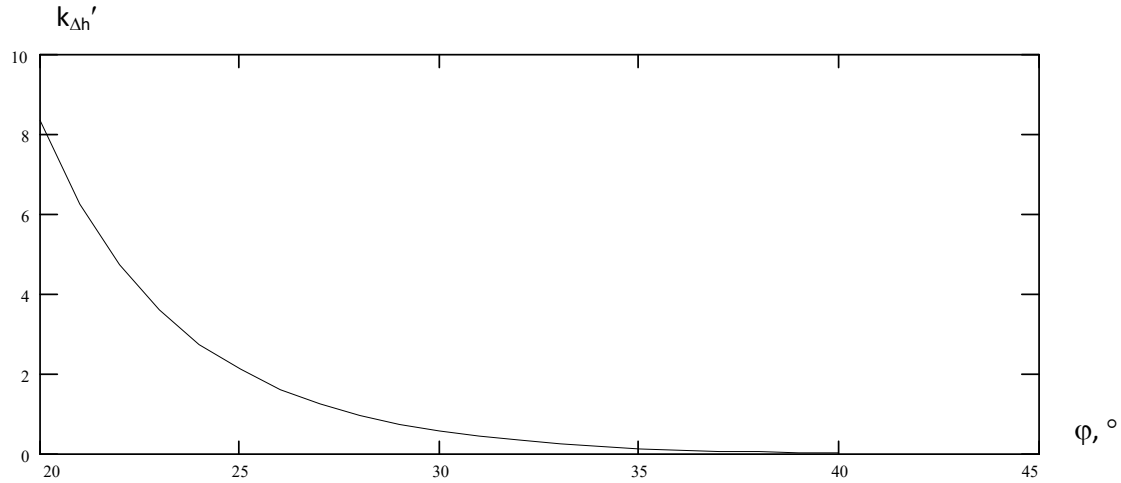


Рисунок 4.56 – График изменения $k_{\Delta h}{}' = F(\varphi)$ при φ = 20 - 45°

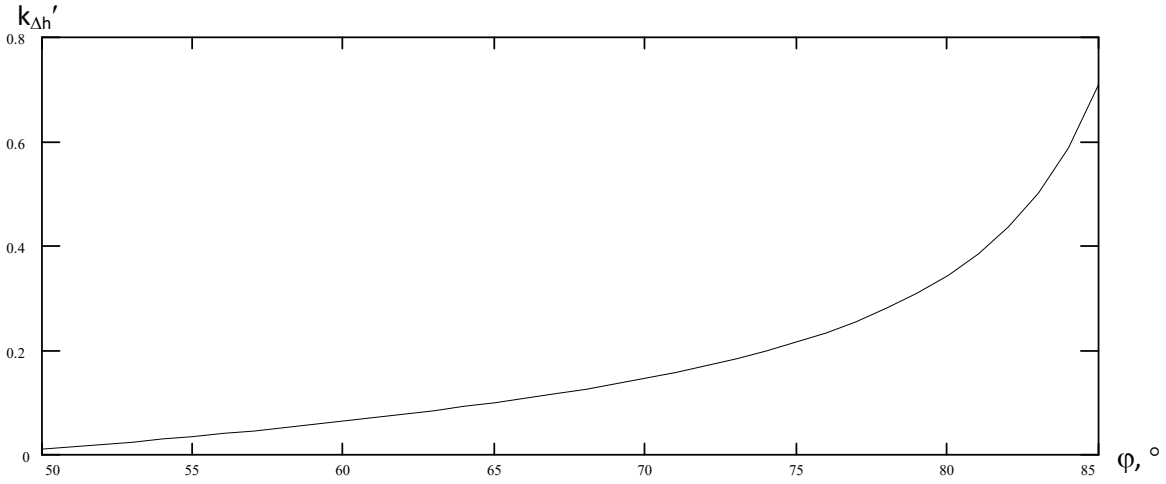


Рисунок 4.57 – График изменения $k_{\Delta h}{}' = F(\varphi)$ при φ = 50 - 85°

2. Ошибки положения осей координат:

– β – погрешность от неперпендикулярности расположения осей координат;

– δ – погрешность от неперпендикулярности установки осей координат относительно оси *e* - светового луча;

– *s* – погрешность вызванная несовпадением точки О - начала координат с осью светового луча.

Схема образования этих ошибок приведена на рисунках 4.58…4.60.

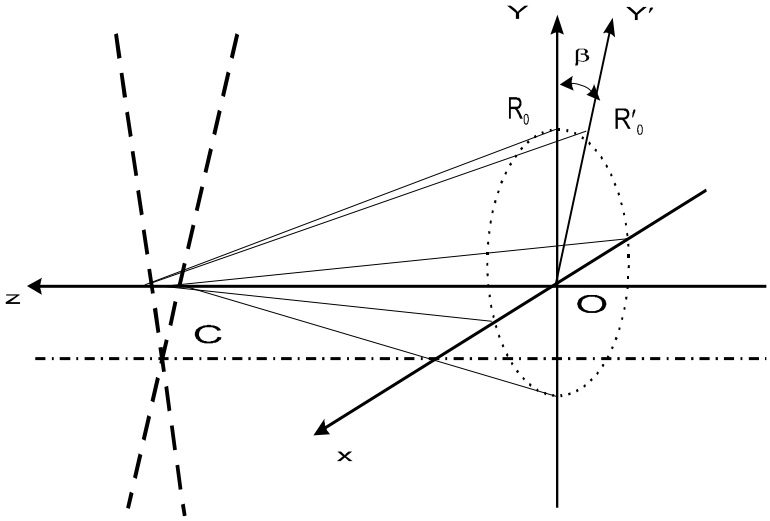


Рисунок 4.58 – Схема образование ошибок от β

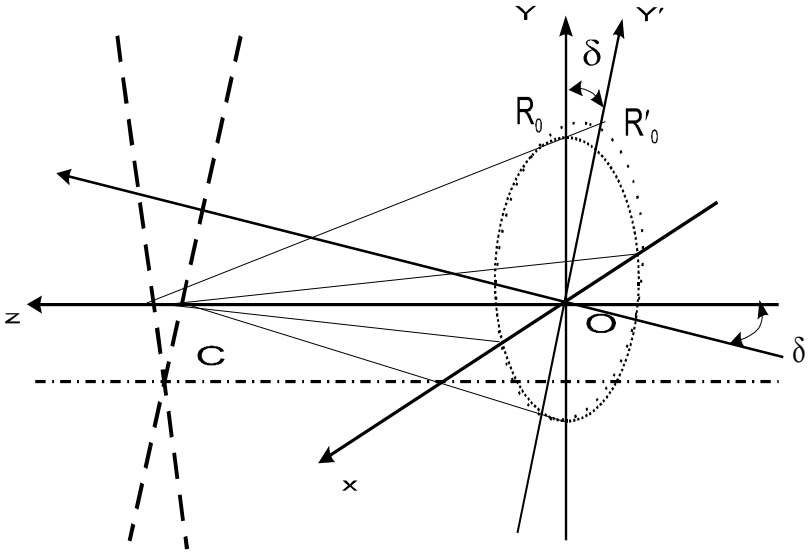


Рисунок 4.59 – Схема образование ошибок от δ

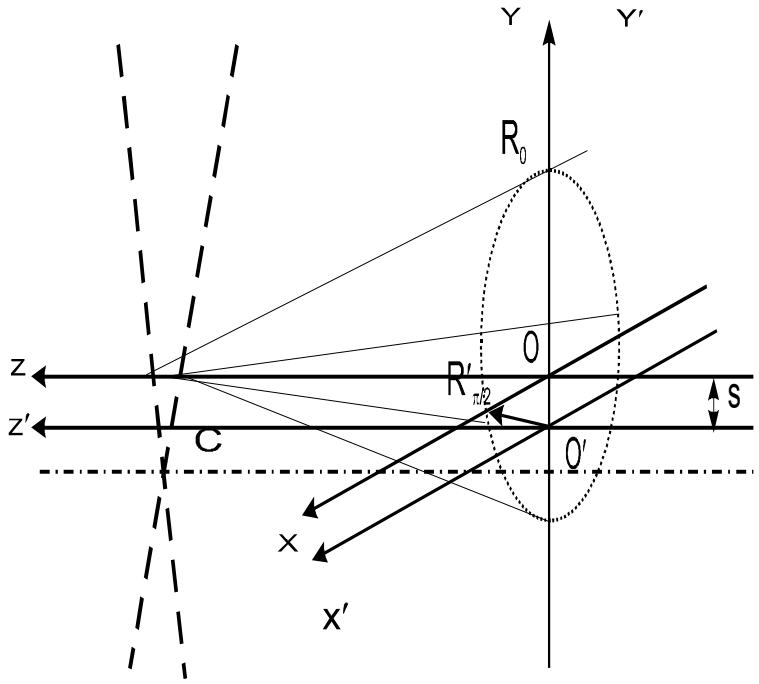


Рисунок 4.60 – Схема образование ошибок от *s*

Изменение величины *h* от погрешности β можно определить по (4.69):

$$\Delta h = h \cdot \left(\frac{\cos 2\varphi}{\cos(2\varphi + \delta)} - \cos\beta - \sin\left(arctg \frac{s}{l \cdot tg2\varphi} \right) \right) \quad . \qquad (4.69)$$

Для оценки влияния ошибок β, δ, *s* воспользуемся частными производными по приращению Δh=F(φ) по соответствующим параметрам.

Коэффициенты влияния:

для погрешности β определяются выражением (4.70):

$$k_\beta = b \cdot tg\varphi \cdot tg2\varphi \cdot \sin\beta \quad ; \qquad (4.70)$$

для δ – (4.71):

$$k_\delta = -\frac{b \cdot tg\varphi \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin(2\varphi + \delta)}{\cos^2(2\varphi + \delta)} \quad ; \qquad (4.71)$$

для s – (4.72):

$$k_s = -\cos(arctg \frac{s}{l \cdot tg2\varphi}) \cdot \frac{l \cdot tg2\varphi}{(l \cdot tg2\varphi)^2 + s} \quad . \qquad (4.72)$$

Графики $k_\beta = f(\varphi)$, $k_\delta = f(\varphi)$, $k_s = f(\varphi)$ приведены на рисунках 4.61 … 4.63.

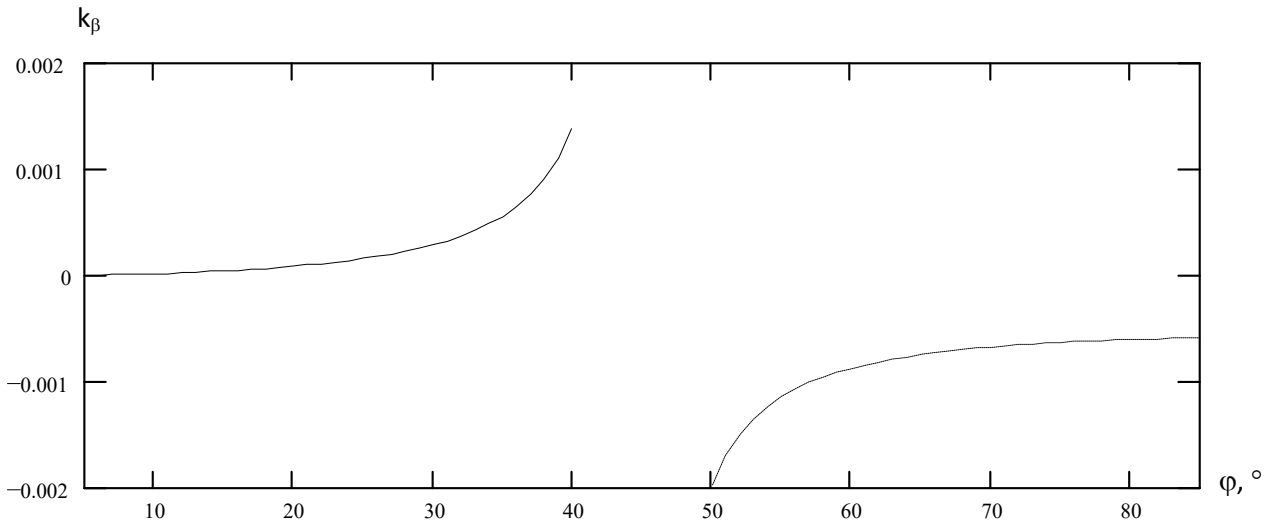


Рисунок 4.61 – График коэффициента влияния $k_\beta = f(\varphi)$

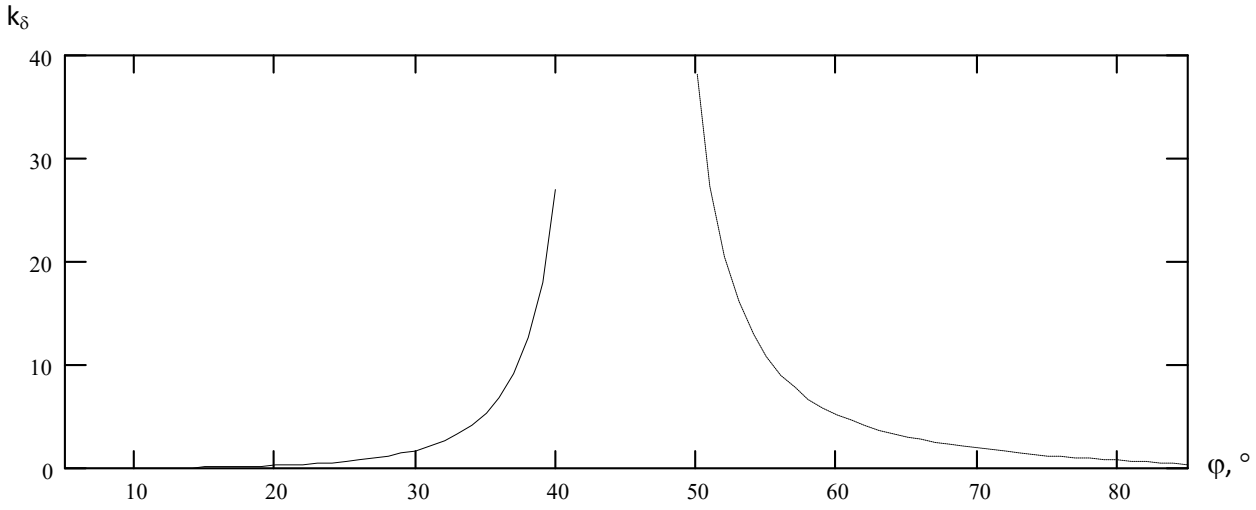


Рисунок 4.62 – График коэффициента влияния $k_\delta = f(\varphi)$

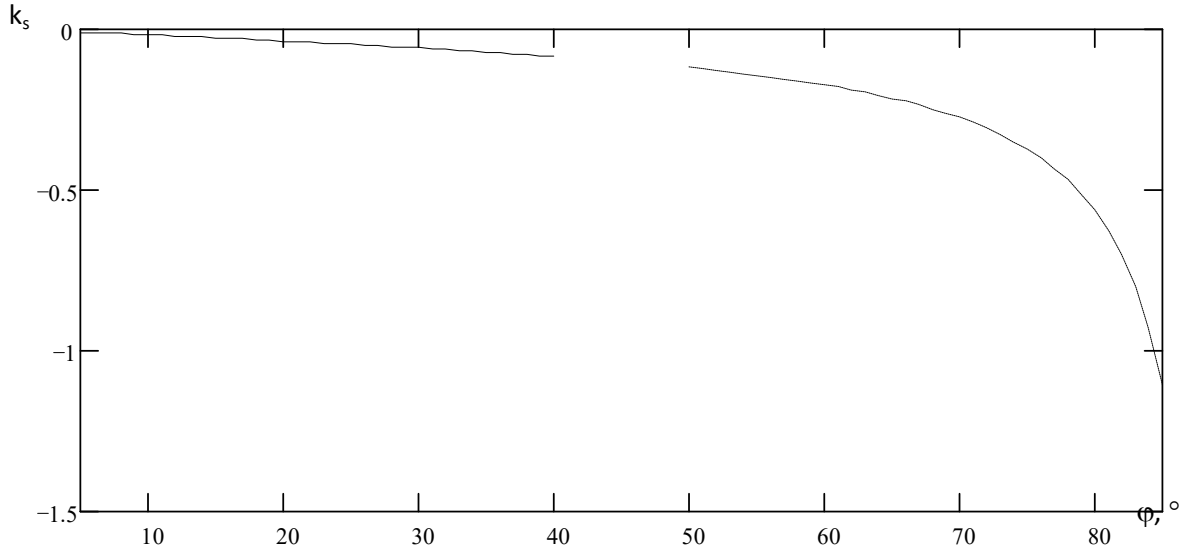


Рисунок 4.63 – График коэффициента влияния $k_s = f(\varphi)$.

Методические погрешности возникают от несовершенства принятого метода формирования и передачи информации и не зависят от конструктивных решений и качества изготовления средства измерения.

Источниками этой группы погрешностей являются: тракт передачи информации, поверхность измерения, правильность базирования и установки устройства контроля.

В тракте передачи информации возможны флуктуации оптической плотности воздушной среды. Они вызывают отклонение лучей и дрожание изображения марки. Компенсировать погрешности воздушной рефракции не представляется возможным, и поэтому перед измерением необходимо убедиться в их отсутствии.

Поверхность измерения может вызывать деформацию штрих-марки и перераспределение энергии по площади ее вторичного изображения. Уменьшить влияние погрешности данного вида можно, если учитывать конкретные условия измерений и сократить размеры штрих-марки.

Погрешности, возникающие вследствие неточности базирования и установки устройства, по причинам, вызвавшим их, можно разделить:

– Δb - погрешность задания расстояния b,

– ε - погрешность, возникающая вследствие нарушения условия параллельности оптической оси источника излучения прибора оси вращения детали.

Коэффициент влияния Δb на точность определения угла наклона плоскости к оси вращения определяется по формуле (4.73):

$$k_b = -\frac{\sin^2 \varphi \cdot ctg2\varphi}{b} \quad . \qquad (4.73)$$

Графики изменения $k_b = F(\varphi)$ изображены на рисунках 4.64 и 4.65.

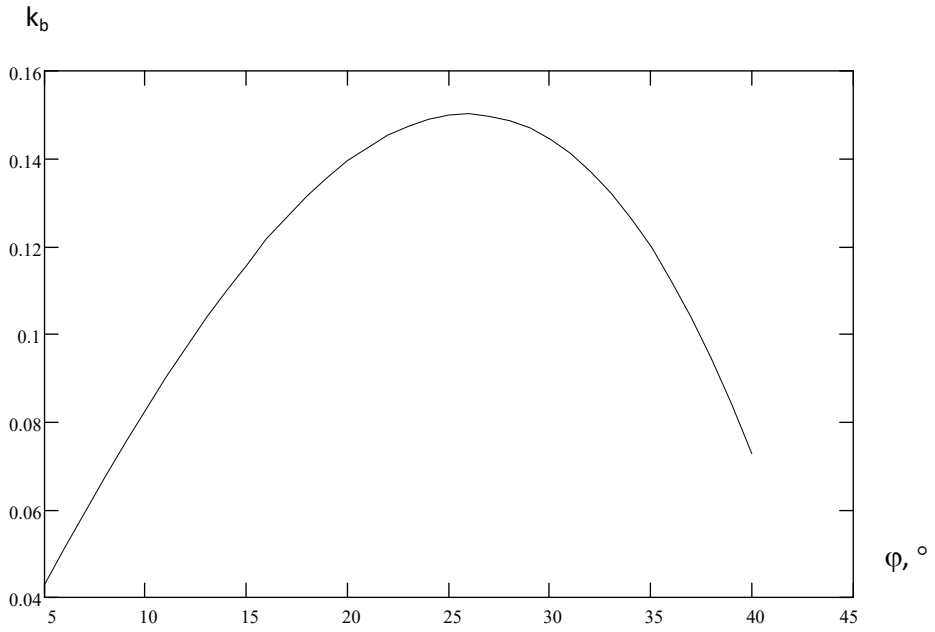


Рисунок 4.64 – График $k_b = F(\varphi)$ при $\varphi = 5 - 45°$

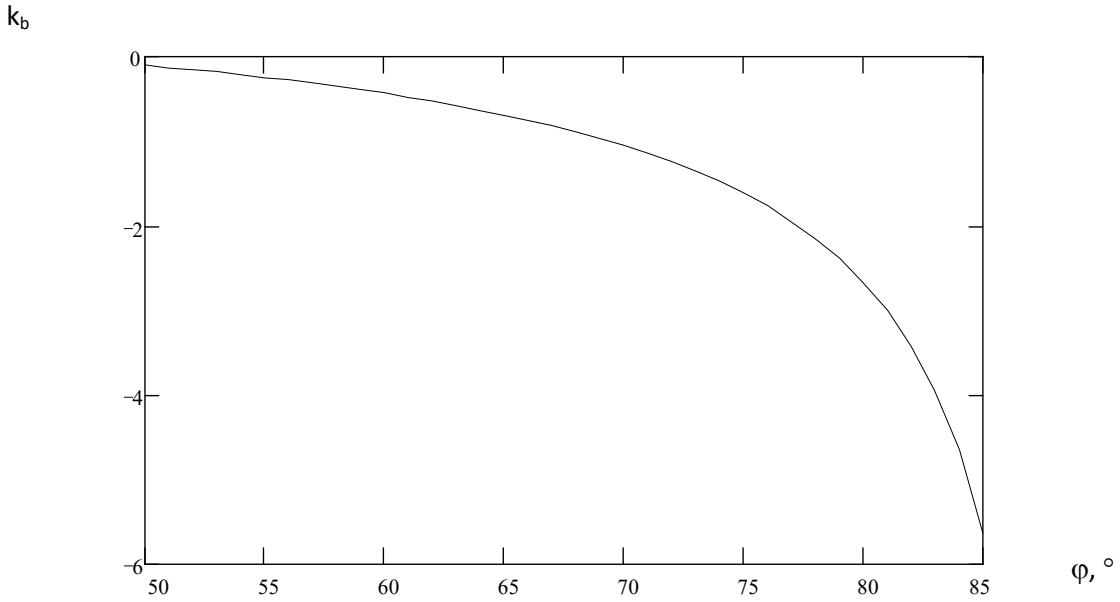


Рисунок 4.65 – График $k_b = F(\varphi)$ при $\varphi = 50 - 85°$

Для контроля за правильностью базирования устройства положения параллельно оси вращения контролируемой детали в схеме устройства предусмотрено использования двух пар датчиков, расположенных попарно на осях OX и OY (рисунок 4.51). Критериями правильности установки устройства контроля относительно оси вращения будет соблюдение следующих условий (4.74):

$$r_{\frac{\pi}{2}} = r_{\frac{3\pi}{2}} \quad , \quad \left| r_0 - r_{\frac{\pi}{2}} \right| = \left| r_\pi - r_{\frac{3\pi}{2}} \right| \quad . \qquad (4.74)$$

Проведенный анализ точности устройства контроля положения плоскости вращения позволяет сделать следующие выводы:

1. При измерении значений малых углов наклона вектора нормали плоскости к оси вращения (5 … 15°) доминирующей являются 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) использовать упрощенную схему расчета, которая приведена на рисунке 4.66.

Из рассмотрения построений на этой схеме координаты светящейся марки r_1' и r_1'', определенные относительно точки O_1 для первого источника излучения, можно записать (4.75) и (4.76):

$$tg\,2(\varphi + \eta) = \frac{r_1'}{l + b_1 \cdot tg(\varphi + \eta)} \quad , \qquad (4.75)$$

$$tg\,2(\varphi - \eta) = \frac{r_1''}{l - b_1 \cdot tg(\varphi - \eta)} \quad , \qquad (4.76)$$

и сответственно для второго источника излучения относительно O_2 (4.77) и (4.78):

$$tg\,2(\varphi + \eta) = \frac{r_2'}{l - b_2 \cdot tg(\varphi + \eta)} \quad . \qquad (4.77)$$

$$tg\,2(\varphi - \eta) = \frac{r_2''}{l + b_2 \cdot tg(\varphi - \eta)} \quad , \quad . \qquad (4.78)$$

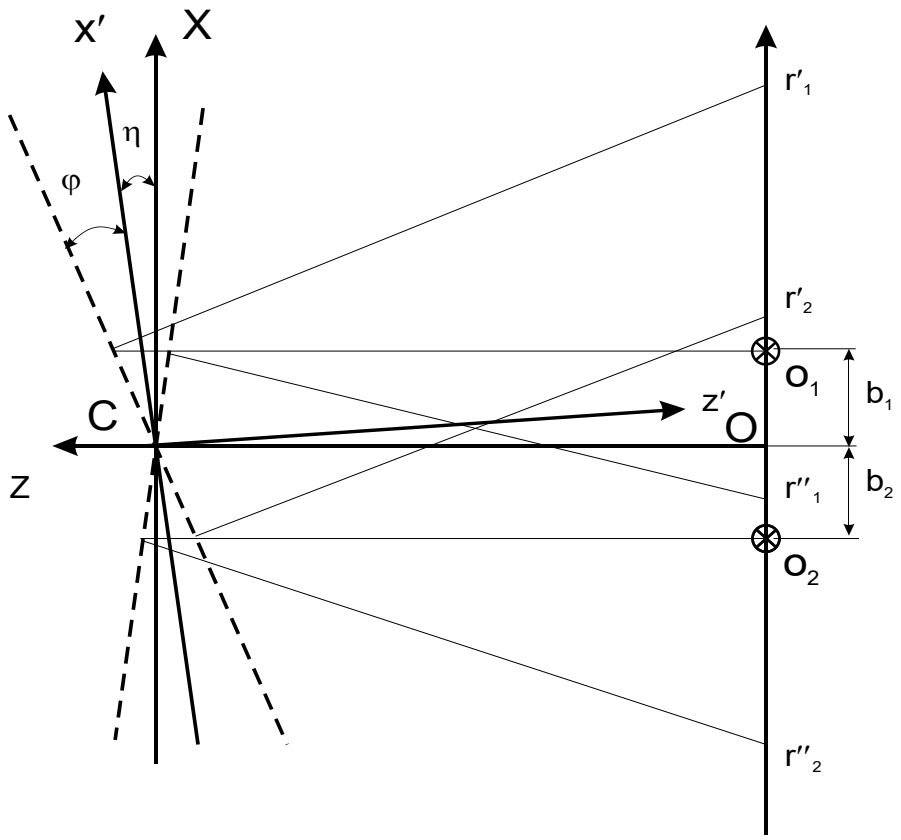


Рисунок 4.66 – Расчетная схема устройства контроля положения плоскости вращения (колеса)

где φ – угол наклона вектора нормали зеркала к оси вращения Z', η – угол между осью вращения Z' и осью Z, l – расстояние между точкой пересечения оси вращения с отражающей плоскостью зеркала и осью X, b_1 и b_2 – расстояния между ОС и оптическими осями первого и второго источников излучения соответственно.

Дополнительным условием будет (4.79):

$$\Delta b = b_1 + b_2 \,, \tag{4.79}$$

где Δb расстояние между O_1 и O_2 – оптическими осями источников излучения.

Решая совместно (4.75)…(4.78) и (4.79), определим неизвестные составляющие определяющие положение вращающейся плоскости зависимостями (4.80)…(4.83):

$$\varphi = \frac{1}{4}\left[\arccos\left(\frac{\Delta b}{r_1' - r_2' + \Delta b}\right) + \arccos\left(\frac{\Delta b}{r_2'' - r_1'' + \Delta b}\right)\right], \tag{4.80}$$

$$\eta = \frac{1}{4}\left[\arccos\left(\frac{\Delta b}{r_1' - r_2' + \Delta b}\right) - \arccos\left(\frac{\Delta b}{r_2'' - r_1'' + \Delta b}\right)\right], \quad (4.81)$$

$$b_1 = \frac{\dfrac{r_1'}{tg2(\varphi+\eta)} - \dfrac{r_1''}{tg2(\varphi-\eta)}}{tg(\varphi+\eta) + tg(\varphi-\eta)}, \quad (4.82)$$

$$l = \frac{r_1'}{tg2(\varphi+\eta)} - b_1 \cdot tg(\varphi+\eta). \quad (4.83)$$

Аналогичным образом может быть определен угол развала колес ν.

Рассмотренную упрощенную схему расчета положения плоскости вращения возможно использовать при небольших углах η и ν (до 3 - 5°), что достаточно для контроля углов установки колес автомобилей (углы развала и схождения управляемых колес легковых автомобилей лежат в пределах 0°… 0°30′ и 1 … 2° – для грузовых) [114].

4.4 Контроль объема брикетированных материалов оптическим геометрическим методом с пространственным разрешением в процессе их перемещения

Объектом рассмотрения являются задачи контроля объема, геометрии и поверхностных свойств брикетированных материалов в процессе их перемещения на ленте конвейера [125]. Оценка проводилась в рамках оценки возможности решения задачи контроля состава брикетированных алюминиевых материалов для вторичной переработки по их плотности [17].

Сравнительный анализ методов контроля представлен в таблице 4.7 [110, 240, 248].

Средства контроля брикетированных материалов можно построить на базе дискретных оптических измерителей расстояния (рисунке 4.67). Боковые датчики служат для определения расстояния до боковых граней брикета и вычисления ширины В брикетированного, верхние датчики служат для получения данных о

его высоте H [116, 203]. Использование трех датчиков, по одному с каждой стороны, позволяет обеспечить достоверность контроля только брикетов правильной формы, поскольку любые отклонения формы и нарушения целостности (например, осыпанием краев и углов брикета) будут приводить к снижению точности определения их объемов.

Таблица 4.7 – Сравнительная таблица способов контроля геометрии брикетированных материалов

Метод	Возможность анализа поверх. свойств материала, количество сторон				Относительная погрешность
	1	2	3	5	
Система из датчиков расстояния	-	-	-	-	1-4% зависит от количества датчиков и формы изделия
Системы активного типа (триангуляционные 2D сканеры)	-	-	-	-	до 0,5%
Лазерное сканирование	-	-	-	-	до 1%
Системы пассивного типа (1 камера)	+	±	-	-	1-2 %*
Системы пассивного типа (1 камера+ЗП)	+	+	±	±	до 1% *
Системы пассивного типа (2 камеры)	+	+	±	±	до 1% *
Активная система со структурированной подсветкой (1 камера)	+	+	-	-	до 1% *
Активная система со структурированной подсветкой (2 камеры)	+	+	±	±	до 1% *
Пассивный 3D сканер (2 камеры)	-	-	-	-	более 2% *

* - зависит от разрешения камеры (экспертная оценка)

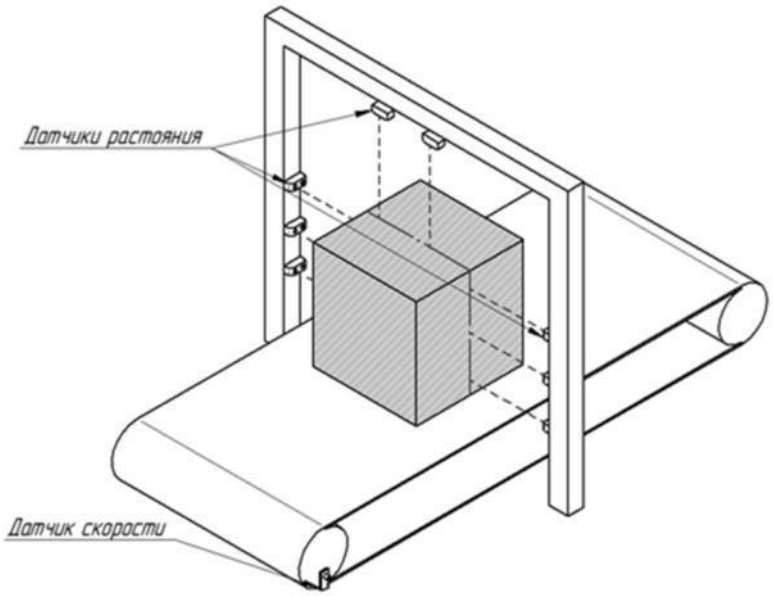


Рисунок 4.67 – Схема контроля объема брикета с использованием датчиков расстояния

Увеличение количества датчиков позволяет повысить точность контроля, но приводит к увеличению стоимости системы. Увеличение количества датчиков до трех (с каждой стороны) позволяет уменьшить погрешность при контроле брикетов неправильной формы (до 1-2%) [116], но не позволяет достоверно определять объем брикета с нарушенной целостностью. Система с количеством датчиков более трех на сторону становится экономически нецелесообразной по сравнению с другими рассматриваемыми решениями.

Увеличение количества точек сканирования при измерении сечения возможно за счет применения триангуляционных 2D сканеров [189] или систем лазерного сканирования [131], однако такие функции как возможность анализа поверхностного состава шихты, приведенные сканеры обеспечить не могут.

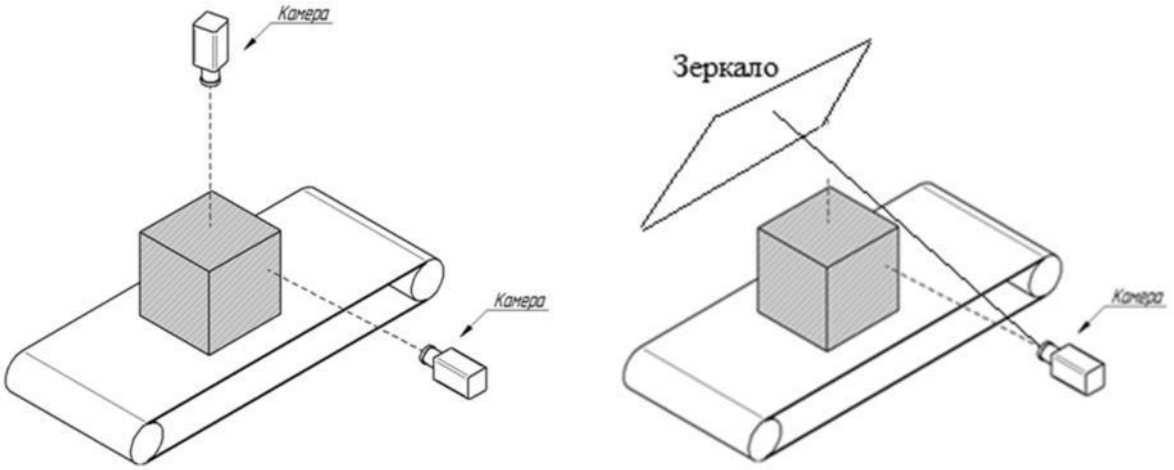
В связи с этим для фиксации измерительной информации в составе системконтроля брикетированных материалов целесообразно использовать цифровые камеры. Преимуществом таких систем является возможность комплексной оценки геометрии изделий и возможность реализации задач контроля поверхностного состава брикетированных материалом методами

компьютерного зрения. Использование цифровых камер позволяет реализовать как пассивную, так и активную схему получения измерительной информации.

Для учета возможного смещения брикета на конвейерной ленте система пассивного типа должна получать два взаимно перпендикулярных изображения брикета (по аналогии со схемой, рассмотренной на рисунке 4.36). Реализовать такую компоновку можно, используя две взаимно перпендикулярные цифровые камеры (например, получающие изображение брикета с верхней и боковой сторон), приведенной на рисунке 4.68а. Пассивная система контроля позволяет комплексно оценить геометрию изображения по одному кадру, что делает ее независимой от скорости конвейера. Разработано программное обеспечение [204] определения геометрических параметров брикетированных материалов на основе анализа их цифровых изображений.

Упрощение регистрирующей части системы контроля брикетированных материалов возможно при использовании зеркального преобразователя, по аналогии с рисунком 4.37, как показано на рисунке 4.68б. В варианте с зеркальным преобразователем отпадает необходимость во второй камере, но поскольку на одном кадре фиксируется сразу два изображения, уменьшается разрешение изображений сторон брикета (до 3...4 раз). Контроль осыпания краев брикета требует разработки достаточно сложных алгоритмов, включающих специальную систему подсветки.

Использование систем активного типа, на базе цифровой камеры и системы лазерной подсветки [110], предполагает последовательное получение сечений брикета и требует учета скорости его перемещения. Наиболее простое компоновочное решение такой схемы контроля представлено на рисунке 4.69.



а) б)

Рисунок 4.68 – Схема контроля качества брикета с применением: а) двух камер технического зрения; б) - камеры и зеркального преобразователя

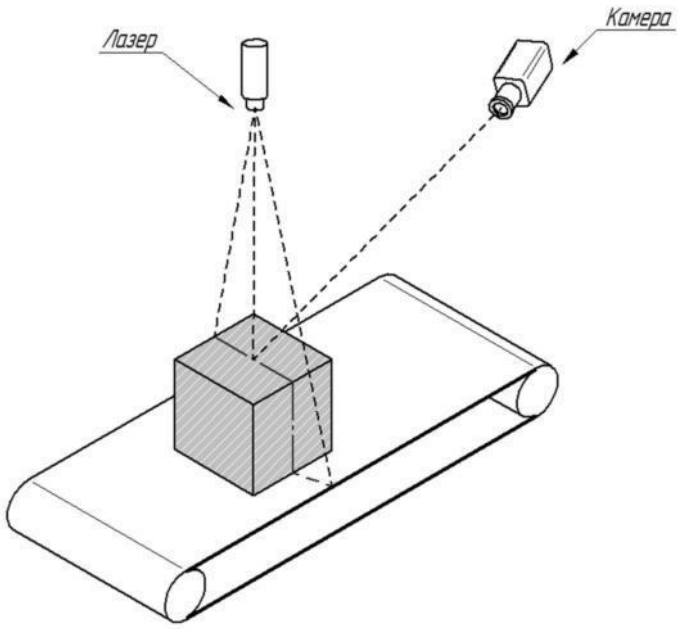


Рисунок 4.69 – Схема контроля геометрии брикета активного типа

4.5 Контроль технологического оборудования в металлургии

Повышение эффективности современных металлургических производств невозможно без решения задач оперативного контроля состояния металлургического оборудования [87, 117]. Определению ряда технологических параметров в процессе производства алюминия на электролизерах присуща значительная инерционность: контроль криолитового отношения или концентрации глинозема носит долговременный характер (<3 ч.), межполюсное расстояние, уровень металла и электролита регистрируются после ручных измерений. Поэтому ход процесса в цехах, работающих по технологии с самообжигающимися анодами, в значительной степени зависит от уровня подготовленности обслуживающего персонала [18].

Существуют эмпирические алгоритмы диагностики состояний электролизера [180]. После каждой технологической операции, связанной с разрушением корки электролита, производится герметизация нижней кромки газосборного колокола слоем глинозема. Частичное дожигание оксида углерода и смолистых веществ, выделяющихся при коксовании анода, осуществляется в специальных горелках, смонтированных вместе с газосборным колоколом. Выводы о ходе электролизера делаются на основании внешних признаков, таких как цвет и характер «огней», наблюдаемых в горелочном устройстве, показанном на рисунке 4.70 [105, 126] и состояния герметизирующего слоя глинозема по нижней кромке газосборного колокола (рисунок 4.71).

Автоматизация контроля состояния технологического процесса возможна с использованием средств оптико-электронной регистрации, которые позволят заменить визуальный контроль и контролировать режимы работы всей серии электролизеров.

Рисунок 4.70 – Горелочное устройство

Рисунок 4.71 – Герметизация газосборного колокола электролизера

В таблице 4.8 представлены визуально наблюдаемые технологические признаки режимов работы электролизера и оценена возможность их регистрации оптическими средствами контроля [85, 121].

Таблица 4.8 – Визуально наблюдаемые технологические признаки режимов работы электролизера и возможность их регистрации оптическими средствами контроля

Объект наблюдения/ явления			Состояние технологического процесса	Возможность регистрации		
				Газо-анали-затор	Дискрет-ный фото-датчик	Цифровая камера
Горелочное устройство	пылевые отложения		Возможность засорения горелочного устройства	нет	нет	возможна
	Пламя	Фиолетового цвета	без нарушений	нет	возможна	возможна
		желтого или белого цвета	нарушение теплового баланса электролизера	нет	возможна	возможна
		выбивается через воздухозаборные щели	нарушения в системе газоотсоса	нет	нет	возможна
		отсутствует		нет	возможна	возможна
Колоколь-ное укрытие		«дымки» утечки газа	нарушение герметизации	возможна	нет	возможна
		Обвалы корки		возможна	нет	возможна

Использование комплекса камер дает своевременный сигнал для предотвращения всех возможных изменений состояния наблюдения на участке электролизеров Содерберга [120].

На рисунке 4.72 представлена схема автоматизированного мониторинга технологического процесса производства алюминия на участке электролизного цеха.

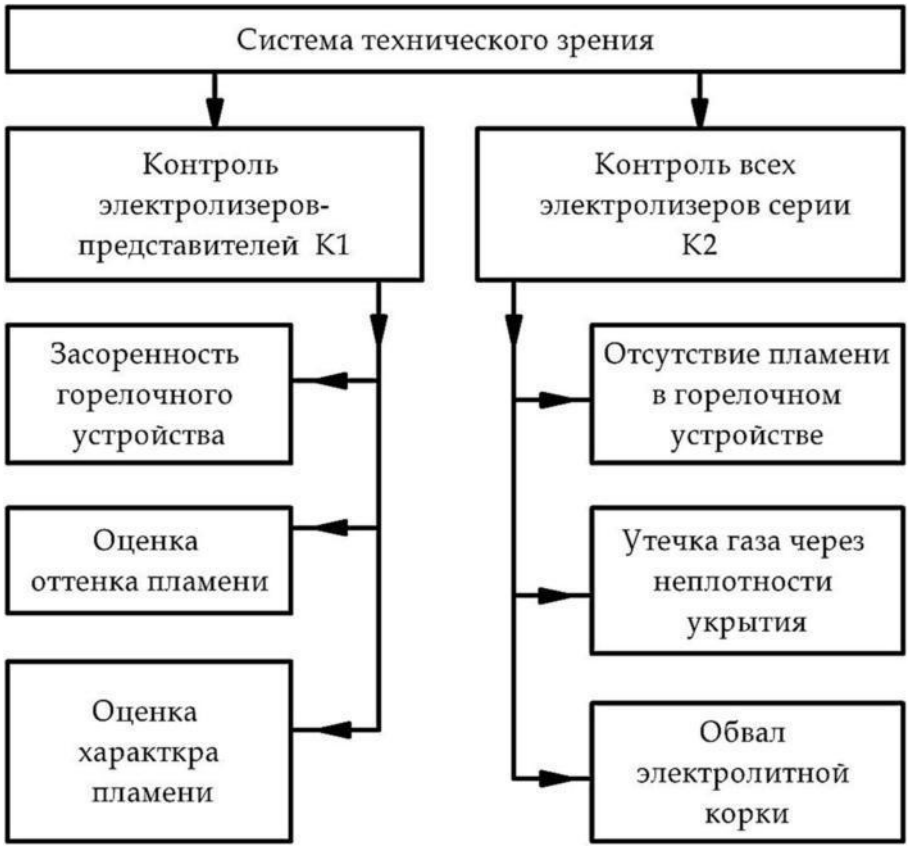


Рисунок 4.72 – Схема автоматизированного мониторинга технологического процесса производства алюминия на участке электролизного цеха

4.6 Выводы по Главе 4

1. Для классификации пороков при оценке качества светопрозрачных материалов (в том числе стекла и изделий из стекол) помимо традиционно используемых яркостных и геометрических признаков, предложено использовать теневой признак для распознавания внутренних пороков, определяющих оптическую неоднородность (пузырь и свиль).

2. Проведенные исследования показывают, что использование фильтра *Laplace* с матрицами 3x3 и 5x5 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.
3. Алгоритм оценки качества стекла и изделий из стекол включает в себя классификацию пороков, оценку их геометрических параметров, подсчет количества и позволяет произвести оценку качества изделия из стекла в соответствии с ГОСТ.
4. Особенностью контроля изделий типа «тела вращения» по изображению сечения, при использовании в качестве приемного устройства цифровой камерой с нетелецентической оптикой, является появление дополнительных погрешностей: перспективной погрешности от смещения оси симметрии тела вращения относительно оптической оси, погрешности от нарушения условия перпендикулярности плоскости тест-объекта оптической оси, смещения оси симметрии тела вращения и удаленности контролируемого сечения от оптической оси.
5. Моделирование процесса передачи измерительной информации системами измерения геометрических размеров по изображению сечений «тел вращения» с использованием в качестве приемного устройства цифровой камерой с нетелецентической оптикой, показало возможность компенсации погрешности измерения диаметров тел вращения алгоритмическим методом.
6. Предложенная методика и расчетные соотношения для контроля положения тест-объекта можно использовать как для коррекции его положения перед процедурой калибровки, так и для реализации алгоритма компенсации погрешности вследствие его неперпендикулярности к оптической оси.
7. Применение зеркальных преобразователей позволяет упростить структуру системы регистрации и позволяет системе с одной камерой решать задачи определения положения объекта контроля и оценки состояния всей его поверхности при невысоких требованиях к точности измерения.

8. Компоновка системы контроля «тел вращения» на основе использования свойств зеркального преобразователя из двух плоских зеркал позволяет контролировать геометрические параметры изделий, находящихся как в фиксированном положении, так и при смещениях объекта контроля в пределах ± 5% от рабочей дистанции. В то же время при нестационарном положении осесимметричных объектов задача контроля их формы в плоскости, перпендикулярной оси симметрии (например, овальности), становится трудно реализуемой.
9. Применение систем контроля активного типа с использованием зеркальных преобразователей для определения положения плоскости вращения, как показывают теоретические исследования, позволит повысить точностную надёжность процедуры контроля за счет исключения влияния субъективных погрешностей.
10. Проведенный анализ точности устройства контроля положения плоскости вращения показал, что при установке ЗП под углом 5 … 15° доминирующей являются погрешность измерения положения штрих-марки, а при изготовлении и юстировке устройства особое внимание следует уделить соблюдению условия перпендикулярности положения поверхности анализа относительно оси светового луча.
11. Исследование возможности контроля качества брикетированных материалов с применением оптических систем геометрического типа с пространственным разрешением показало, что они позволяют реализовать как задачу контроля геометрии изделий, так и поверхностной оценки состава материала.
12. Показана возможность использования оптических средств контроля, реализующих спектральный и пространственный метод оптического излучения, для регистрации визуальных признаков нарушений технологического процесса электролиза в металлургической отрасли, и определены способы получения измерительной информации.

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ И СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

5.1 Экспериментальное исследование алгоритма компенсации погрешностей систем контроля размеров листовых изделий оптическим геометрическим методом с пространственным разрешением

Для проведения исследований по оценке возможности уменьшения погрешности измерения размеров листовых деталей при использовании алгоритма комплексной компенсации погрешностей систем контроля оптическим геометрическим методом с пространственным разрешением в проходящем свете (проекционным способом), описанного в разделе 3.6, разработана экспериментальная установка (рисунок 5.1).

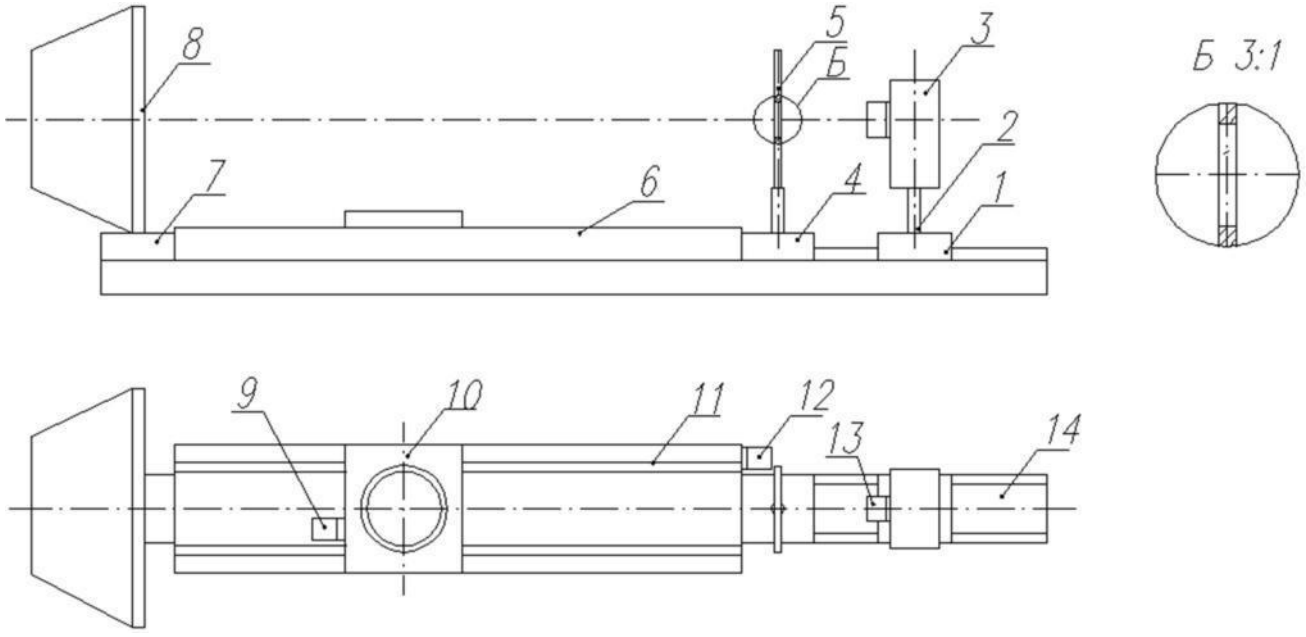


Рисунок 5.1 – Схема установки контроля размеров листовых изделий

Объект контроля (листовая деталь) закрепляется на держателе (на схеме установки условно не показан), который размещается на механизме поворота 10 с

приводом 9 и может менять угол поворота объекта контроля относительно оптической оси цифровой камеры. Подвижная каретка 10, на которой размещен поворотный механизм 9, может с помощью привода 12 перемещать объект контроля по направляющим 11 вдоль оптической оси цифровой камеры, меняя рабочее расстояние, образуя конструкцию координатного стола 6. Координатный стол 6 устанавливается на скамью 14. Осветитель 8 закреплен на скамье 14 при помощи кронштейна 7. Цифровая камера 3 с объективом 13 закреплена на скамье 14 с противоположной стороны от осветителя 8 при помощи каретки 1 на кронштейне 2, имеющем возможность регулироваться по высоте. Такое расположение осветителя и камеры обеспечивают проведение исследований в проходящем свете. Диафрагма 5, ограничивающая поле зрения цифровой камеры 3, закреплена на каретке 4 и установлена на скамью 14 между объектом контроля и цифровой камерой 3.

Общий вид установки показан на рисунке 5.2.

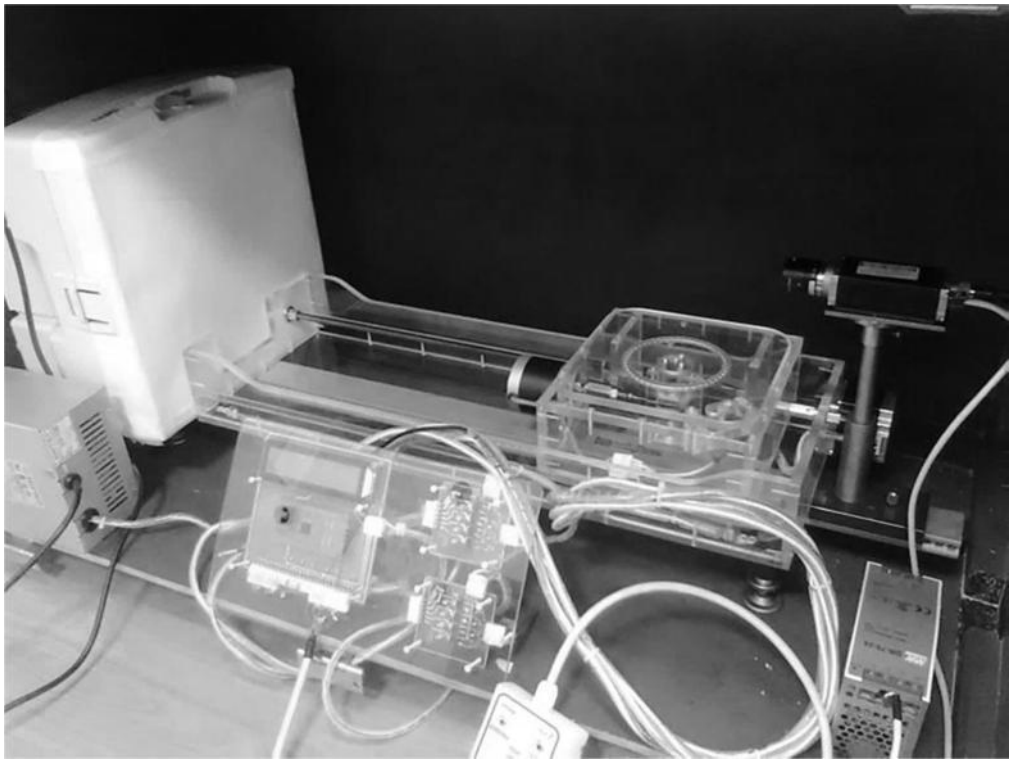


Рисунок 5.2 – Общий вид установки для исследований метрологических характеристик алгоритма компенсации погрешностей контроля размеров листовых изделий

Экспериментальные исследования проводились при следующих допущениях:

- положение объекта контроля фиксированно относительно цифровой камеры;
- плоскость объекта контроля совпадает с плоскостью тест-объект для калибровки.

В ходе экспериментов применялось следующее аппаратное обеспечение[1]:

1. монохромные цифровые камеры:
   - 1.1. *PILOT piA2400-17gm* (сенсор: CCD; разрешение 2456x2058),
   - 1.2. *ACE acA640-120gm* (сенсор: CCD; разрешение 659x494),
   - 1.3. *Smart Camera NI 1722* (сенсор: CCD; разрешение 640x480);
2. объективы с фиксированным фокусным расстоянием:
   - 2.1. *Ricoh FL-HC0612A-VG* (f=6 мм),
   - 2.2. *Computar M1214-MP2* (f=12 мм),
   - 2.3. *Ricoh FL-CC2514-2M* (f= 25 мм).

Исследования производилось для всех сочетаний цифровых камер и объективов.

В качестве объектов контроля использовались типовые листовые детали, выполненных из стали (пластины фигурные), размеры которых не превышали 150x200 мм. За действительные значения измеряемых величин фигурных пластин, принимались результаты измерений, полученные на контрольно-измерительной плите с использованием плоскопараллельных концевых мер и преобразователя линейного перемещения со штоком ЛИР14—20-01 2-го класса точности. Оценка метрологических характеристик алгоритма компенсации погрешностей системы контроля геометрических параметров проводилась на основе анализа многократных измерений (серий из 5 измерений с 4 перестановками) размеров типовых деталей. Для калибровки использовались: стандартный тест-объект

[1] Выбор аппаратной части для рассматриваемой установки и в дальнейшем определялся на основании анализа, проведенного в разделе 1.3.5. и исходя из практической необходимости качественного повышения точности процессов измерений геометрии изделий при автоматизации производств различных отраслей промышленности с использованием доступных аппаратных средств.

National Instruments в виде массива точек (рисунок 3.11а) и в виде сетки линий (рисунок 3.11ж).

Передняя панель программы реализующей алгоритм комплексной компенсации погрешностей проекционной системы контроля в ПО *LabVIEW* представлена на рисунке 5.3 [200].

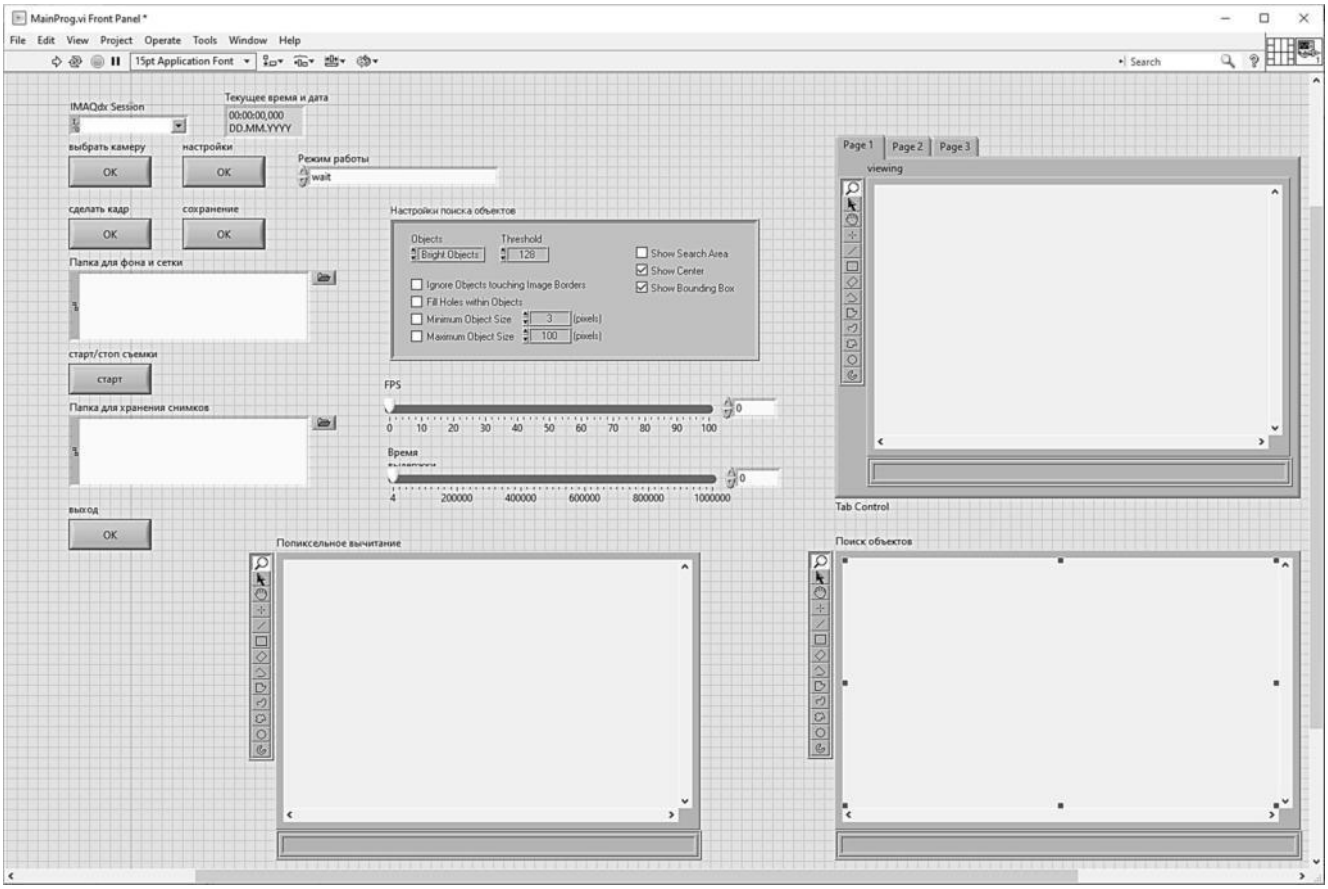


Рисунок 5.3 – Интерфейс программы комплексной компенсации погрешностей проекционной системы контроля

На рисунках 5.4…5.6 представлены обобщенные результаты [6], представленные в виде гистограмм, показывающих максимальные значения погрешности определения размеров образцов оптической проекционной системы для следующих видов преобразования изображения детали:

1. аффинные преобразования с использованием постоянного коэффициента линейного увеличения, т.е. без компенсации аберраций реальной оптической системы (обозначен – БК);

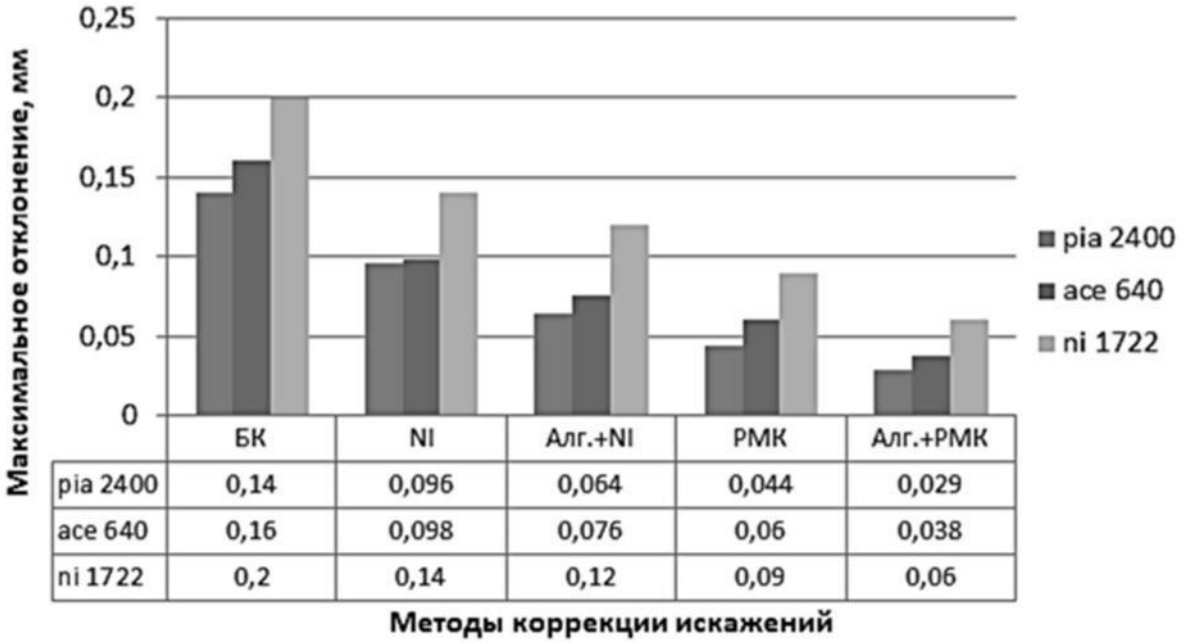
2. калибровка *Distortion Model: Polynomial (K*1*, K*2*, K*3*) Correct Tangential Distortion* компании *National Instruments* (обозначена – NI);

3. предложенный алгоритм комплексной компенсации погрешностей системы контроля (описанный в разделе 3.6) в сочетании с калибровкой *Distortion Model: Polynomial (K*1*, K*2*, K*3*) Correct Tangential Distortion* компании *National Instruments* (обозначен - Алг.+NI),

4. разработанный способ калибровки цифровых камер, основанный на алгоритме дискретизации пространства изображений (обозначен – РМК (разработанный метод коррекции)),

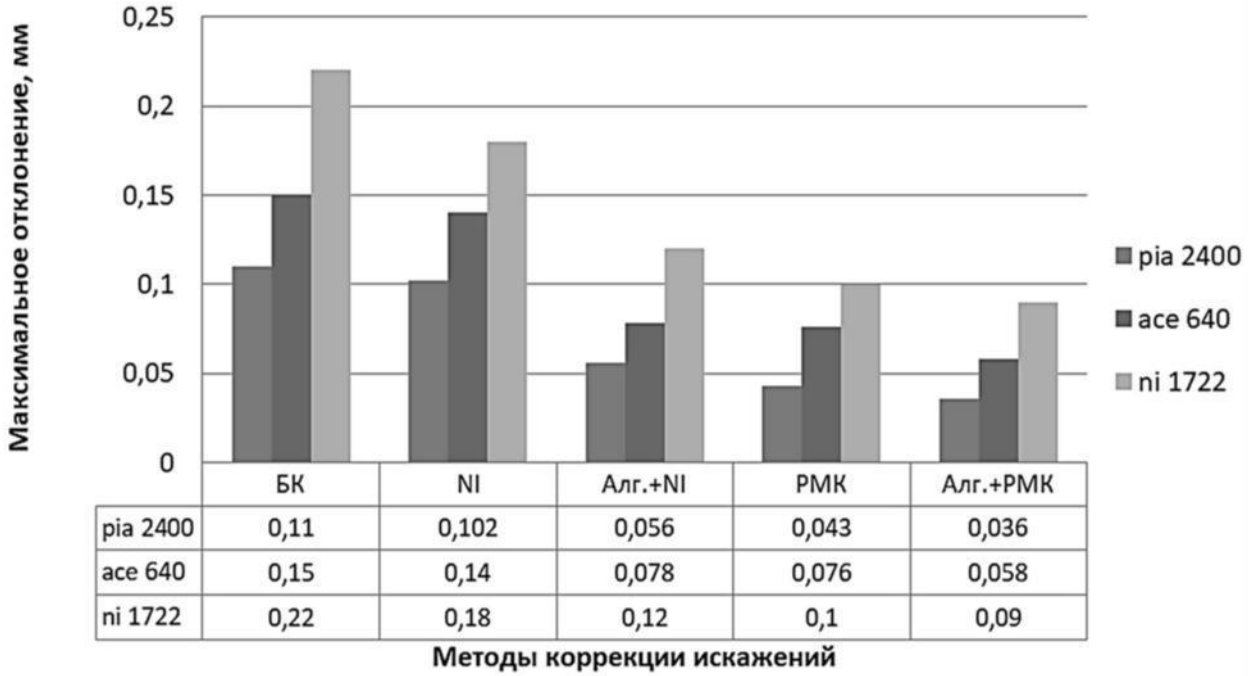
5. предложенный алгоритм комплексной компенсации погрешностей системы контроля в сочетании с разработанным способом калибровки цифровых камер (обозначен – Алг.+РМК).

Приведенные обозначения методик компенсации будем использовать и при анализе результатов экспериментальных исследований.



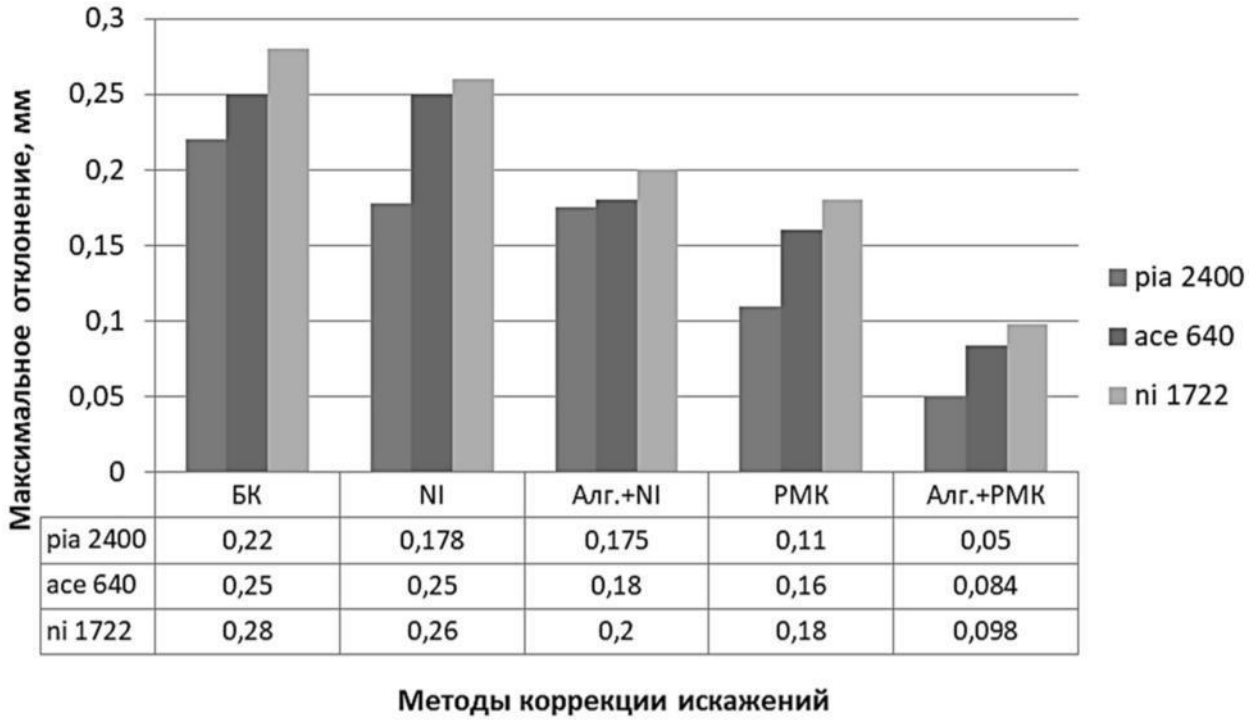
	БК	NI	Алг.+NI	РМК	Алг.+РМК
pia 2400	0,14	0,096	0,064	0,044	0,029
ace 640	0,16	0,098	0,076	0,06	0,038
ni 1722	0,2	0,14	0,12	0,09	0,06

Рисунок 5.4 – Сравнение максимальных значений погрешности определения размеров образцов при различных способах обработки изображений для цифровых камер с объективом *f*=25 мм



	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

Рисунок 5.5 – Сравнение максимальных значений погрешности определения размеров образцов при различных способах обработки изображений для цифровых камер с объективом *f*=12 мм



	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 5.6 – Сравнение максимальных значений погрешности определения размеров образцов при различных способах обработки изображений для цифровых камер с объективом *f*=6 мм

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 возможность уменьшения погрешности определения размеров практически в полтора раза для всех сочетаний цифровых камер и объективов.

Разработанный алгоритм компенсации погрешностей в сочетании с разработанным способом калибровки цифровых камер по сравнению со способом калибровки *Distortion Model* для камер с высоким разрешением позволяет уменьшить погрешности определения размеров более чем в три раза, а для камер с низким разрешением – в два раза.

Оценка значений погрешности для разработанного алгоритма повышения точности системы контроля размеров листовых изделий геометрическим методом пространственного излучения с 2*D* разрешением с использованием цифровых камер с нетелецентрической оптикой производилась на основе методов математической статистики [32, 72, 144, 188, 225].

Для проведения оценки погрешности принимались следующие значения: объем выборки n=50, доверительная вероятность α=0.95 соответствующий коэффициент Стьюдента $t(\alpha,n)$=2,096.

Пример результатов замера одного размера для цифровой камеры *PILOT piA2400-17gm* с 25 мм объективом приведен на рисунке 5.7. Обозначение способов обработки изображения соответствует ранее принятой аббревиатуре. Сравнительная оценка методов обработки изображений для рассмотренного примера представлена в таблицу 5.1.

Полученные оценки погрешностей позволяют говорить о возможности использования проекционных систем контроля, использующих цифровые камеры с объективами с фиксированным фокусным расстоянием, для комплексной оценки геометрии листовых изделий в фиксированном положении для решения задач автоматизации контроля в машиностроительной отрасли.

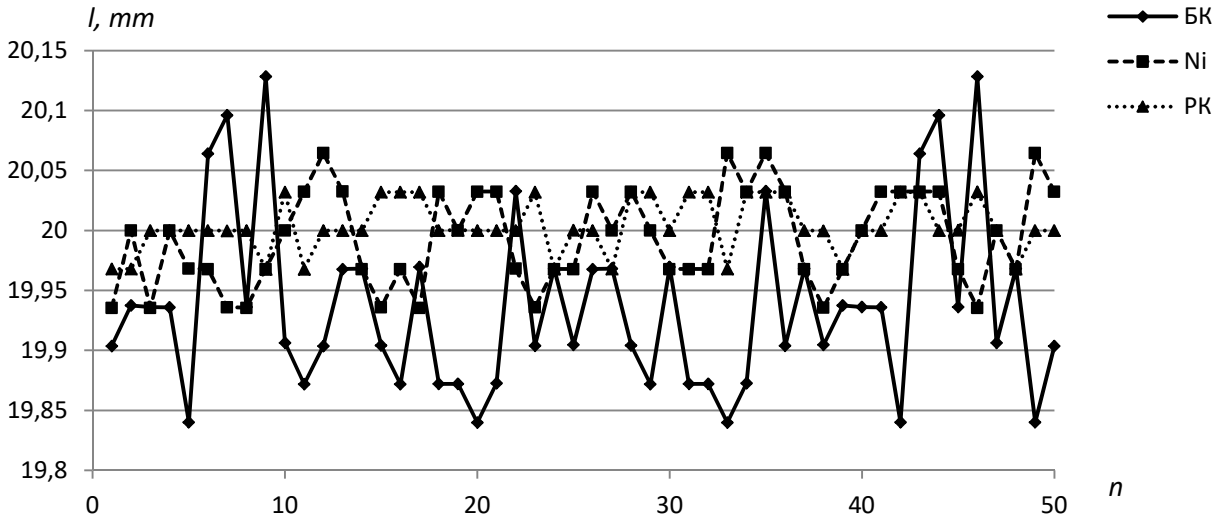


Рисунок 5.7 – График рассеяния размеров детали при различных способах обработки изображений для *PILOT piA2400-17gm* с объективом *f*=25 мм

Таблица 5.1 – Сравнительная оценка методов обработки изображений, мм

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

Пример результатов оценки абсолютной и относительной погрешности предложенного метода калибровки в сочетании с разработанным алгоритмом компенсации приведены в таблицах 5.2 и 5.3 (обозначения соответствуют принятым ранее).

Таблица 5.2 – Абсолютная погрешность измерений размеров детали предложенным методом калибровки в сочетании с разработанным алгоритмом компенсации, мм

Объектив / Цифровая камера	*Ricoh FL-CC2514-2M*	*Computar M1214-MP2*	*Ricoh FL-HC0612A-VG*
PILOT piA2400-17gm	Δ=±0,02	Δ=±0,04	Δ=±0,05
ACE acA640-120gm	Δ=±0,03	Δ=±0,048	Δ=±0,062
NI 1722	Δ=±0,046	Δ=±0,06	Δ=±0,07

Таблица 5.3 – Относительная погрешность измерений размеров детали предложенным методом калибровки в сочетании с разработанным алгоритмом компенсации, %

Объектив / Цифровая камера	*Ricoh FL-CC2514-2M*	*Computar M1214-MP2*	*Ricoh FL-HC0612A-VG*
PILOT piA2400-17gm	0,1	0,2	0,25
ACE acA640-120gm	0,15	0,24	0,31
NI 1722	0,23	0,3	0,35

Программная реализация алгоритма комплексной компенсации в среде *LabVIEW* позволяет в полной мере реализовать разрешение используемых камер технического зрения, обеспечив возможность измерения размеров с погрешностью сопоставимой с разрешением цифровых камер – до 2 px. В представленном алгоритме область работоспособности ограничена изменением углового положения объекта контроля в пределах ± 15º относительно оптической оси. Среднее время обработки изображения при однократном применении алгоритма составляет 706 мс.

5.2 Сравнительная оценка надежности выявления пороков стекол автоматизированной системой и визуальным контролем

Для проведения исследований по оценке надежности предложенной модели контроля дефектов светопрозрачных изделий (стекол и стеклопакетов), описанной в п. 4.1.2 рисунок 4.8 [29] на основе предложенной схемы детектирования пороков листового стекла (рисунок 4.10) была разработана лабораторная установка (рисунок 5.8) [26].

Объект контроля 8 (образец листового стекла) закрепляется на держателе 7, который размещен на каретке 6, установленной на направляющие скамьи 14.

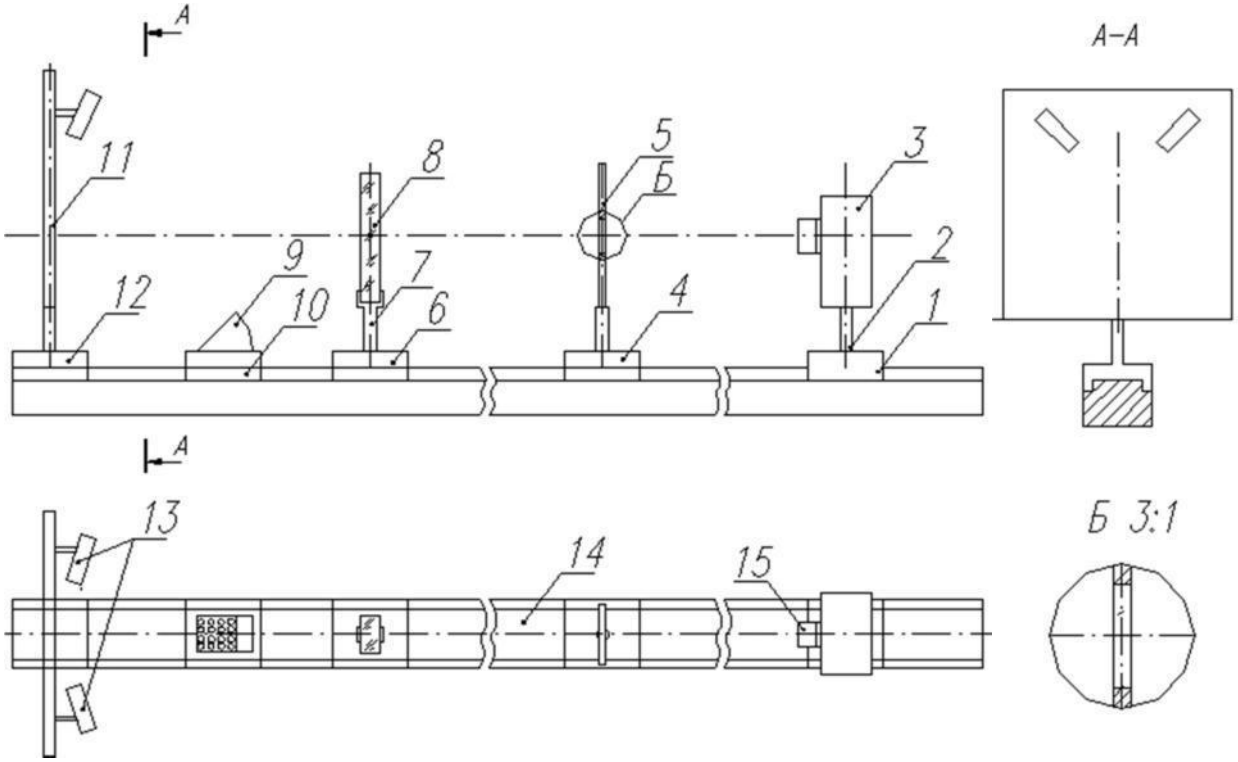


Рисунок 5.8 – Схема лабораторной установки для детектирования дефектов листовых стёкол

Система подсветки, состоящая из экрана 11 и осветителей 13, закрепляется на держателе 12 и обеспечивает согласно [54] освещенность большую либо равную 300 лк. Дополнительная подсветка в соответствии с предложенной методикой формирования дополнительного теневого признака в п. 4.1.2 и представленного на рисунке 4.9, реализована с использованием светильника 9 на каретке 10. Цифровая камера 3 с объективом 15 закреплена на скамье 14 при помощи каретки 1 на кронштейне 2, имеющем возможность регулироваться по высоте. Такое расположение осветителя и камеры обеспечивает проведение исследований в проходящем свете. Диафрагма 5 жестко закреплена на каретку 4 и установлена на скамью 14 между объектом контроля и цифровой камерой 3. Диафрагма 5 ограничивает поле зрения цифровой камеры 3.

Общий вид установки показан на рисунке 5.9.

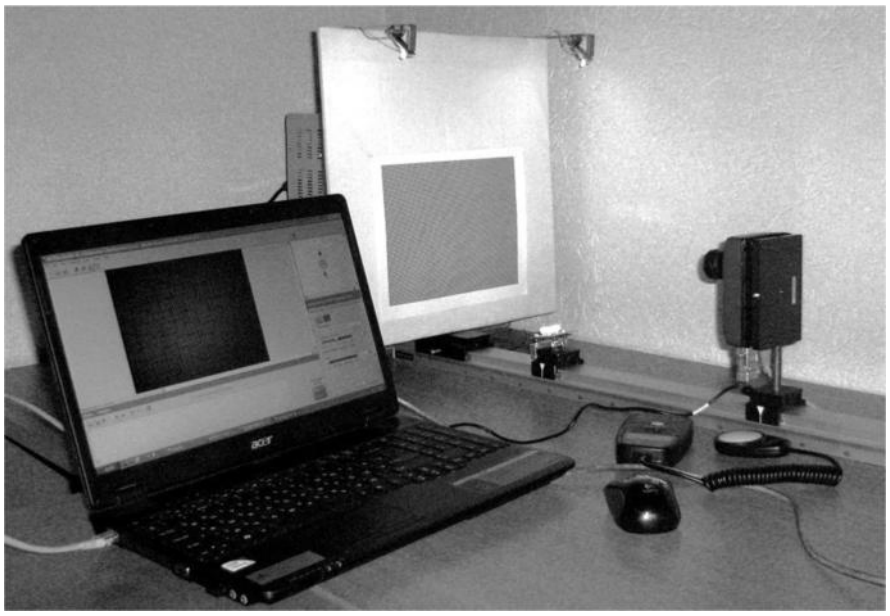


Рисунок 5.9 – Лабораторная установка для оценки надежности разработанной автоматизированной системы детектирования дефектов листовых стекол

Для исследований использовалась цифровая камера *NI 1722* (сенсор: CCD; разрешение 640x480) с объективом *Computar M0814-MP2* (f=8 мм).

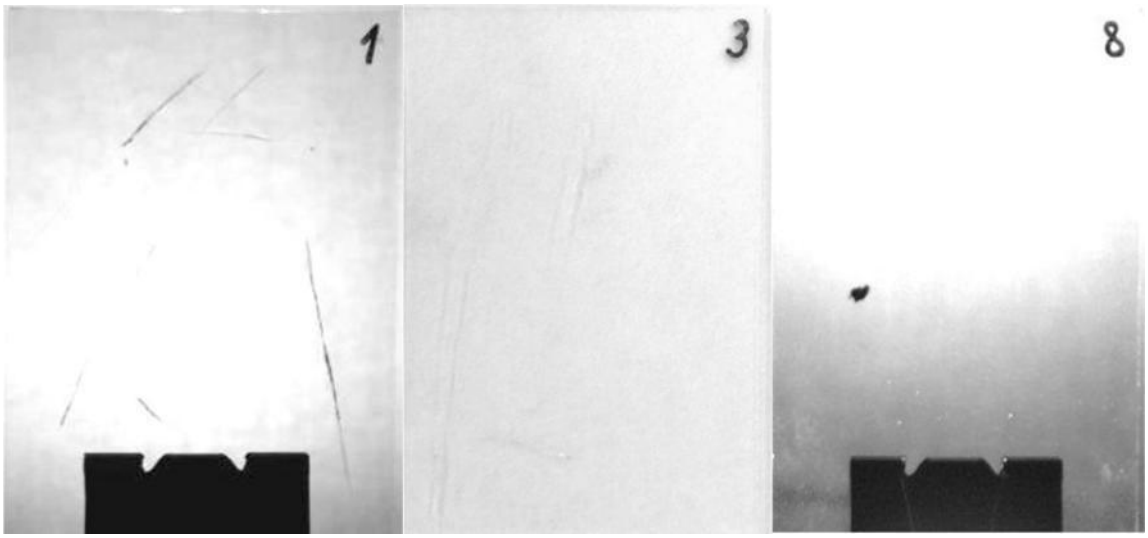
Экспериментальные исследования проводились при известном (фиксированном) положение объекта контроля и цифровой камеры. Для оценки дисторсии использовалось программное обеспечение *National Instruments Vision Builder.* Максимальная величина относительной дисторсии изображения составляет 0,33 %, что является допустимой для требуемой точности измерений [54, таблица 5], поэтому для калибровки изображения использовался метод – *Simple Calibration.* Программное обеспечение автоматизированной системы детектирования пороков листового стекла реализовано в ПО *NI Vision Builder*. В качестве примера на рисунке 5.10 представлен алгоритм работы программы детектирования порока «пузырь», реализованный в *NI Vision Builder*.

Определение освещенности контролируемого объекта проводились люксметром *Precision Mastech Enterprises* MS6610. Замеры освещенности проводились перед каждой серией экспериментов. Уровень освещённости составлял E = 447…489 лк, что соответствует требованиям [54] (E ≥ 300 лк).

Рисунок 5.10 – Алгоритм детектирования порока «пузырь» в программе *NI Vision Builder*

Для исследования были подготовлены десять образцов стекла с тремя типами дефектов: царапина, камень, пузырь. Пример изображения дефектов

стекол для образцов 1, 3 и 8 показан на рисунке 5.11. Характер и размеры дефектов на образцах представлены в таблице 5.4.



а) б) в)

Рисунок 5.11 – Изображения образцов контроля а) - № 1, б) - №2 и в) - №8

Для оценки результатов работы алгоритма распознавания дефектов, реализованного в ПО *NI Vision Builder*, проведён анализ вероятности обнаружения пороков на образцах листового стекла, которая оценивалась коэффициентом выделения дефекта $k_в$, определяемым зависимостью (5.1):

$$k_в = \frac{\sum_{i=1}^{k} m_i}{k \cdot N}, \tag{5.1}$$

где m_i – количество дефектов обнаруженных в ходе i-го эксперимента;

k – количество произведённых экспериментов;

N – общее количество дефектов.

Для сравнения разработанной системы с используемым на производстве визуальным контролем был проведен эксперимент, в котором участвовали 30 человек, осуществлявшие функции работников отдела технического контроля. Контроль пороков осуществлялся в соответствии с требованиями [54].

В ходе эксперимента участники исследований, для каждого из десяти образцов стекол, выявляли пороки, производили подсчёт их количества и измерение размеров пороков.

Таблица 5.4 – Параметры объектов исследования

№ образца	№ дефекта	Класс дефектов (размеры дефектов, мм)			№ образца	№ дефекта	Класс дефектов (размеры дефектов, мм)		
		Царапина	Пузырь	Камень			Царапина	Пузырь	Камень
1	1 2 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13	56,5; 21; 67; 45; 30; 30,5; 40; 48; 42; 46; 10; 20; 30	-	-	6	1 2	31; 34	-	-
2	1	7	-	-	7	1 2 3	36; 15; 29	-	-
3	1	-	2	-	8	1 2		4	1,5
4	1	8,5	-	-	9	1 2 3 4	59; 2; 1	0,5	-
5	1 2 3	4; 2; 2	-	-	10	1 2	1,5	-	5

Измерения производились линейкой по ГОСТ 427-75. Полученные данные заносились в дефектную карту, общий вид которой показан в таблице 5.5.

Выявленные дефекты заносились в таблицу в порядке расположения на стекле – сверху вниз и слева направо. Для оценки погрешности измерений при визуальном осмотре было выбрано десять дефектов с геометрическими

параметрами, представленными в таблице 5.6. На основе этих данных была построена зависимость длины дефекта от погрешности измерений (рисунки 5.14…5.15).

Таблица 5.5 – Дефектная карта образцов листового стекла

Номер образца	1		2		3		…		10	
Номер дефекта	Дефекты стекла									
	вид	раз-мер	вид	раз-мер	вид	раз-мер	вид	раз-мер	вид	раз-мер
1.										
2.										
….										

Таблица 5.6 – Параметры дефектов для оценки погрешности измерений

Номер дефекта	Класс дефекта	Максимальный линейный размер, L_{max} ,мм
1	царапина	57
2	царапина	21
3	царапина	67
4	царапина	45
5	пузырь	2
6	царапина	15
7	царапина	30
8	царапина	4
9	царапина	36
10	камень	2

На основе анализа результатов исследования можно сделать выводы о том, что для визуального контроля наиболее сложной проблемой является определения размеров царапин. Распознавание дефектов на последних образцах ухудшалось, что наглядно демонстрирует появление субъективных составляющих погрешностей, связанных с уставанием контролера. При визуальном контроле

пороки на стеклах выявлены не в полном объёме или, наоборот, перебракованы по количеству. Замечено, что при визуальном осмотре погрешность увеличивается у дефектов длиной более 35 мм.

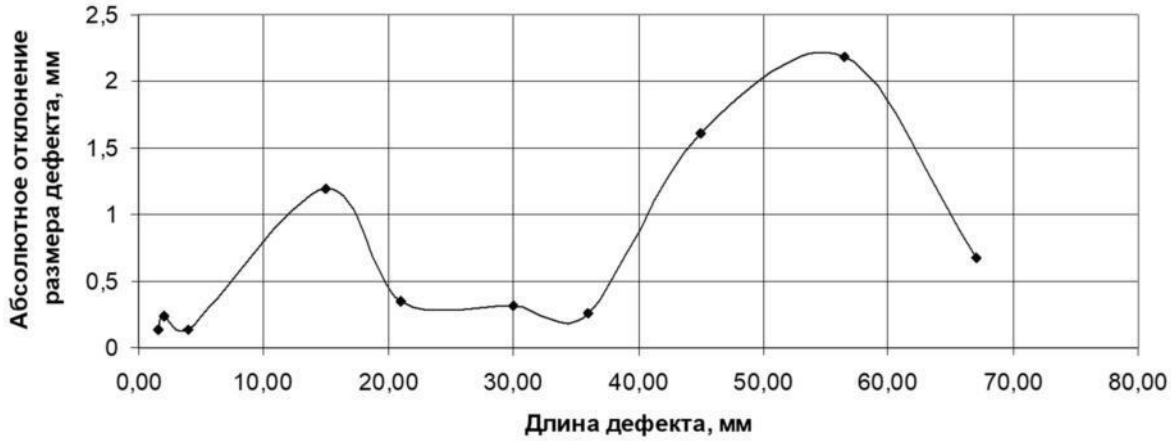


Рисунок 5.14 – Абсолютная погрешность определения размера дефекта при визуальном способе контроле

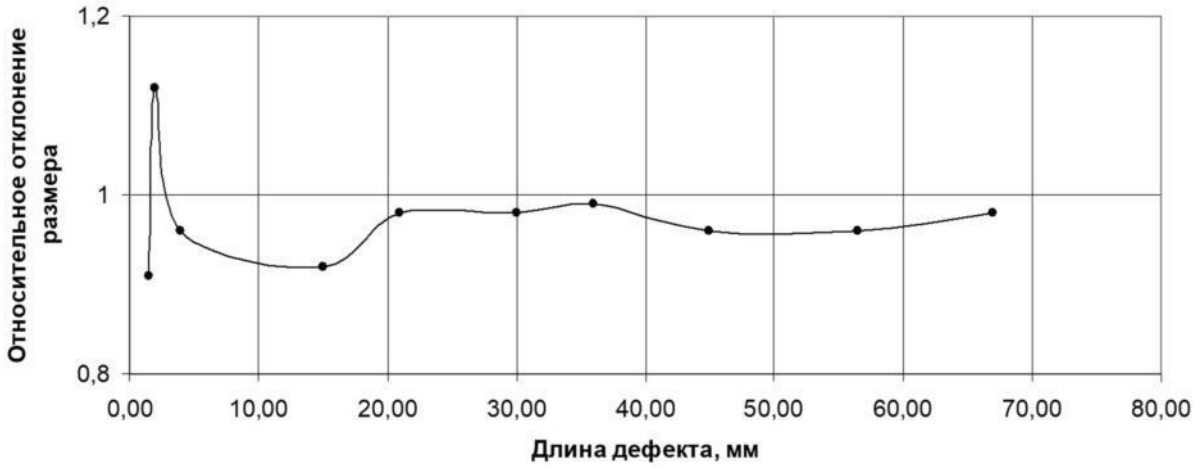


Рисунок 5.15 – Относительная погрешность определения размера дефекта при визуальном способе контроля

Вероятность обнаружения дефектов «царапина», «пузырь» и «камень» при помощи системы детектирования пороков стекла лежит в пределах 0.92-0.95, что позволяет констатировать большую надежность детектирования.

На рисунке 5.16 представлена диаграмма, показывающая коэффициент выделения дефектов для образцов контроля для случаев визуального контроля и при применении автоматизированной системы детектирования дефектов листового стекла. При визуальном контроле для одного из контрольных образцов

(№7) отмечен $k_в > 1$, что соответствует перебраковке. При визуальном контроле в большинстве случаев не было выявлено всех его дефектов, коэффициентом выделения находится в диапазоне $0,62 < k_в < 1,2$. Использовании системы автоматизированного контроля повышает вероятность выявления дефектов, обеспечивая коэффициентом выделения в диапазоне $0,92 < k_в < 0,99$ от 0,92 до 0,99.

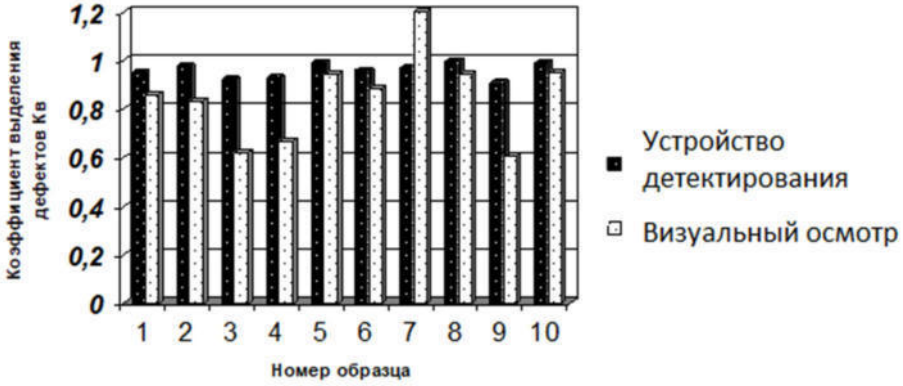


Рисунок 5.16 – Коэффициент выделения пороков листового стекла для 10 образцов

На рисунках 5.17 – 5.19 представлены диаграммы, характеризующие коэффициенты выделения различных видов дефектов листовых стекол.

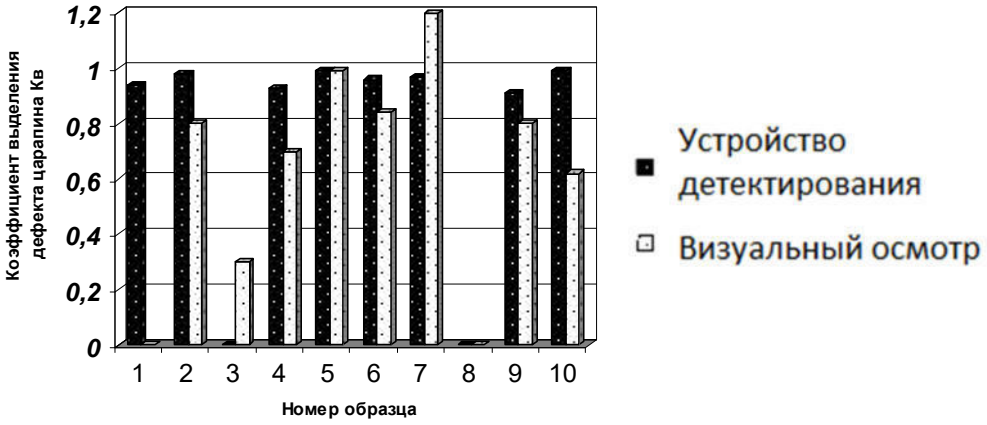


Рисунок 5.17 – Гистограмма детектирования дефекта «царапина» листового стекла с использованием предложенной системы и методом визуального осмотра

Из диаграммы на рисунке 5.17 видно, что перебраковка образца №7 произведена по дефекту «царапина». Образцы №4 и №10 в среднем перебракованы по дефекту «пузырь», так как $k_в$ отличен от нуля на рисунке 5.18

для образцов, на которых этот дефект отсутствует. Аналогично образец №3 перебракован по дефекту «камень» (рисунок 5.19).

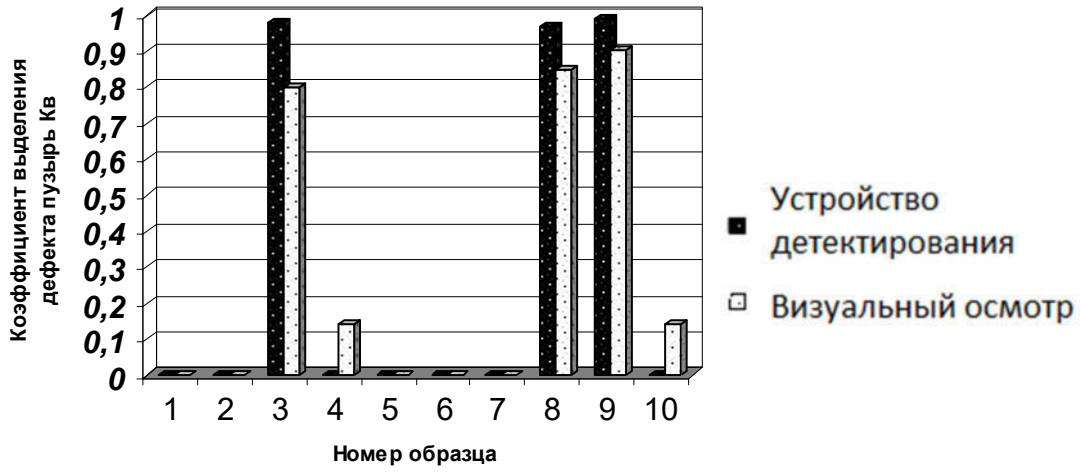


Рисунок 5.18 – Гистограмма детектирования дефекта «пузырь» листового стекла с использованием предложенной системы и методом визуального осмотра

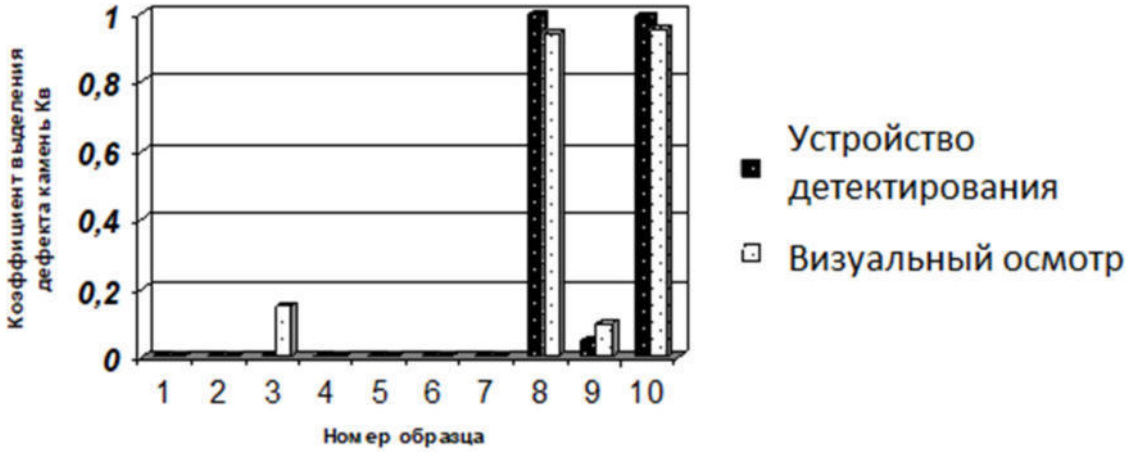


Рисунок 5.19 – Гистограмма детектированиядефекта «камень» в листового стекла с использованием предложенной системы и методом визуального осмотра

Следует отметить, что исследуемое устройство детектирования пороков стекла (с используемой аппаратной частью) обладает ограниченными возможностями в определении размеров дефектов, и погрешность устройства при измерении пороков на расстоянии 500 мм соизмерима с погрешностью при измерении дефекта человеком лупой с ценой деления 0,25 мм по ГОСТ 25706-83.

При увеличении поля зрения требуется использовать цифровые камеры с большим разрешением.

В целом, исследование разработанной автоматизированной системы детектирования пороков стекла подтвердило возможность с заданной достоверностью оценивать качество стекла и изделий из него и показало ее преимущество по сравнению с используемым в настоящее время на отечественных предприятиях визуальным контролем.

5.3 Экспериментальные исследования погрешности определения положения тест-объекта

Для проведения исследований по оценке погрешности контроля положения тест-объекта, рассмотренной в п. 4.2.2, был разработан стенд (рисунок 5.20). Целью исследования являлась оценка возможности использования выведенной зависимости для определения положения тест-объекта при принятых допущениях.

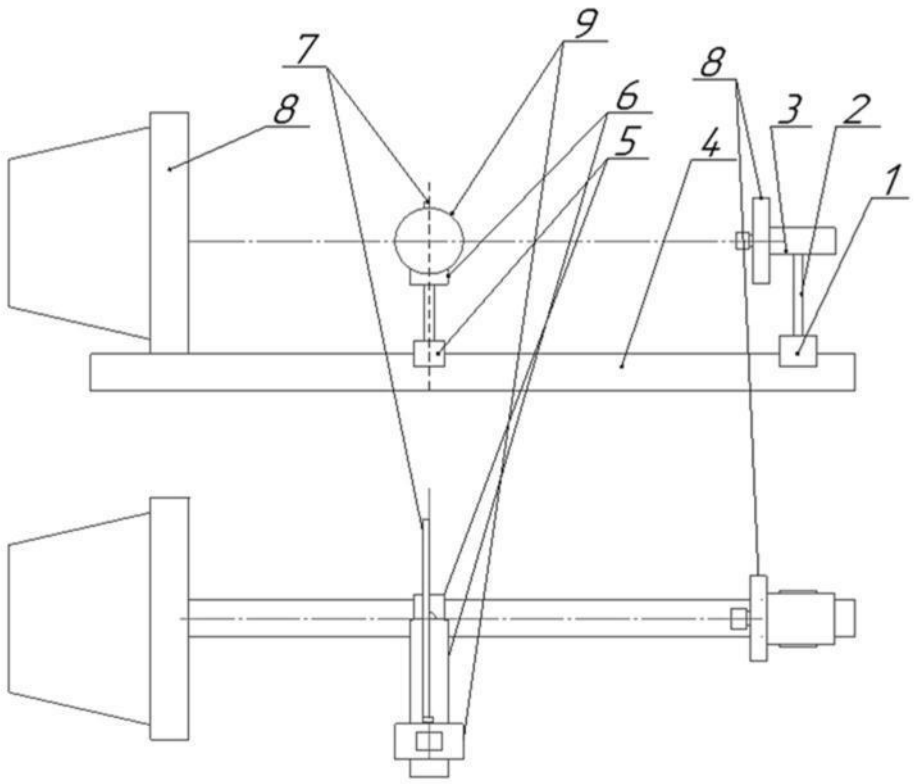


Рисунок 5.20 – Схема установки для оценки погрешности контроля положения тест-объекта

Тест-объект 7 закрепляется на держателе (на схеме установки условно не показан), который закреплен на валу преобразователя угловых перемещений ЛИР-158А 500-05-ПИ, который позволяет менять угол поворота тест-объекта с разрешением 0,015°относительно оси проходящей через рабочую поверхность тест–объекта и перпендикулярной оптической оси цифровой камеры. Подвижная каретка 5, на которой при помощи кронштейна 6 закреплен преобразователь угловых перемещений, позволяет перемещать объект контроля по направляющим 4 вдоль оптической оси цифровой камеры, меняя рабочее расстояние.

Система подсветки, состоящая из фонового осветителя 8 и системы кольцевой подсветки 9 (с регулируемой яркостью), позволяет реализовать схемы контроля как в проходящем, так и отраженном свете.

Цифровая монохромная камера *PILOT piA2400-17gm* (сенсор: CCD; разрешение 2456x2058) с объективом *Computar M1214-MP2 f*=12 мм закреплена на скамье 4 с противоположной стороны от осветителя 8 при помощи каретки 1 на кронштейне 2, имеющем возможность регулироваться по высоте. Общий вид установки показан на рисунке 5.21. Для отображения результатов определения положения тест-объекта используется устройство цифровой индикации ЛИР-510А-00.

Рисунок 5.21–Общий вид установки для оценки погрешности контроля положения тест объекта

Исследовались два тест-объекта размером 120×90 мм, представляющих собой массивы из 340 и 70 точек (сокращенно Т-О 340 и Т-О 70), используемых для калибровки (рисунок 5.22). Исследования проводилось при 3х уровнях освещенности в отраженном и проходящем свете.

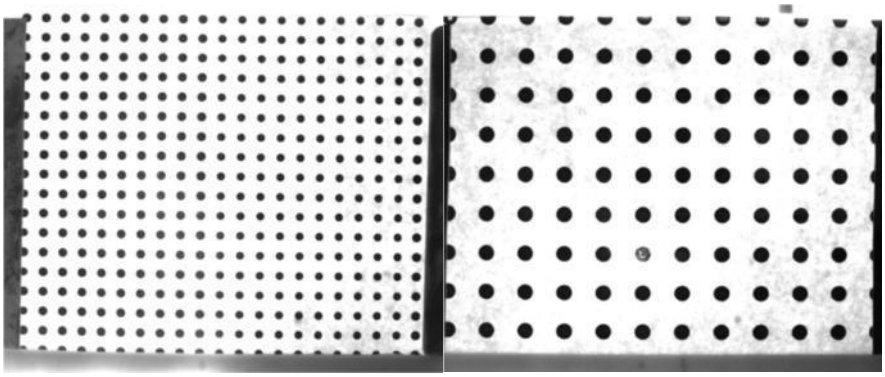


Рисунок 5.22 – Тест-объекты из 340 и 70 точек

Для реализации рассмотренной в п. 4.2.2 методики определения положения тест-объекта разработано программное обеспечение в среде *LabVEIW* [202]. Интерфейс программы и окно для выбора опорных точек представлены на рисунке 5.23.

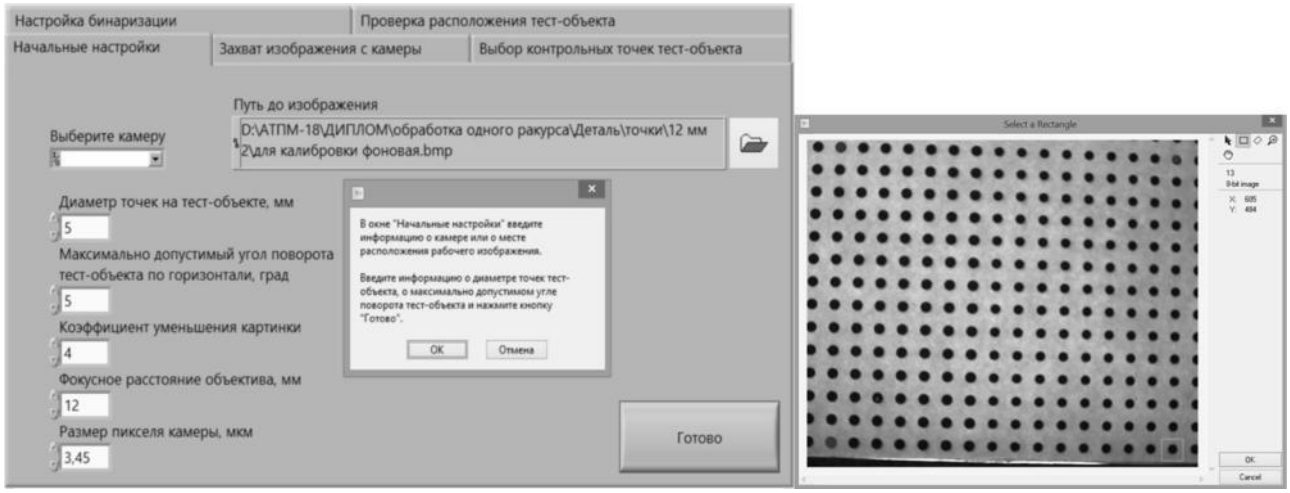


Рисунок 5.23 – Окно начальных настроек и всплывающее окно для выбора опорных точек

Оценить погешность определения расстояний между опорными точками тест-объекта можно, используя данные таблицы 5.7.

Исходя из полученных данных для выбранных аппаратных средств и размеров тест-объекта разрешение предложенного алгоритма контроля можно оценить в 0,05° на 1 px разницы размеров между верхними и нижними опорными точками.

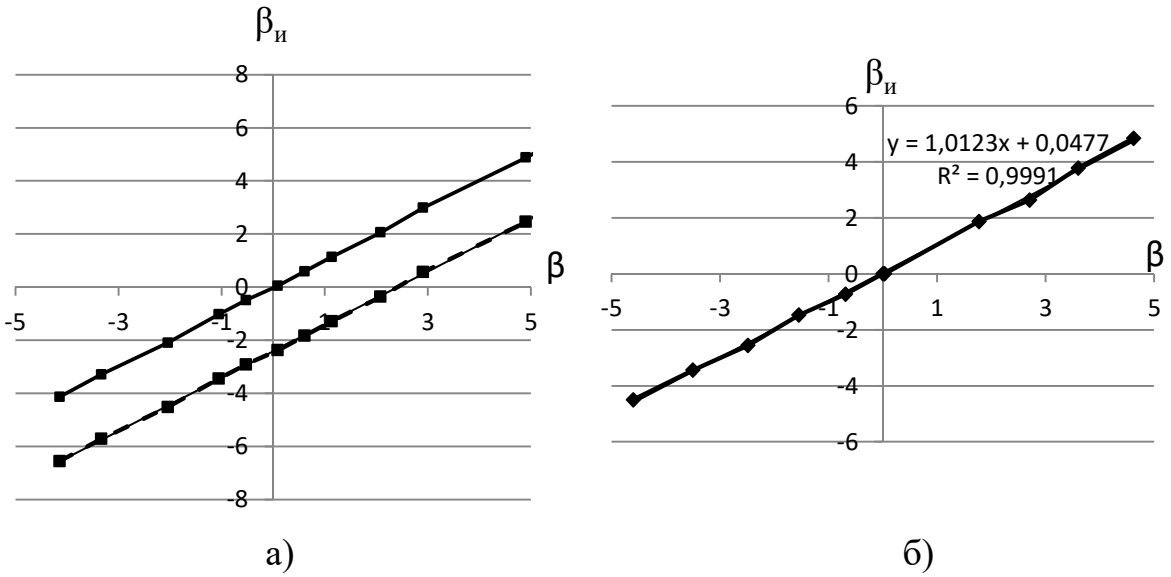
Таблица 5.7 - Оценка погрешности определения расстояний между опорными точками

Составляющие погрешности	Абсолютная погрешность, в px /мм
аберрации оптической системы	±0,5/ 0,025
фоновой засветки, отражения от поверхности объекта	±0,5/ 0,025
позиционирования объекта относительно цифровой камеры (±0,1 мм)	±1,14/ 0,057
распознавания центра опорных точек Ø2 мм	до 2/ 0,05
Σmin-max	до 4,14/ 0,2
СКВ	2,41/ 0,12

На рисунке 5.24 показано графическое представление результатов исследований алгоритма определения положения [250]. Поскольку конструкция стенда не предусматривает первоначальное однозначное определение положения элементов измерительной системы относительно оптической оси, начальное значение системы отсчета было смещено на 2.42° (рисунок 5.24а). Следующая серия измерений производилось относительно рассчитанного положения соответствующего условию перпендикулярности тест-объекта оптической оси, результаты которой представлены на рисунке 5.24б.

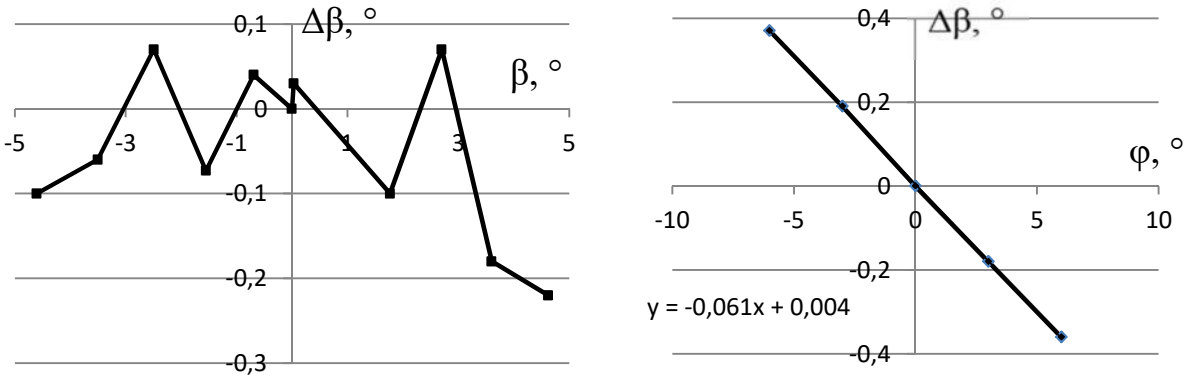
На рисунке 5.25.а приведен график, показывающий расхождение между измеренными значениями и рассчитанными. При повороте относительно оси φ – перпендикулярной оптической оси и оси вращения возникает дополнительная погрешность определения положения тест-объекта. Поскольку задание положения угла φ производилось по лимбу, то был принят шаг в 3°. За положительное направление выбран поворот против часовой стрелки. График зависимости

погрешности определения углового положения тест объекта от угла поворота φ представлен на рисунке 5.25б.



а) б)

Рисунок 5.24 – Графики зависимости измеренного значений углов наклона тест объекта $\beta_и$ и рассчитанного β: а) при отсчете от произвольного положения, б) при отсчете от рассчитанного «нулевого» положения

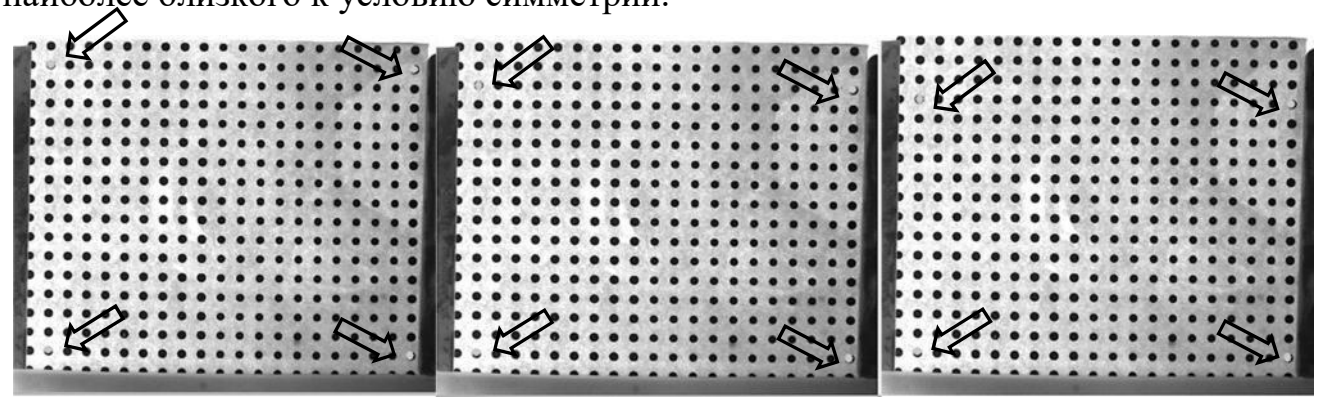


а) б)

Рисунок 5.25 - Графики погрешности определения углового положения тест-объекта: а) при отсчете от рассчитанного «нулевого» положения, б) от угла поворота φ

При использовании алгоритма расчета угла наклона тест-объекта предполагается обеспечение равноудалённости расположения опорных точек относительно оси симметрии тест-объекта. Несоблюдение данного условия приводит к появлению дополнительной методической погрешности. Для оценки

ее величины был проведен ряд экспериментов, в которых при вычислении положения тест-объекта выбор опорных точек (на рисунке 5.26 показаны стрелочками) проводился со смещением в вертикальной плоскости от положения наиболее близкого к условию симметрии.



а) б) в)

Рисунок 5.26 – Выбор опорных точек: а) со смещением верхнего ряда вверх, б) положение, близкое к симметричному, в) со смещением верхнего ряда вниз

Смещения опорных точек в горизонтальной плоскости аналогичны представленным на рисунке 5.26. Оценка влияния выбора опорных точек на погрешность определения угла наклона тест-объекта для трех значений угла β=0, 0,51° и 1,005°.

На рисунке 5.27 показаны результаты оценки влияния выбора опорных точек на погрешность определения угла.

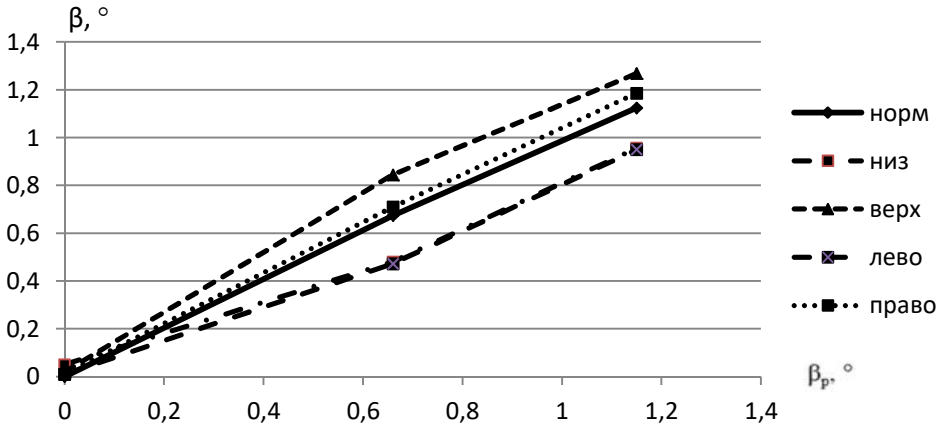


Рисунок 5.27 – Рассчитанные значения угла наклона тест-объекта $\beta_р$ при выборе опорных точек со смещением по горизонтали и вертикали

Из графика видно, что погрешность определения угла наклона может достигать $\Delta\beta_в=0{,}2$, что существенно влияет на точность измерения, и, следовательно, требования к симметричности расположения опорных точек при определении положения тест-объекта следует придерживаться.

Для оценки влияния внешних факторов была проведена серия опытов с различным уровнем освещения (485, 980 и 770 лк) в отраженном и проходящем свете, результаты которых представлены в виде графических зависимостей на рисунке 5.28. Освещенность контролировалась люксметром *Precision Mastech Enterprises* MS6610.

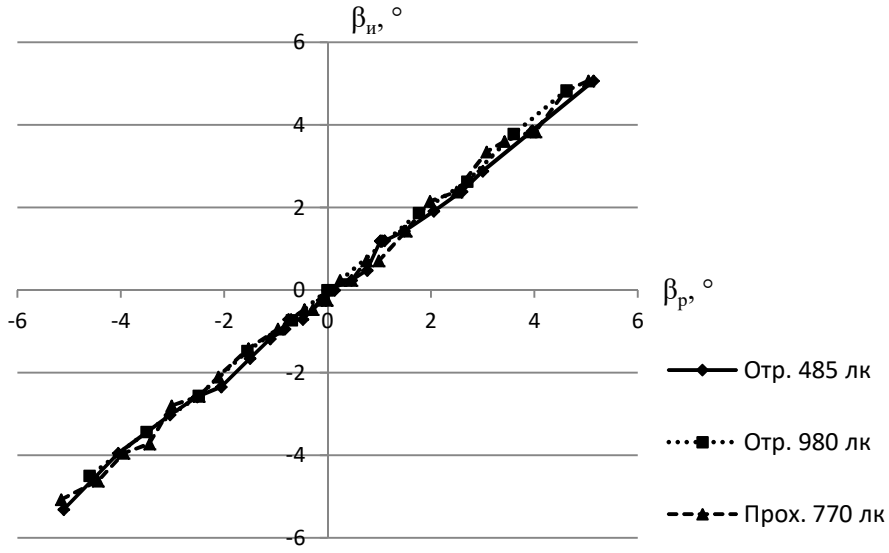


Рисунок 5.28 – Графики значений углов наклона тест-объекта $\beta_и$ и рассчитанного β при разных уровнях освещенности в отраженном и проходящем свете

Результатом анализа пассивного эксперимента стали эмпирические зависимости аппроксимированные линейной функцией:

$y = 1{,}0123x$ при $R^2 = 0{,}9988$ (в проходящем свете с освещенностью 770 лк),

$y = 1{,}0086x$ при $R^2 = 0{,}997$ (в отраженном свете с освещенностью 485 лк),

$y = 1{,}0012x$ при $R^2 = 0{,}9956$ (в отраженном свете с освещенностью 980 лк).

Полученные коэффициенты регрессии показывают достаточно сильную причинную связь, и влияние изменения степени освещенности в рассмотренных пределах можно считать несущественным.

Максимальная погрешность определения положения при использовании тест-объекта с 70 точками в исследованном диапазоне отклонения β=±5° не превышает Δ_β= 0,22°. Исследования показали, что существенное влияние на определение угла поворота оказывает процедура распознавания центров маркерных точек тест-объекта. Максимальная погрешность распознавания центров маркерных точек Ø4 мм доходит до 4px, что приводит к погрешности определения угла наклона в 0,2°.

Для уменьшения влияния распознавания центров маркерных точек при оценке погрешности алгоритма определения угла наклона тест-объекта в рабочем диапазоне (± 1.1°), использовался тест-объект из 340 точек Ø2 мм. Из рабочего диапазона были выбраны 7 значений угла наклона (1,03°, 0,75°, 0,51°, 0,21°, 0°, -0,21°, -0,51°, -0,75°, -1,03°), для которых была произведена оценка точности определения положения. Оценивалась возможность определения углового положения с погрешностью δ=0,2°.

На основе проведенной первой серии из 5 замеров для каждого выбранного значения и оценки S_x из условия $n \geq \frac{t_{\alpha,m}^2 \cdot S_x^2}{\delta^2} = t_{\alpha,m}^2 \cdot \left(\frac{S_x}{\delta}\right)^2$ был произведен окончательный выбор n=8. Результаты экспериментальной оценки погрешности алгоритма определения угла наклона тест-объекта сведены в таблицу 5.8.

Для оценки значимости влияния угла наклона тест-объекта на результаты измерений диаметральных размеров детали типа «валик» с номинальным Ø25 мм (рисунок 5.29) была проведена серия экспериментов.

Таблица 5.8 – Оценка погрешности алгоритма определения угла наклона тест-объекта

Пара-метры	Угол наклона тест-объекта, °								
	1,005	0,75	0,51	0,21	0	-0,21	-0,51	-0,75	-1,03
M	1,093	0,729	0.486	0,263	0,026	-0,209	-0,492	-0,688	-0,998
$\overline{\Delta}$	-0,088	0,021	0,024	-0,053	-0,026	-0,001	-0,019	-0,062	-0,032
S	0,058	0,083	0,085	0,006	0.070	0,084	0,082	0,021	0,063
δэ	0,136	0,196	0,200	0,015	0,166	0,196	0,193	0,051	0,149

Оценка результатов измерений осесимметричной детали выполнялась для двух значений угла наклона калибровочной плоскости $\beta_и$=0,23 и 4,15° при различном уровнем освещения (530, 960 и 660лк) в отраженном и проходящем свете.

Рисунок 5.29 – Деталь «Валик»

Фрагмент результатов измерений представлен в таблице 5.8.

Исследовались два тест-объекта размером 120×90 мм, представляющих собой массивы из 340 и 70 точек (сокращенно Т-О 340 и Т-О 70), используемых для калибровки (рисунок 5.22). Исследования проводилось при 3-х уровнях освещенности в отраженном и проходящем свете. Результаты одной из серий исследований влияния положения тест-объекта на точность определения диаметральных размеров валика представлены в таблице 5.9.

Оценка среднеквадратичного отклонения выборки S_x=0,094661. Теоретическое значение критерия Стьюдента при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы m=20-1=19 будет $t_{\alpha,m}$=2,022691. Экспериментальное значение критерия Стьюдента равно $t_{эксп}$=2,768902. Так как $t_{эксп}>t_{\alpha,m}$, то с вероятность 95% нулевая гипотеза не принимается и, следовательно, положение угла наклона тест-объекта влияет на погрешность определения размеров. Среднее значение величины погрешности Δd=0,064 мм, что составляет 0,26%.

В рабочем диапазоне отклонений ±3° она не превышает 0,1°, что соответствует сделанным допущениям в расчетных зависимостях.

Таблица 5.9 – Диаметральные размеры детали «Валик»

№ сеч.	Калибровка, $\beta_и$=0.21, $x_i^{(1)}$, мм	Калибровка, $\beta_и$=4.13$x_i^{(2)}$, мм	$x_i=x_i^{(1)}-x_i^{(2)}$	№ сеч.	Калибровка, $\beta_и$=0.21, $x_i^{(1)}$, мм	Калибровка, $\beta_и$=4.13,$x_i^{(2)}$, мм	$x_i=x_i^{(1)}-x_i^{(2)}$
1	24,849	24,954	0,105	21	25,078	25,1614	-0,08354
2	25,028	25,03	-0,002	22	25,080	25,16538	-0,08553
3	24,924	24,942	-0,018	23	25,085	25,15345	-0,06862
4	25,003	25,101	-0,098	24	25,095	25,17433	-0,07956
5	24,878	24,939	-0,061	25	25,066	25,10372	-0,03779
6	24,972	24,896	0,076	26	25,066	25,10074	-0,03481
7	24,869	25,012	-0,143	27	25,109	25,11665	-0,00696
8	24,985	25,015	-0,03	28	25,047	25,06792	-0,02088
9	24,931	24,991	-0,06	29	25,066	25,08582	-0,01989
10	24,914	25,048	-0,134	30	25,054	25,11764	-0,06265
11	25,021	25,027	-0,006	31	25,035	25,04902	-0,01392
12	24,984	25,044	-0,06	32	25,039	25,06692	-0,02785
13	25,089	25,082	-0,06	33	25,070	25,05996	0,01094
14	25,044	25,07	0,007	34	25,012	25,08781	-0,07558
15	24,874	25,012	-0,026	35	24,978	25,04902	-0,07061
16	24,806	25,008	-0,138	36	24,972	25,01123	-0,03879
17	24,866	25,068	-0,202	37	24,865	25,08383	-0,21879
18	24,938	24,895	0,043	38	24,952	24,96349	-0,01094
19	24,892	25,043	-0,151	39	24,886	25,04703	-0,16056
20	24,93	25,022	-0,092	40	24,787	24,78547	0,001989
					$\bar{x}^{(1)}$=24,975	$\bar{x}^{(2)}$=25,037	$\bar{X}$=0,0586

5.4 Исследование алгоритма компенсации погрешностей системы контроля деталей типа «тела вращения»

Для проведения исследования была разработана экспериментальная установка (стенд), схема которой представлена на рисунке 5.30.

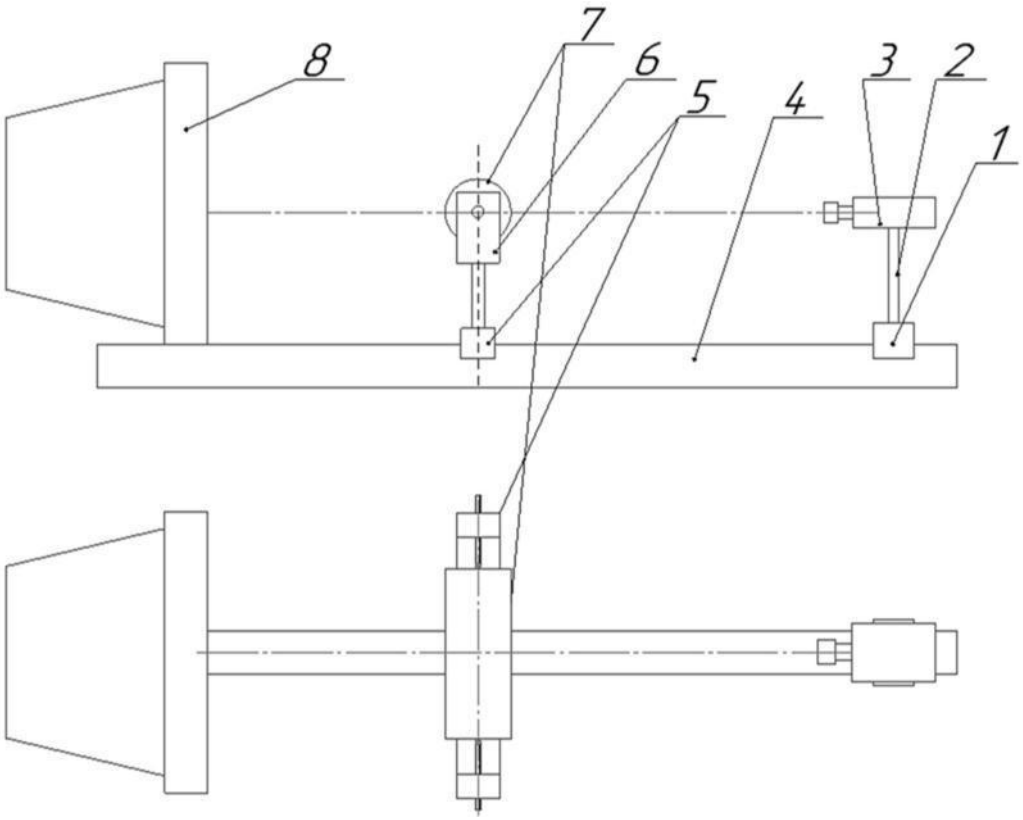


Рисунок 5.30 – Схематичное изображение экспериментального стенда для исследования алгоритма компенсации погрешностей системы контроля деталей типа «тела вращения»

В состав системы входят следующие элементы: камера 7 с объективом 6, калибровочная сетка 4 или объект контроля (деталь), закрепленные в фиксаторе, и источник освещения 1 закрепляются на измерительной скамье 2. Калибровочная сетка или деталь размещаются между источником освещения и камерой.

Деталь 7 – «тело вращения» – закрепляется в центрах на держателе 6, установленном на подвижной каретке 5, которая позволяет перемещать объект контроля по направляющим 4 вдоль оптической оси цифровой камеры, меняя рабочее расстояние. Межцентровое расстояние может варьироваться от 70 до 140мм. Система подсветки, состоящая из фонового осветителя 8 и системы кольцевой подсветки 9 (с регулируемой яркостью) позволяют реализовать схемы контроля как в проходящем, так и отраженном свете. Цифровая камера закреплена на скамье 4с противоположной стороны от осветителя 8 при помощи

каретки 1 на кронштейне 2, имеющем возможность регулироваться по высоте. Общий вид установки показан на рисунке 5.31.

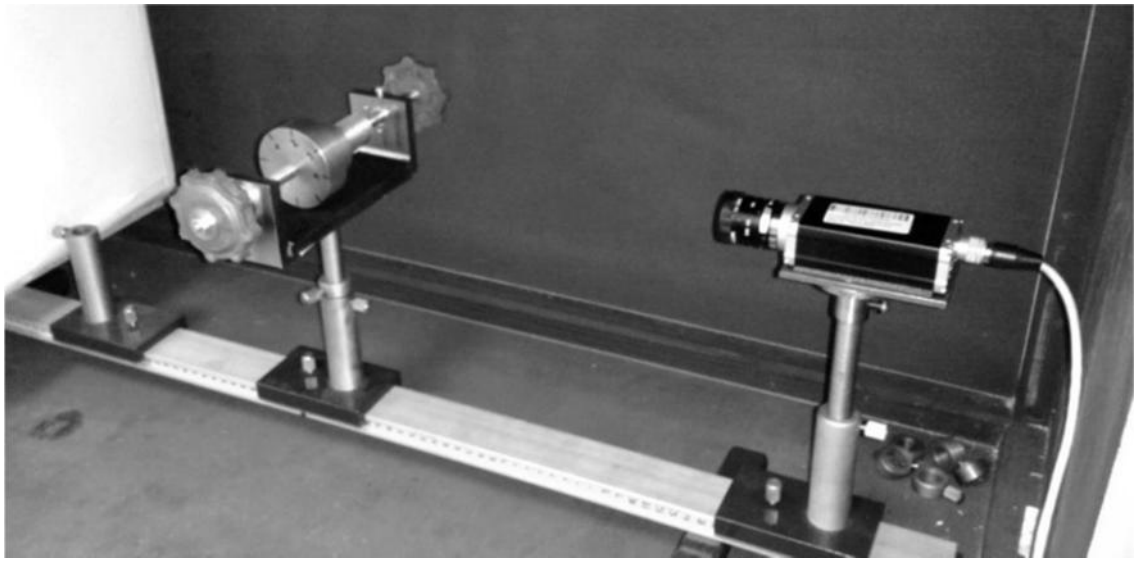


Рисунок 5.31 – Установка контроля геометрических параметров со снятой кольцевой подсветкой

Применялось следующее аппаратное обеспечение:

1. цифровые камеры:
   1.1. *PILOT piA2400-17gm* (сенсор:CCD 2/3"; разрешение 2456x2058),
   1.2. *ACE acA640-120gm* (сенсор:CCD 1/4"; разрешение 659x494)[2],
   1.3. *USB* камера 5,0 МП (сенсор CMOS 1/2.5", разрешение 2592x1944).
2. объективы с фиксированным фокусным расстоянием:
   2.1. *Ricoh FL-HC0612A-VG* (*f* = 6 мм, 1/2"),
   2.2. *Computar M1214-MP2* (*f* = 12 мм, 2/3"),
   2.3. *Pentax H1214-M* (*f* = 12 мм, 2/3"),
   2.4. *Ricoh FL-CC2514-2M* (*f* = 25 мм, 2/3").

Для работы в отраженном свете использовались кольцевые освелители с регулируемой интенсивностью подсветки.

Для калибровки использовались тест-объекты размером 120×90 мм, представляющих собой массивы из 340 точек Ø 2мм или линий толщиной 0,5 мм

[2]Камеры *ACE acA640-120gm* и *USB* камера 5,0 МП использовались только в сочетании с объективом *Ricoh FL-HC0612A-VG*.

с шагом 5 мм, изготовленные методом лазерной гравировки с погрешностью положения опорных точек не более 0,005 мм (рисунок 5.32).

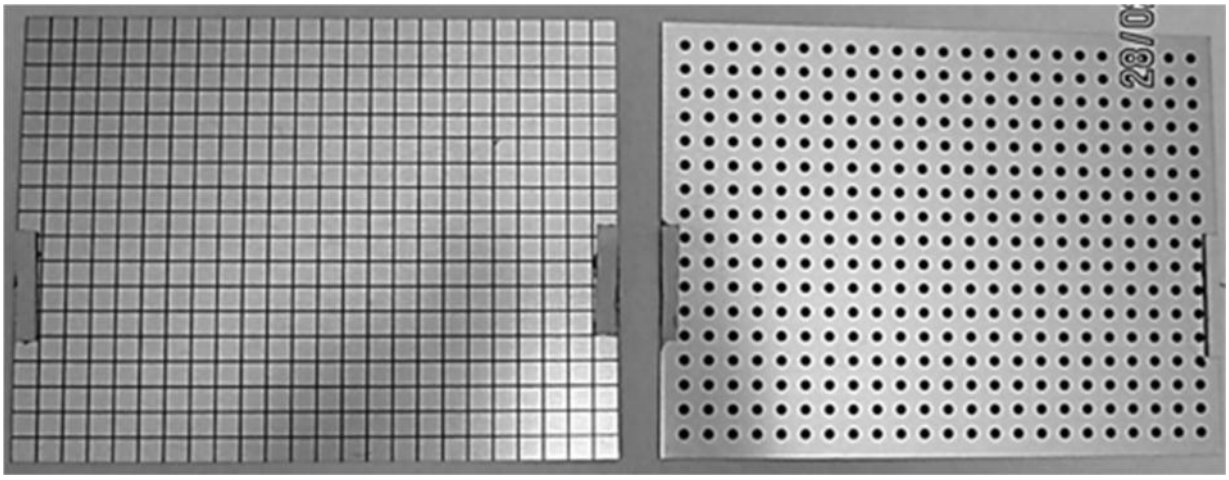


Рисунок 5.32 – Изображения тест-объектов

Для контроля было изготовлено 6 образцов деталей, представлявших собой валики *l*=75 мм с 4 разделенными канавками поверхностями Ø 15, 20, 25 мм (рисунок 5.37).

Опорные размеры образцов оценивались с использованием следующих измерительных средств: цифрового штангенциркуля *SHAHE* 0-150 мм с погрешностью измерения ±0,03мм, микрометра М-25-50-0,01 Δ=±0,004 мм, цифрового микрометра CDWAS 0-25 Δ=±0,002 мм, поверка которых в процессе измерений осуществлялась с использованием плоскопараллельных концевых мер.

Для учета действительного положения объекта контроля использовался преобразователь линейного перемещения со штоком ЛИР14-20-01 2-го класса точности с устройством цифровой индикации ЛИР-510А-00.

Оценка погрешности стенда контроля деталей представлена в таблице 5.10.

Таблица 5.10 - Оценка погрешностей контроля тел вращения на стенде

Составляющие погрешности		Абсолютная / относительная погрешность*, мм/%			
		ACE	*USB* 5 Мп	*PILOT*	
		6 мм	6 мм	12 мм	25 мм
аберрации оптической системы**		0,03/0,06	0,05/0,1	0,025/0,05	0,02/0,04
фоновой засветки, отражения от поверхности объекта		0,025/0,05			
позиционирования объекта относительно цифровой камеры***		0,06/0,12	0,12/0,24	0,036/0,07	0,02/0,04
бинаризации		0,25/0,5	0,05/0,1*[5]		
перспективная погрешность +*[4]		0,16/0,33	0,51/1,02	0,168/0,34	0,058/0,116
без компенсации	Σmin-max	0,53/1,06	0,75/1,51	0,31/0,61	0,173/0,35
	Сист+СКВ	0,42/0,85	0,65/1,30	0,24/0,48	0,12/0,24
с компенсациией п. 5	Σmin-max	0,37/0,73	0,24/0,49	0,136/0,27	0,115/0,23
	СКВ	0,26/0,52	0,14/0,28	0,071/0,14	0,062/0,125

* Для максимального исследуемого размера 50 мм

**Остаточные абберации (после процедуры калибровки) системы контроля принимались исходя из данных компенсации искажений в програмном обеспечении *NI Calibration Training*. Как правило, наилучший результат был получен при использовании модели *Polynomial (Kl, K2, K3).*

*** Погрешность позиционирования объекта относительно цифровой камеры была принята ±0,1 мм, исходя из закрепления деталей в не шлифованных центрах, и с учетом погрешности установки тест-объекта.

*[4]Перспективная погрешность+ определялась исходя из максимального значения для объекта контроля, занимающего ½ поля зрения, и включает собственно проекционную ошибку + погрешности позиционирования тест-объекта, смещения контролируемого объекта.

*[5]Погрешность бинаризации оценивалась на основании экспериментальных данных (пример графиков погрешности измерения размеров с различным порогом бинаризации для трех значений 90, 95 и 100 приведен на рисунке 5.33) и принимается равной размеру соответствующему 1.25 Px.

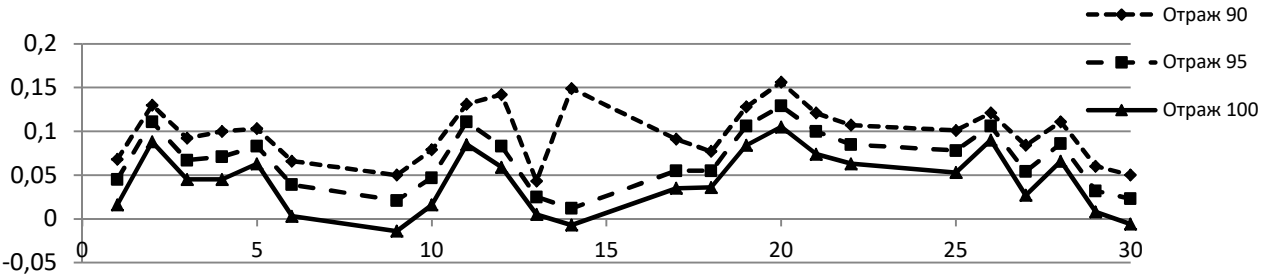


Рисунок 5.33 – График погрешностей при разных порогах бинаризации

Для оценки диаметральных размеров тел вращения разработано программное обеспечение в среде *LabVEIW* [201], реализующее алгоритм компенсации проекционных ошибок, рассмотренных в п. 4.2.1. Интерфейс двух вкладок программы представлен на рисунке 5.34.

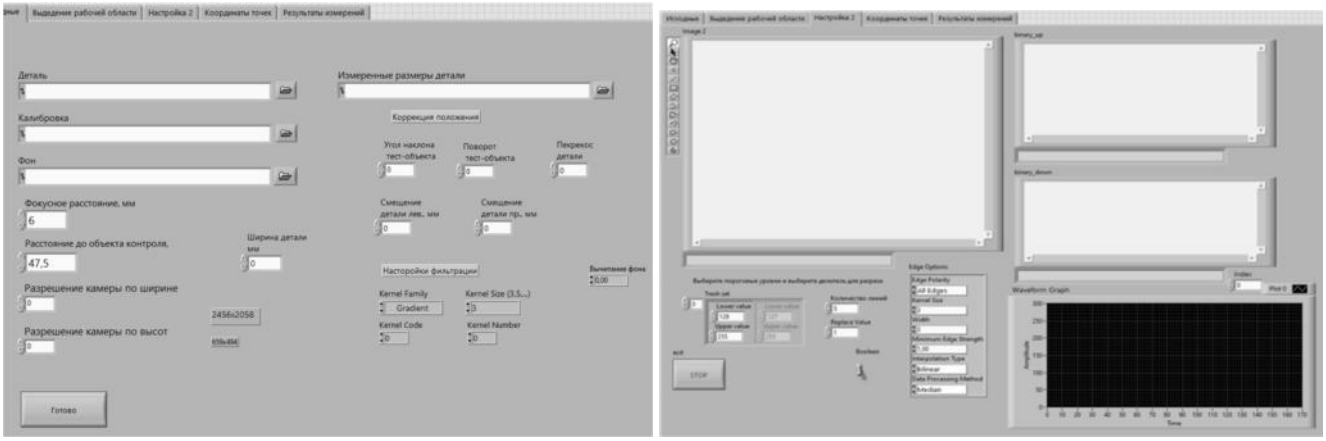


Рисунок 5.34 – Вкладки исходных данных и настройки параметров бинаризации

Для заполнения исходных данных по положению тест-объекта использовалось программное обеспечение, представленное в предыдущем разделе [260]. Пример таких сведений представлен на рисунке 5.35.

Рисунок 5.35 - Вкладка программы контроля положения тест-объекта

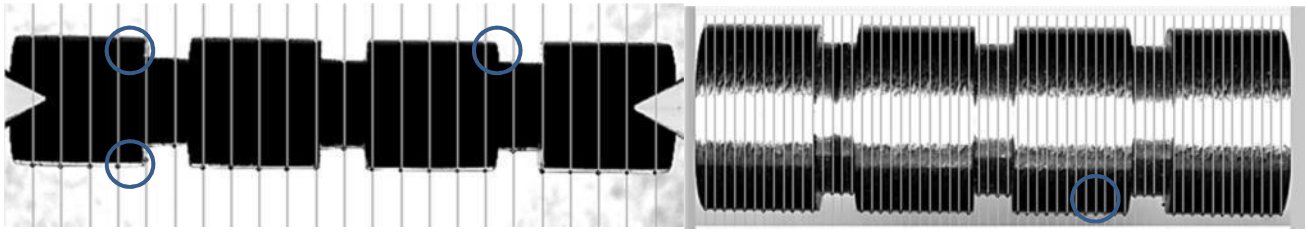
Результаты численного моделирования процесса передачи измерительной информации нетелецентрической оптикой с фокусным расстоянием 6, 12 и 25 мм

при измерении сечения тел вращения, соответствующих номинальным размерам экспериментальных образцов, при условии, что ось валиков пересекает оптическую ось объектива, представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Результаты численного моделирования

f=6 мм							
D	*L*	α	*V*	*l*	*d*	*d'*	D_k
50	72,5	22,082	0,0902	9,3985	46,332	4,868	53,958
30	72,5	13,036	0,0902	3,3835	29,227	2,778	30,794
25	72,5	10,834	0,0902	2,3496	24,554	2,297	25,454
20	72,5	8,649	0,0902	1,5038	19,773	1,825	20,230
15	72,5	6,476	0,0902	0,8459	14,904	1,362	15,096
f=12 мм							
50	144,5	10,876	0,0906	4,7170	49,102	4,611	50,914
30	144,5	6,500	0,0906	1,6981	29,807	2,735	30,194
25	144,5	5,413	0,0906	1,1792	24,889	2,274	25,112
20	144,5	4,328	0,0906	0,7547	19,943	1,817	20,057
15	144,5	3,245	0,0906	0,4245	14,976	1,361	15,024
f=25 мм							
50	708	2,098	0,0366	0,9151	49,966	1,831	50,034
30	708	1,258	0,0366	0,3294	29,993	1,098	30,007
25	708	1,049	0,0366	0,2288	24,996	0,915	25,004
20	708	0,839	0,0366	0,1464	19,998	0,732	20,002
15	708	0,629	0,0366	0,0824	14,999	0,549	15,001

Исследования процесса получения измерительной информации камерой *PILOT piA2400-17gm*с объективом *RicohFL-CC2514-2M*с *f*=25 мм производились на рабочей дистанции *L*= 272…285 мм в отраженном свете и состояли из двух серий экспериментов с 5 перестановками 3 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. В качестве примера можно показать на рисунке 5.36а, что измерение по 5 линии недостоверно, а измерение проточек вала имеет достаточно большую погрешность ±0,03 мм, поскольку велось штангенциркулем). Уменьшение количества использованных для оценки метрологических характеристик точек измерений связано с особенностью ПО, формирующего линии контроля размеров с постоянным шагом.



а) б)

Рисунок 5.36 – Изображение линий измерений в рабочем окне программы для: а) 23 замеров и б) 60 замеров (выделены точки недостоверных замеров)

Приведены примеры результатов измерений с 23 (рисунок 5.37 а) и 60 (рисунок 5.37.б) точками отсчетов. На рисунках 5.37а и б представлены 4 графика, характеризующие размеры образца Ø 25 мм с применением алгоритмов компенсации проекционной ошибки (кор. пр. ош.) и комплексной коррекции (компл. кор.) и без (измер.) с фактическими размерами детали (факт.).

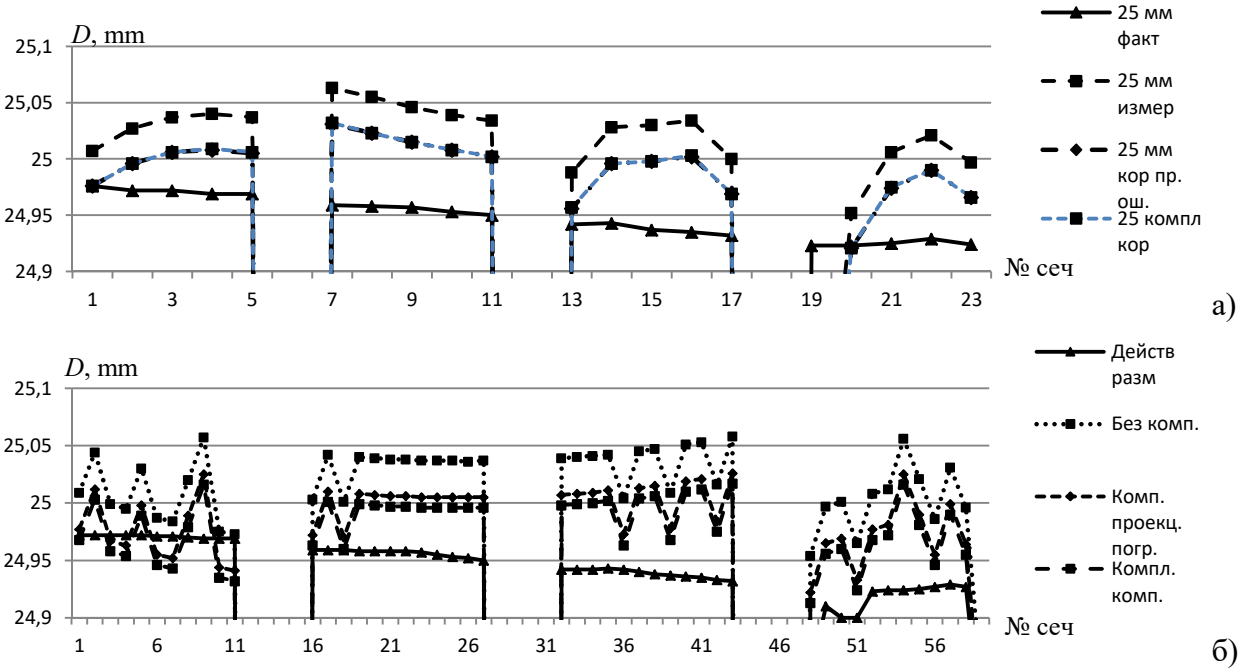


Рисунок 5.37- Размеры образца Ø 25 мм, полученные в отраженном свете с объективом *f*=25 мм для: а) – 23 и б) 60 – точек измерений

Для большей наглядности на рисунках 5.38 показаны погрешности определения размеров при применении и без применения алгоритмов компенсации.

Сравнение изображений на рисунках наглядно показывает, что основным источником погрешностей является погрешность бинаризации. На рисунке 5.38а присутствует систематическая погрешность положения объекта контроля.

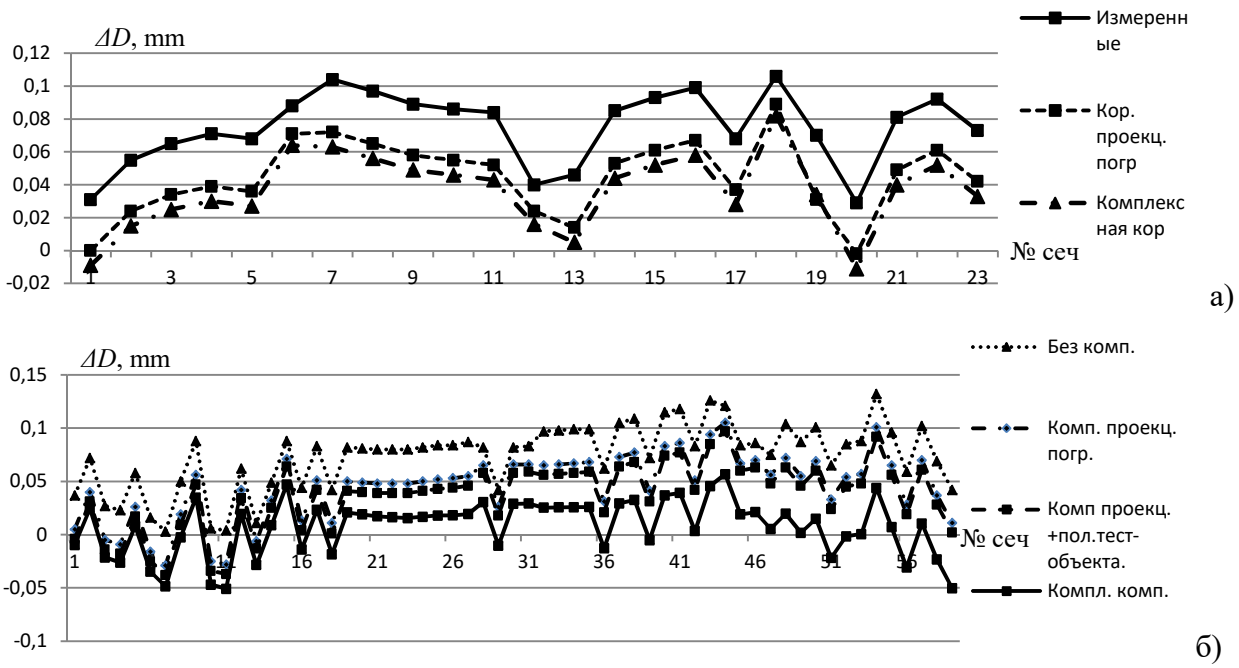


Рисунок 5.38 – Погрешности определения валика диаметром 25 мм при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации для f=25 мм для а) – 23 точек измерений и б) – 60 точек измерений

Результаты количественной оценки результатов коррекции представлены в таблице 5.12. Последний столбец, показывающий возможность коррекции положения, представлен только для случая 48 замеров.

Таблица 5.12 – Оценка методов коррекции размеров для f=25 мм

Параметры	Без. комп.		Комп проекц. погр.		Комп проекц. +пол.тест-объекта		Компл. комп.
m	20	48	20	48	20	48	48
$\overline{M}$, мм	0,079	0,073	0,042	0,042	0,034	0,033	-0,004
$\bar{S}$,	0,079	0,081	0,048	0,053	0,041	0,046	0,026
δ*, мм	0,174	0,171	0,107	0,112	0,090	0,098	0,055

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

Полученные результаты доверительного интервала соответствуют рассчитанным значениям погрешности лабораторного стенда представленным в таблице 5.10. Анализируя полученные значения, можно сделать вывод, что при использовании камер с достаточно большим разрешением (5 Мп и более) и длиннофокусных объективов (с f=25 мм и более)[3] проекционная погрешность сопоставима с погрешностью позиционирования, а доминирующей погрешностью является погрешность бинаризации.

Наглядно представить влияние пороговых значений бинаризации можно на рисунке 5.39, из которого видно, что при изменении порога на 3…4 ед. с 180/255 до 183/255 в верхней части изображения и с 140/255 до 136/254 по нижней приводит к изменению значений размеров деталей на ±1-2 *px*.

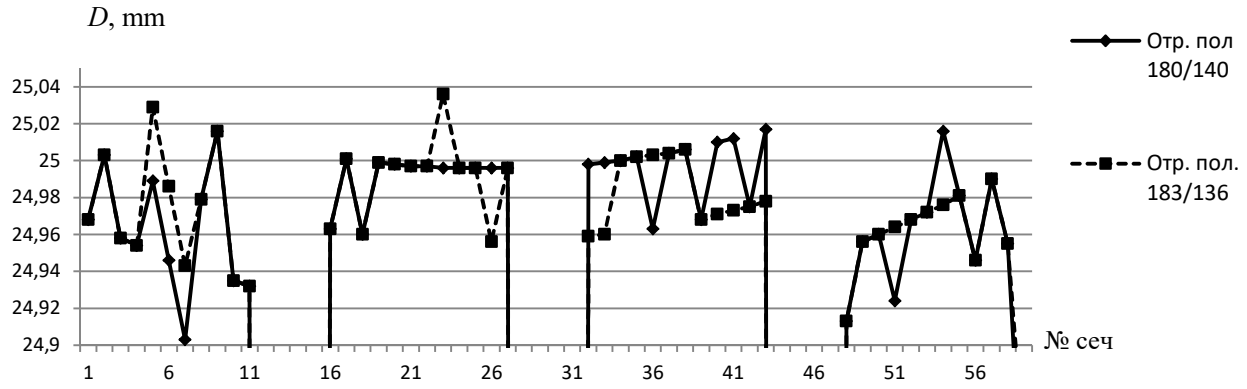


Рисунок 5.39 – Размеры валика $D_{ном}$=25 мм, полученные в отраженном свете для двух пороговых значений бинаризации для f=25 мм

Численная оценка влияния значений порогов бинаризации при измерении размеров детали для 5Мп камеры с длиннофокусным объективом f=25 мм приведена в таблице 5.13.

[3] При классификации объективов используем правило, что для объективов, которые называют длиннофокусными, фокусное расстояние равно примерно 1,5 и более диагонали кадра, которое для рассматриваемой цифровой камеры равно 2/3".

Таблица 5.13 – Оценка влияние значений порогов бинаризации для длиннофокусного объектива *f*=25 мм

Параметры	180/255 140/255		183/255 136/254.	
Компенсация смещения	Нет	Есть	Нет	Есть
$\overline{M}$, мм	0,036	0,006	0,035	0,005
$\bar{S}$,	0,049	0,033	0,044	0,027
δ*, мм	0,108	0,073	0,098	0,059

* $t_{0,04;46}$=2,114

На рисунке 5.40 приведен пример сравнения разных алгоритмов калибровки для камеры 5 Мп с объективом *f*=25 мм. Погрешность положения объекта для 23 точек контроля не скорректирована для наглядности.

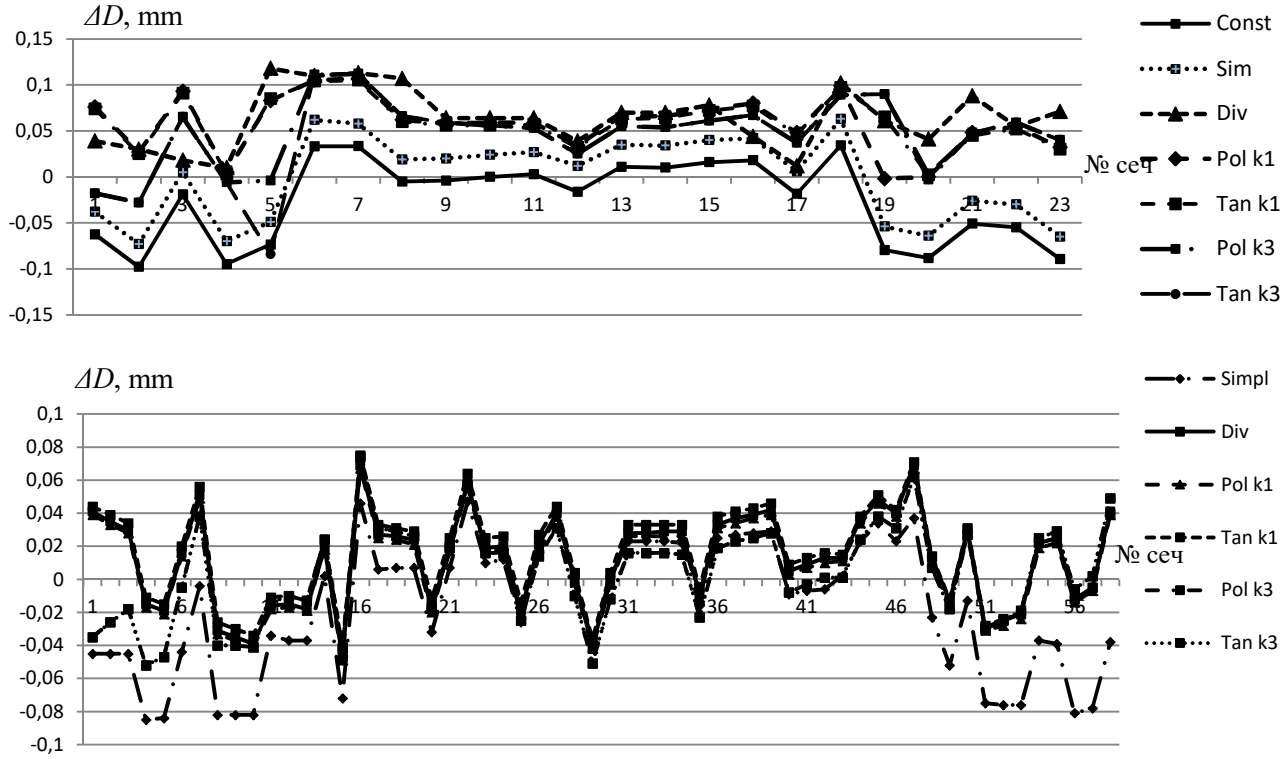


Рисунок 5.40 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм при использовании стандартных калибровок *NI* для *f*=25 мм

В таблице 5.14 приведено сравнение стандартных моделей калибровки изображения ПО *NI Calibration Training*.

Таблица 5.14 – Сравнение моделей калибровки изображения для камеры с объективом f=25 мм

Параметры	*Sim.*	*Div.*	*Pol. k1*	*Tan. k1*	*Pol. k3*	*Tan. k 3*
m=20						
$\overline{M}$, мм	-0,002	0,014	0,008	0,009	-0,002	-0,001
$\bar{S}$, мм	0,049	0,035	0,036	0,033	0,036	0,035
δ*, мм	0,109	0,078	0,080	0,072	0,080	0,078
m=48						
$\overline{M}$, мм	-0,018	0,016	0,013	0,010	0,001	0,001
$\bar{S}$, мм	0,048	0,038	0,037	0,036	0,036	0,037
δ*, мм	0,102	0,081	0,078	0,076	0,077	0,077

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

Сравнение результатов коррекции изображения для объектива с *f*=25 мм показывает, что применение стандартных калибровок оптических искажений *NI* с тремя коэффициентами позволяет практически полностью исключить систематическую составляющую, определяемую искажениями оптической системы $\overline{M}$=0,001…0,002 мм. Случайная составляющая, в основном, определяется погрешностями бинаризации изображения. Разделение поля зрения на две области бинаризации (верх и низ) является недостаточным.

В силу неравномерности освещения по краям изображения возникает погрешность определения края детали при фиксированном пороговом значении бинаризации, влияющая на точность определения размеров. Операция вычитания фона не всегда позволяет компенсировать эту составляющую вследствие возникновения тени при установке детали, которая отсутствует при фиксации фона.

Применение процедуры фильтрации позволяет исключить шумовую составляющую. На рисунках 5.41 и 5.42 наглядно продемонстрировано применение фильтров *Gausian* и *Smoothing* с размером ядра 3, 5, 7 для камеры с объективом *f*=25 мм. Небольшое размытие изображения сгладило случайную шумовую составляющую и засветки поверхности.

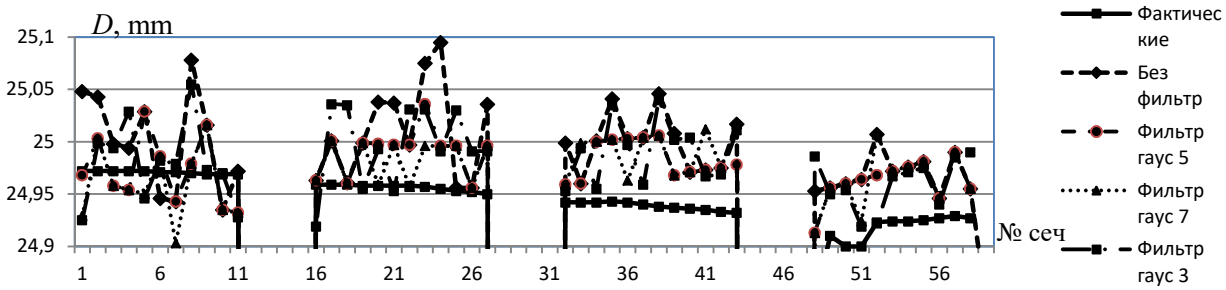


Рисунок 5.41 – Размеры валика $D_{ном}$=25 мм, полученные в отраженном свете без применения фильтра и с фильтрами *Gaussian*

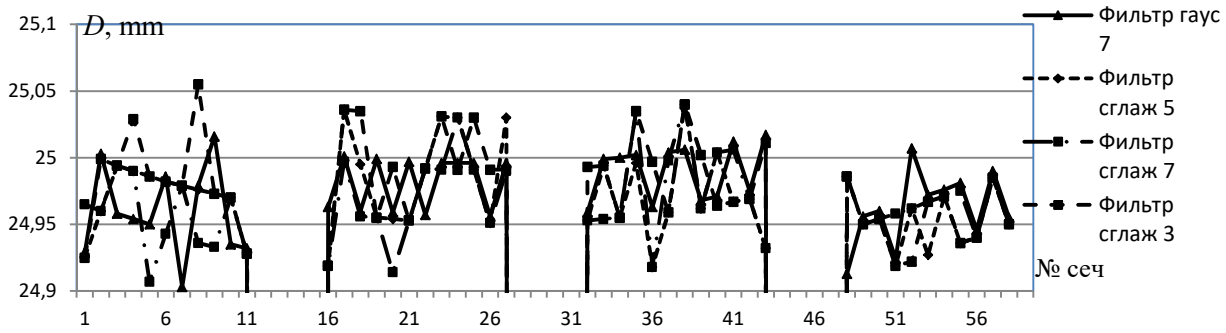


Рисунок 5.42 – Размеры валика $D_{ном}$=25 мм, полученные в отраженном свете без применения фильтра и с фильтром *Smoothing*

В таблице 5.15 приведены значения погрешностей при использовании фильтрации *Gausian* и *Smoothing* с размером ядра 3, 5, 7 для цифровой камеры с длиннофокусного объектива *f*=25 мм.

Таблица 5.15 – Оценка методов фильтрации для камеры с объективом с *f*=25 мм

Параметры	Без фильтрации	Фильтры					
		Gausian			*Smoothing*		
ядро		3	5	7	3	5	7
$\overline{M}$, мм	0,050	0,041	0,035	0,037	0,039	0,028	0,023
$\bar{S}$, мм	0,063	0,051	0,045	0,048	0,049	0,041	0,043
δ*, мм	0,140	0,114	0,098	0,107	0,107	0,089	0,096

* $t_{0,04;46}$=2,114

Из результатов исследования видно, что применение обработки фильтрами позволяет уменьшить доверительный интервал до 1,5 раз. Полученные значения показывают предпочтительное использование сглаживающего фильтра *Smoothing* с ядром 5.

Исследования процесса получения измерительной информации 5 Мп камерой *PILOT piA2400-17gm* с объективами *Computar M1214-MP2* и *Pentax H1214-M f* = 12 мм производилось на рабочей дистанции *L*=140,3…170,9 мм по методике, описанной ранее для объектива с *f* = 25мм. Учитывая отношение размера матрицы камеры к фокусному расстоянию объектива равно 0,7, по ранее приведённым критериям классификации данный объектив можно считать короткофокусным.

Результаты оценки влияния применения стандартных методик компенсации на погрешность измерения размеров представлены на рисунках 5.43 и 5.44

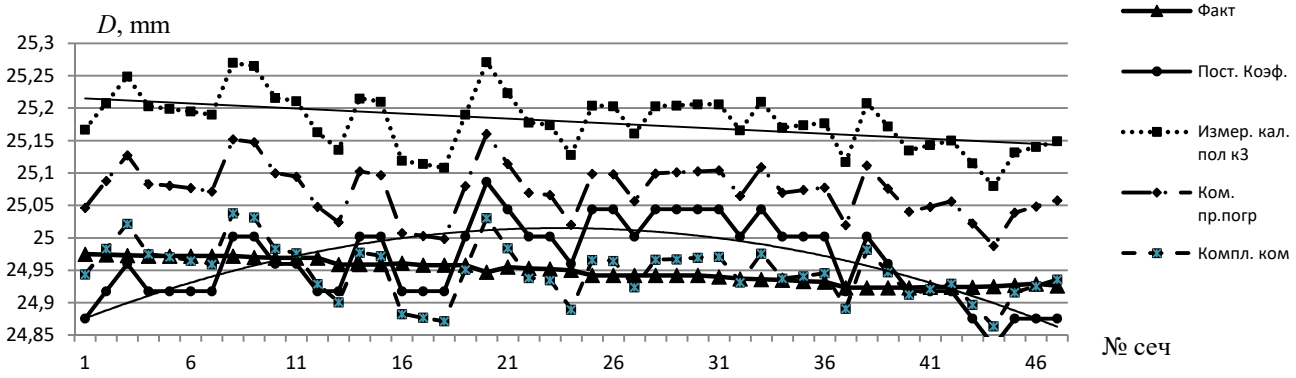


Рисунок 5.43 – Размеры валика $D_{ном}$=25 мм с объективом *f*=12 мм при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации

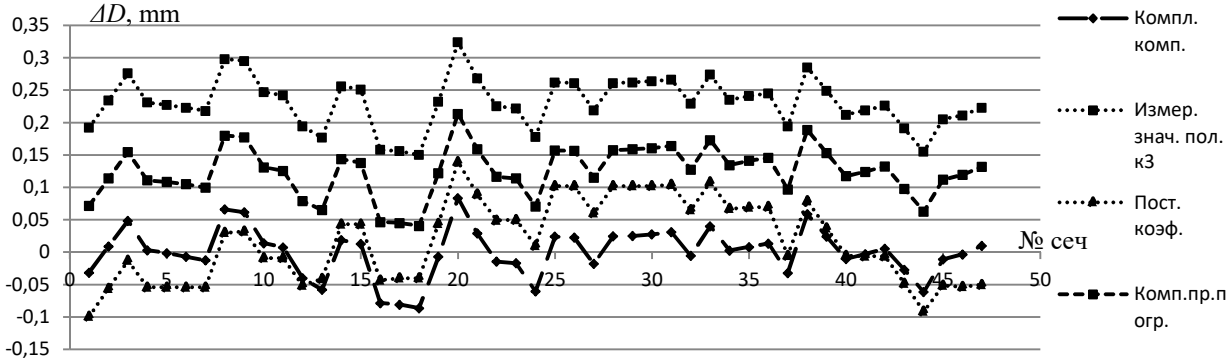


Рисунок 5.44 – Погрешности определения размеров валика камерой 5 Мп с объективом *f*= 12 мм при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации

Количественная оценка влияния применения стандартных методик компенсации погрешностей определения размеров представлена в таблице 5.16.

Таблица 5.16 – Оценка методов коррекции размеров для объектива с *f*=12 мм при m=46

Параметры	Стандартная калибровка без. комп.	Комп проекц. погр.	Комп проекц. +пол.тест-объекта	Компл. комп.	Пост коэф
$\overline{M}$, мм	0,224	0,118	0,098	0,006	0,118
$\bar{S}$,	0,237	0,135	0,118	0,057	0,135
δ*, мм	0,489	0,285	0,242	0,11	0,278

* $t_{0,04;46}$=2,114

Анализируя полученные данные можно увидеть, что для 5 Мп камеры с короткофокусным объективом *f*=12 мм проекционная погрешность и погрешности смещения тела вращения оказывают существенное влияние на точность определения размеров тел вращения. Их компенсация позволяет практически устранить систематическую составляющую, которая уменьшается практически с 1% до 0,024%, что для рассматриваемой камеры составляет менее ½ pix. Из графиков видно, что по-прежнему доминирующей случайной составляющей остается погрешность бинаризации изображения равная ±1,5 pix.

На рисунке 5.45 показаны графики отклонений измеренных размеров валика $D_{ном}$=25 мм от действительных для различных видов калибровок при использовании 5 Мп камеры с объективом *f*= 12 мм, а в таблице 5.17 проведена оценка погрешности определения размеров.

Анализируя полученные данные, можно констатировать, что для нормального объектива применение стандартных калибровок оптических искажений *NI* практически равнозначно. За счет отсутствия разворота изображения калибровка *Divison* обеспечила меньшую систематическую погрешность при практически равных значениях случайной ошибки, разброс значений которой находится в пределах статистической ошибки оценки.

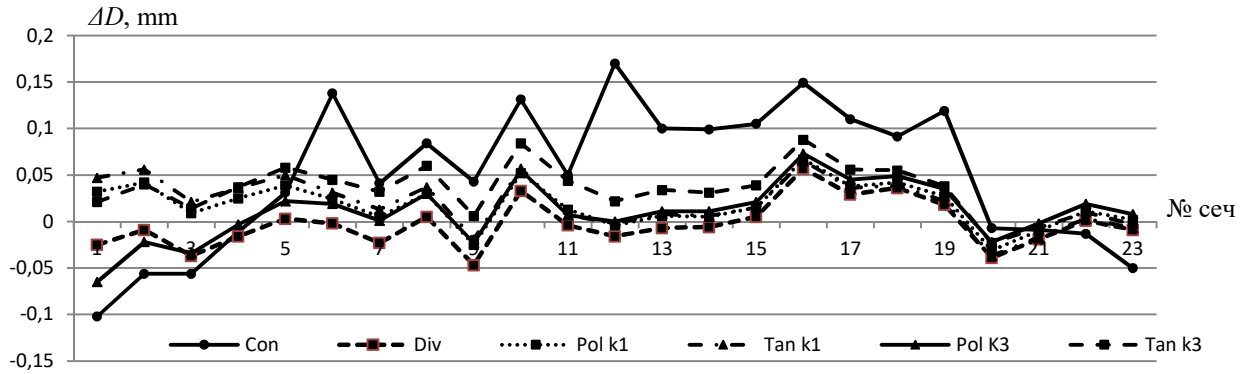


Рисунок 5.45 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм при разных калибровках камерой 5 Мп с объективом *f*=12мм

Таблица 5.17 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм при разных калибровках объективом с *f*=12мм

Параметры	*Sim.*	*Div.*	*Pol. k1*	*Tan. k1*	*Pol. k3*	*Tan. K3*
$\overline{M}$, мм	0,05	-0,003	0,018	0,020	0,010	0,034
$\bar{S}$, мм	0,092	0,025	0,030	0,034	0,033	0,044
δ*, мм	0,203	0,056	0,066	0,075	0,072	0,097

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

Для оценки алгоритма компенсации погрешностей камерой с короткофокусным *f*=6мм объективом *Ricoh FL-HC0612A-VG*, который предназначен для работы с матрицей до 1/2", некорректно использовать камеру *PILOT piA2400-17gm* с сенсором 2/3". Поэтому исследования проводились с камерами *ACE acA640-120gm* разрешением 0,3Мп и сенсором 1/4", и *USB CMOS* камерой 5,0 МП с сенсором 1/2.5".

Результаты исследования алгоритмов компенсации систематических погрешностей 0,3 Мп камеры с *f*=6 мм объективом при *L*= 275.5мм представлены на рисунке 5.46 и в таблице 5.18. К ранее рассматриваемым алгоритмам со стандартными калибровками *NI* добавлена разработанная модель компенсации дисторсии, основанная на использовании алгоритма дискретизации пространства изображения (ДПИ) описанная в разделе 3.3.

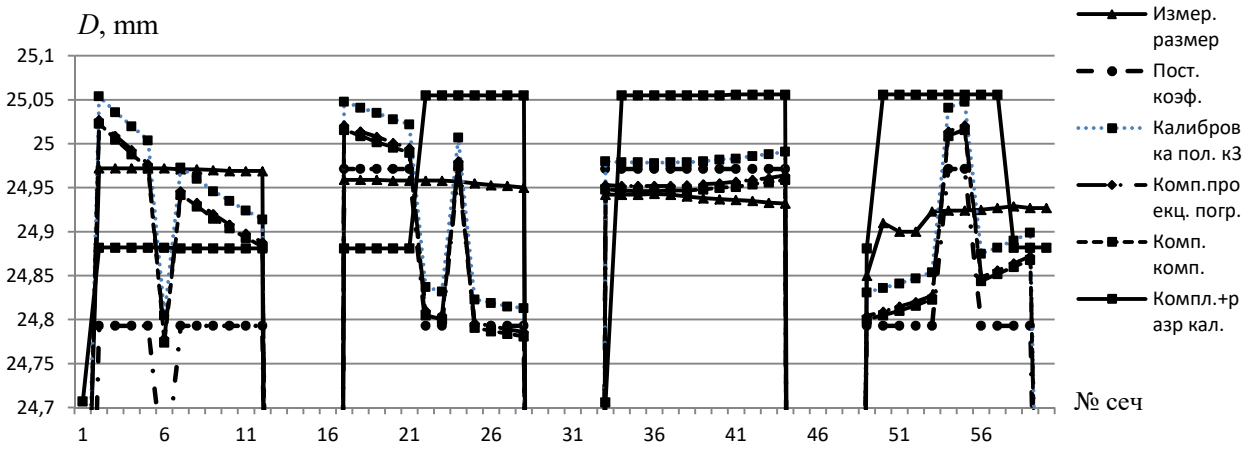


Рисунок 5.46 – Размеры валика $D_{ном}$= 25 мм, полученные при использовании камеры 0,3 Мп с объективом f= 6 мм и при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации

Таблица 5.18 – Погрешности определения размеров валика диаметром 25 мм при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации 0,3 Мп камеры с объективом f=6 мм при m=46

Параметры	Пост. коэф	Без. комп. (кал. пол. к3)	Комп проекц. погр.	Комп. проекц. +пол. тест-объекта	Компл. комп.	Компл. комп.+ разраб. кал.
$\overline{M}$, мм	-0,052	0,026	0,001	0,005	0,004	0,031
$\bar{S}$,	0,118	0,080	0,075	0,075	0,075	0,012
δ*, мм	0,249	0,169	0,158	0,158	0,158	0,110

$t_{0,04;46}$=2,114

Полученные результаты доверительного интервала соответствуют рассчитанным значениям погрешности лабораторного таблицу 5.10. Из анализа табличных данных можно сделать вывод, что при использовании камер с низким разрешением проекционная погрешность сопоставима с погрешностью позиционирования, а доминирующей погрешностью является погрешность бинаризации.

Для оценки повторяемости результатов измерений проведена оценка погрешностей измерения деталей разных размеров. Сравнивались результаты

измерения диаметров деталей номинальным Ø15, 20 и 25 мм при использовании калибровки *Polynomial (K1, K2, K3)* и с использованием разработанной калибровки, основанной на использовании алгоритма дискретизации пространства изображения (ДПИ), описанной в разделе 3.3. Результаты представлены на рисунках 5.47…5.48 и в таблице 5.19.

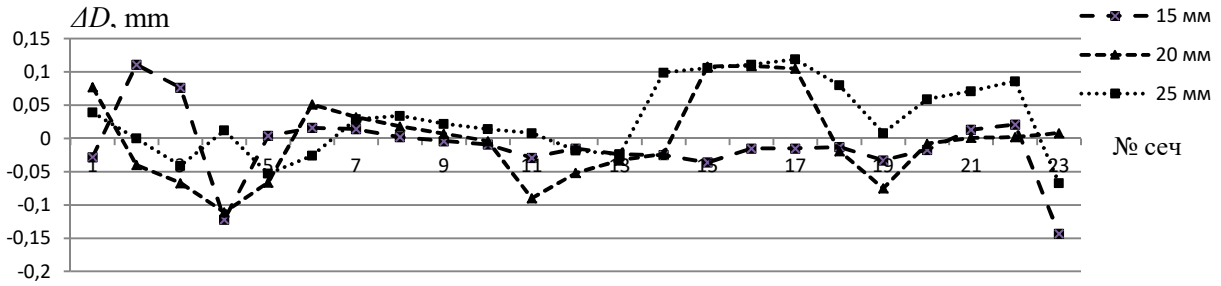


Рисунок 5.47 – Погрешности определения $D_{ном}$=15, 20 и 25 мм камерой 0,3 Мп с объективом *f*= 6 мм при использовании *Polynomial (K1, K2, K3)*

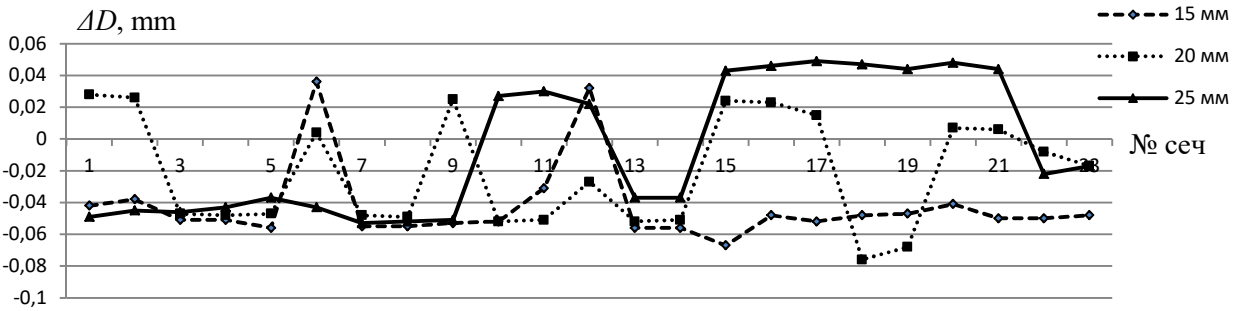


Рисунок 5.48 – Погрешности определения $D_{ном}$=15, 20 и 25 мм камерой 0,3 Мп с объективом *f*= 6 мм при использовании калибровки методом ДПИ

Таблица 5.19 – Погрешности определения размеров валика =25 мм при использовании алгоритмов компенсации *NI* и ДПИ камерой 0,3 Мп с *f*=6 мм

Параметры	$D_{ном}$					
	15 мм		20 мм		25 мм	
Методики корректировки дисторсии	*Pol.* к3	ДПИ	*Pol.* к3	ДПИ	*Pol.* к3	ДПИ
$\overline{M}$, мм	-0,012	0,042	-0,003	-0,021	0,029	-0,005
$\bar{S}$,	0,052	0,050	0,062	0,041	0,062	0,042
δ*, мм	0,118	0,112	0,139	0,092	0,139	0,095

$t_{0,04;20}$=2,204

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы о том, что для используемого тест-объекта при существенной дисторсии объектива *Ricoh FL-HC0612A-VG* разработанная методика калибровки, основанная на использовании алгоритма дискретизации пространства изображения, несмотря на низкое используемое разрешение камеры 0,3 Мп, показывает лучшие результаты, чем стандартные калибровки. Погрешности измерения находятся в пределах рассчитанных значений экспериментального стенда.

Исследование алгоритмов компенсации систематических погрешностей для камер с разрешением 5,0 Мп проводилось с использованием *USB* камеры с сенсором 1/2.5" камеры с объективом *Ricoh FL-HC0612A-VG* f=6 мм при L= 114,8мм. На рисунке 5.49. и предоставлены результаты коррекции искажений в оптическом тракте при использовании стандартных алгоритмов *NI.*

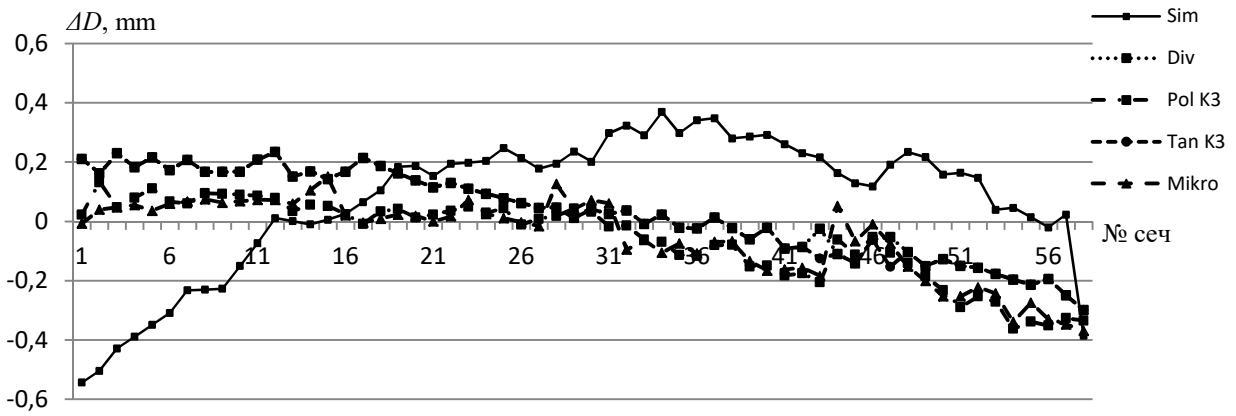


Рисунок 5.49 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм камерой 5 Мп с f= 6 мм для стандартных алгоритмов коррекции *NI*

Количественная оценка результаты коррекции искажений в оптическом тракте при использовании стандартных алгоритмов *NI* представлена в табл. 5.20. Верхние три строки этой таблицы представляют сведения из отчета о результатах коррекции искажений, приведенные в соответствующей закладке ПО *NI Calibration Training* (рисунок 5.50) для рассматриваемых стандартных калибровок. В последующих столбцах представлены результаты оценки погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм.

Таблица 5.20 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм при использовании 5 Мп камеры с *f*=6 мм при использовании алгоритмов компенсации со стандартными калибровками *NI*

Параметры	*Sim.*	*Div.*	*Pol. k3*	*Tan. K3*	*Mikro*
Mean Error	-	0,090	0,013	0,015	-0,134
Max Error	-	0,094	0,014	0,016	0,065
Std. Dev.	-	0,001	0,001	0,001	0,374
$\overline{M}$, мм	0,073	0,030	-0,058	0,021	-0,052
$\bar{S}$,	0,243	0,146	0,148	0,148	0,143
δ*, мм	0,513	0,309	0,313	0,313	0,302

$t_{0,04;46}$=2,114

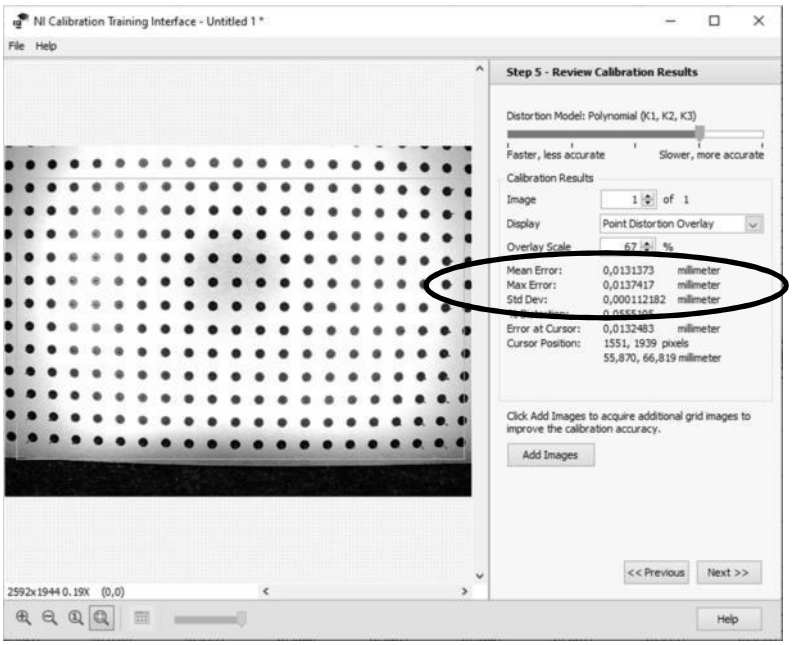


Рисунок 5.50 – Пример окна ПО *NI Calibration Training* 5 шага – результатов калибровки при использовании калибровки *Polynomial (K1, K2, K3)*

Поскольку стандартные алгоритмы *NI,* с использованными тест-объектами (рисунок 5.32) для данного сочетания аппаратной составляющей (камера-объектив) систем контроля не полностью скомпенсировали систематическую составлюящую погрешность, дальнейшие исследования алгоритмов компенсации систематических погрешностей при контроле осесимметричных изделий для камеры с разрешением 5,0 Мп и объективом *f*=6 мм проводились с использования

разработанного метода коррекции ДПИ. Результаты исследований представлены на рисунке 5.51 и в таблице 5.21.

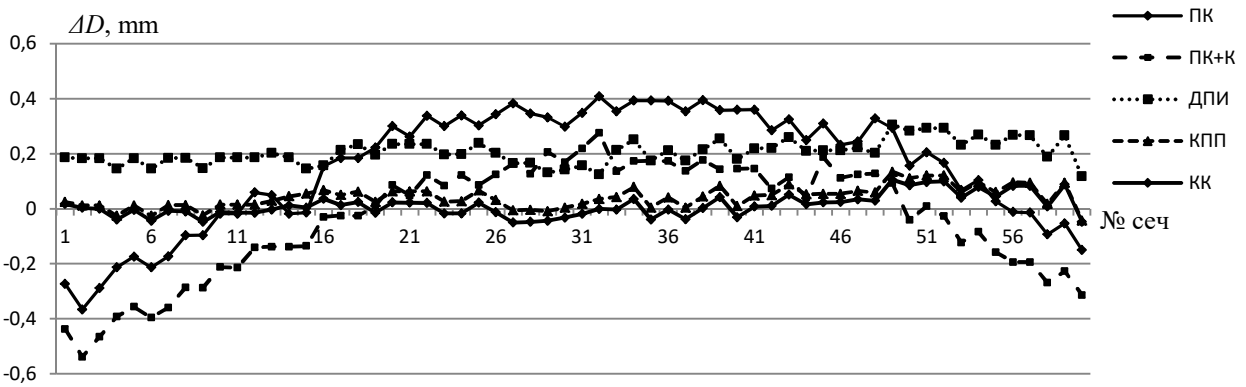


Рисунок 5.57 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм камерой 5 Мп с f= 6 мм при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы о том, что при существенной дисторсии объектива *Ricoh FL-HC0612A-VG* разработанная методика калибровки, основанная на использовании алгоритма дискретизации пространства изображения, позволяет уменьшить доверительный интервал более чем в 4 раза.

Таблица 5.21 – Погрешности определения размеров валика $D_{ном}$=25 мм при отсутствии и использовании алгоритмов компенсации 5 Мп камеры с f=6 мм

Параметры	Пост. коэф. (ПК)	Пост. коэф.+ компл. комп. (ПК+К)	Разраб. метод. кал. (ДПИ)	Разраб. кал. + комп. проекц. погр. (КПП)	Разраб. метод. кал. + компл. комп. (КК)
$\overline{M}$, мм	0,154	-0,034	0,205	0,042	0,011
$\bar{S}$,	0,264	0,209	0,211	0,057	0,042
δ*, мм	0,559	0,443	0,448	0,122	0,089

$t_{0,04;46}$=2,114

Вместе с тем остается проблема выделения краев объекта при использовании постоянных значений порогов бинаризации для верхнего и нижнего края сечения детали.

Для оценки повторяемости результатов измерений системой контроля с камерой 5 Мп и объективом *f*= 6 мм проведена оценка погрешностей измерения деталей разных размеров. Сравнивались результаты измерения диаметров деталей номинальным Ø15, 20 и 25 мм с использованием разработанной калибровки ДПИ. Результаты представлены на рисунке 5.58 и в таблице 5.22.

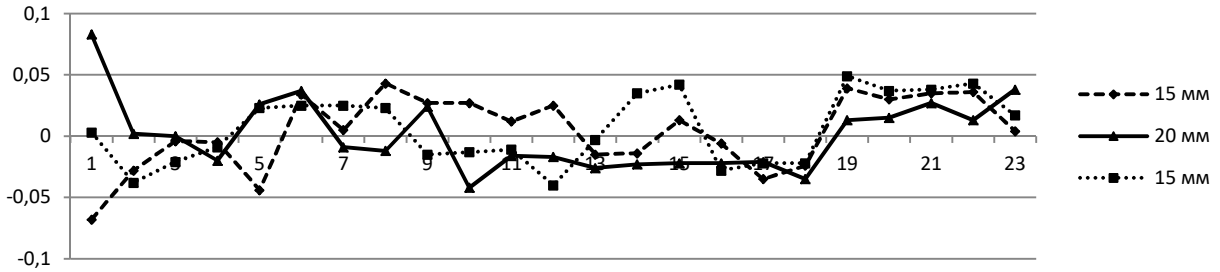


Рисунок 5.58 – Погрешности определения $D_{ном}$=15, 20 и 25 мм камерой 5 Мп с объективом *f*= 6 мм при использовании калибровки методом ДПИ

Таблица 5.22 – Погрешности определения размеров валиков при использовании алгоритмов компенсации камерой 5 Мп с *f*=6 мм

Параметры	$D_{ном}$		
	15 мм	20 мм	25 мм
$\overline{M}$, мм	0,003	0,001	0,001
$\bar{S}$,	0,033	0,032	0,035
δ*, мм	0,072	0,070	0,077

$t_{0,04;20}$=2,204

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы о том, что при существенной дисторсии объектива *Ricoh FL-HC0612A-VG* методика комплексной компенсации погрешностей контроля оссесиметричных объектов в сочетании с разработанной методикой калибровки, основанной на использовании алгоритма ДПИ, позволяет снизить погрешность измерения диаметров до 0,15%. Как и для ранее рассмотренных случаев применения камер с высоким разрешением, доминирующими являются погрешности бинаризации.

Уменьшение погрешности до 0,05% возможно при использовании более совершенных методик бинаризации изображения [139, 140].

Исследование показало возможность контроля оптико-электронными средствами с точностью, эквивалентной наиболее распространенным на производстве средствам контактных измерений (штангенциркулям и микрометрам), не только линейных размеров но и микрогеометрии изделия (шероховатость) свойственной получистовой лезвийной обработки с R_a ≥6,3 (рисунок 5.59).

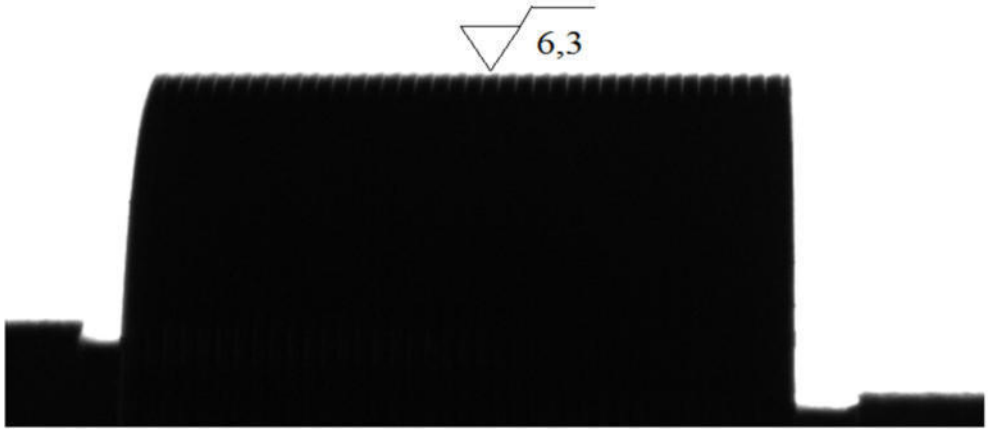


Рисунок 5.59 – Изображение шероховатости образца детали с R_a =6,3

5.5 Экспериментальные исследования устройства контроля положения вращающейся плоскости

Для подтверждения корректности принятой упрощенной схемы расчета, оценки влияния углов установки зеркальных преобразователей и определения значений погрешностей устройства контроля положения колеса проведены экспериментальные исследования модели устройства контроля.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 5.60 и включает в себя макет колеса I и модель устройства контроля положения плоскости вращения колеса II, закрепленные на общем основании III.

Макет колеса представляет из себя зеркало 1, закрепленное на оси вращения 2 и имеющее возможность изменять угол наклона вектора нормали к оси вращения φ.

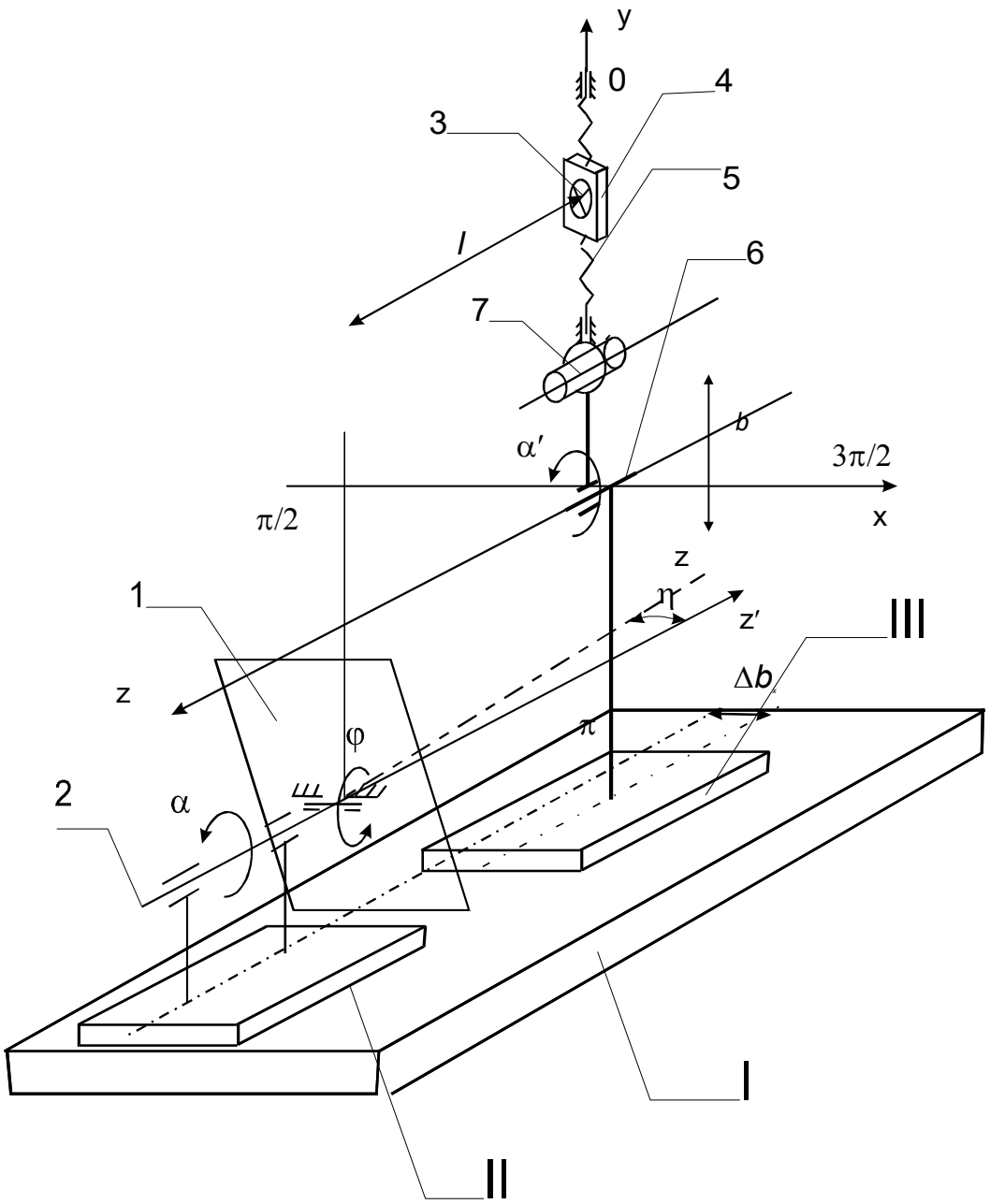


Рисунок 5.60 – Экспериментальная установка устройства контроля положения плоскости вращения: I – макет колеса, II – модель устройства контроля положения плоскости вращения колеса, III – основание

Конструкция и принцип действия макета устройства контроля положения плоскости вращения аналогичны устройству, описанному ранее в п. 4.4.1. Фиксация изображения светящейся марки в плоскости анализа выполнялось при помощи двухкоординатного позиционно чувствительного фотоприемника (ПЧФ) 3, закрепленного на каретке 4. Перемещение каретки 4 по направляющим и отсчет

ее положения осуществляется при помощи микрометрического винтового механизма 5. Направляющие имеют возможность поворачиваться вокруг оси 6, совпадающей с оптической осью источника излучения 7, и фиксируются в положениях 0, π/2, π, 3π/2.

Параметры экспериментальной установки следующие:

- расстояние между точкой пересечения плоскости зеркала с осью вращения и плоскостью фотоприемника l = 200 мм;
- расстояние между осью вращения устройства контроля и оптической осью источника излучения b= 25 мм
- смещение оси вращения зеркала относительно оптической оси источника излучения по горизонтали Δb_x = 5 мм, по вертикали Δb_y = 5 мм,
- угловое смещение зеркала относительно оптической оси источника излучения по горизонтали η = 1°, по вертикали ν = 1°.

Погрешность отсчета положения изображения светящейся марки Δx=± 0.01 мм.

Оценка точности устройства контроля положения плоскости вращения проводилась при φ = 5, 10, 15 и 20°. Количество измерений n = 7 выбрано на основе [188, 225], исходя из надежности P = 0.95 и эмпирического стандарта ошибки q = 0.5. Учитывая поставленные цели эксперимента измерений, такой выбор может быть признан состоятельным.

Результаты обработки данных для координат x и y представлены в таблицу 5.23 и рассчитанных значений углов и ошибок их определения φ, η и ошибок их определения Δφ и Δη в таблице 5.24.

Графическое отображение результатов эксперимента представлено на рисунке 5.61 и рисунке 5.61.

Таблица 5.23 – Координаты *x* и *y* при заданных положениях угла φ.

Пара-метры	φ	x_1'	x_1''	x_2'	x_2''	y_1'	y_1''	y_2'	y_2''
M	5	42,936	27,919	41,837	28,409	42,949	27,913	41,831	28,419
σ		0,0007	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0001	0,0002	0,0006
s		0,0127	0,0135	0,016	0,0157	0,009	0,0111	0,0121	0,0157
ε		0,0094	0,01	0,0119	0,0117	0,0067	0,0082	0,009	0,0117
M	10	82,351	63,964	78,449	66,536	82,347	63,971	78,443	66,541
σ		0,001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0012	0,0003	0,0002	0,0003
s		0,0135	0,0127	0,0135	0,0127	0,0111	0,0135	0,0111	0,0135
ε		0,01	0,0094	0,01	0,0094	0,0082	0,01	0,0082	0,01
M	5	128,55	103,67	119,61	110,29	128,57	103,66	119,61	110,31
σ		0,0002	0,0006	0,0003	0,0024	0,0002	0,0008	0,0003	0,0003
s		0,015	0,0157	0,0157	0,041	0,0135	0,0111	0,0111	0,0127
ε		0,0111	0,0117	0,0117	0,0304	0,01	0,0082	0,0082	0,0094
M	20	186,97	150,87	169,71	164,35	187	150,87	169,71	164,31
σ		0,0055	0,0004	0,0002	0,0005	0,0004	0,0002	0,0001	0,0006
s		0,0773	0,017	0,0138	0,0135	0,015	0,0127	0,0111	0,0111
ε		0,0573	0,0126	0,0102	0,01	0,0111	0,0094	0,0082	0,0082

Таблица 5.24 – Рассчитанные значений углов и ошибки их определения φ, η и ошибок их определения ΔφΔη

φ	φ_η	$\Delta\varphi_\eta$	η	Δη	φ_ν	Δφ	ν	Δν
5	4,973	1,634	0,978	1,299	5,0289	1,732	0,971	1,715
10	9,983	1,028	0,986	0,859	9,9826	1,044	0,988	0,731
15	14,99	0,733	0,999	0,084	15,006	0,335	0,992	0,484
20	20	0,201	0,986	0,856	19,998	0,114	1,009	0,513

В ходе эксперимента установлено [114, 123]:

– Упрощенную схему расчета допустимо использовать для определения положения плоскости вращения при небольших углах η и ν;

– Для контроля положения плоскости вращения с погрешностью определения ее положения до 1′ достаточно использование ОЗ в качестве ЗП устройства контроля;
– Для уменьшения погрешности определения положения плоскости вращения, ОЗ необходимо закреплять под углом 15 - 20° к плоскости вращения колеса.

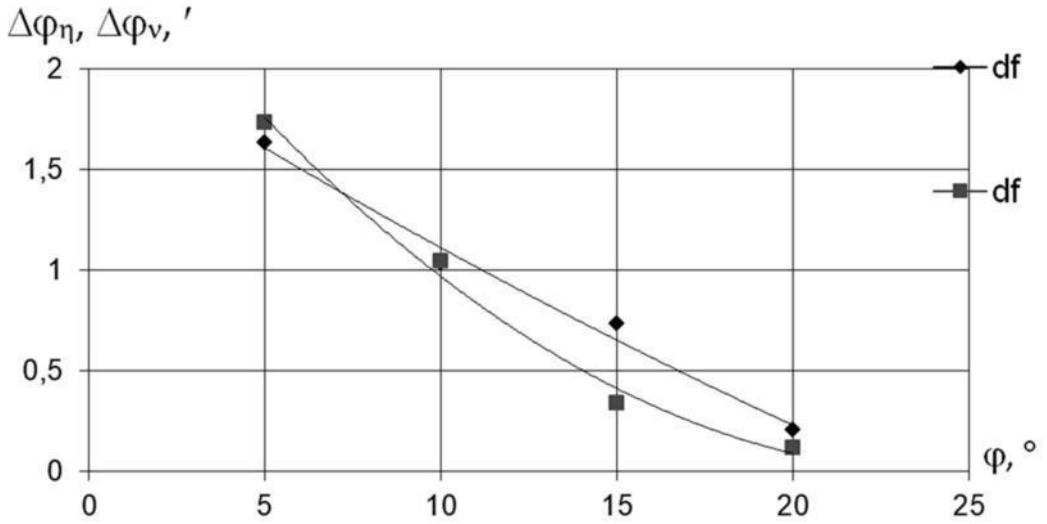


Рисунок 5.61 – Графики погрешностей определения угла наклона ЗП φ при отклонении оси вращения $\Delta\varphi_\eta = f(\varphi)$ и $\Delta\varphi_\nu = f(\varphi)$

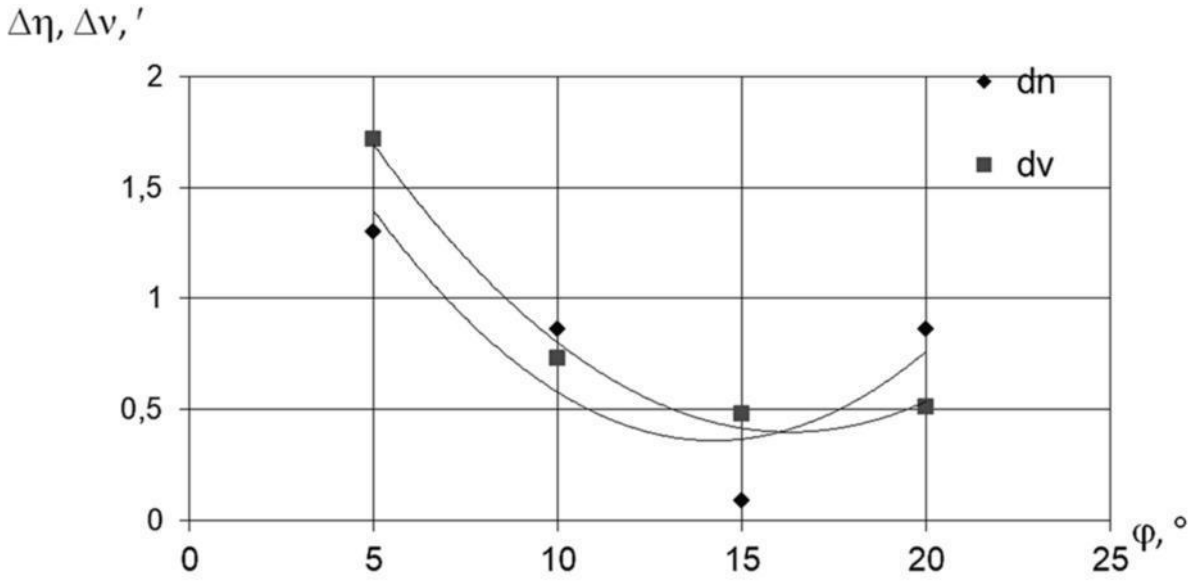


Рисунок 5.62 – Графики погрешностей определения углового положения оси вращения η и ν при фиксированных углах наклона ЗП φ

5.6 Выводы по Главе 5

1. Разработанная модель калибровки цифровых камер позволяет в полной мере реализовать аппаратные возможности систем на базе цифровых камер с разрешением 5 Мп, обеспечив обеспечить погрешность измерения размеров сопоставимую с разрешением цифровых камер – до 2 px при изменении углового положения объекта контроля в пределах ± 15º относительно оптической оси.
2. Разработанный алгоритмический способ обеспечивает уменьшение погрешности контроля размеров плоских изделий и снижение стоимости аппаратной части подобных систем (за счет их более полного использования), позволяя определять размеры плоских объектов по изображению с погрешностью до Δ=±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, с доверительной вероятностью 0,95 и инвариантность к природе искажений изображения.
3. Разработанная методика и ПО определения положения тест-объекта может быть использовано для уменьшения погрешностей определения геометрии основных формообразующих размеров оссесимметричных изделий при использовании систем контроля, реализующих пространственный метод оптического излучения с $2D$ разрешением и использующих в качестве устройства регистрации измерительной информаций цифровую камеру, оснащенную объективом с фиксированным фокусным расстоянием. Погрешность определения положения тест-объекта при калибровке в диапазоне ±5° не превышает 0.2°, что соответствует сделанным допущениям в расчетных зависимостях.
4. Результаты расчета положения тест-объекта и рабочей дистанции в программном обеспечении могут быть использованы для задания значений

исходных данных при реализации алгоритма комплексной компенсации погрешностей контроля осесимметричных изделий.

5. Разработанная методика и ПО комплексной компенсации погрешностей определения геометрических параметров осесимметричных объектов позволяют уменьшить систематическую составляющую погрешности определения диаметральных размеров до ± 1 px.
6. Исследования показывают возможность уменьшения погрешности измерения размеров осесимметричных объектов в отраженном свете с неколимированной подсветкой для цифровых камер с короткофокусной оптики до Δ=±0,08 мм (для камер с разрешением 5 Мп и объективом с фокусным расстоянием 12 мм) при доминирующей случайной погрешности выделения контура объекта контроля, и обеспечить достоверного допускового контроля по 9-10 квалитетам, для исследованных диапазонов размеров объекта контроля с доверительной вероятностью 0,96.
7. Экспериментальные исследования показали возможность создания системы активного контроля положения вращающейся плоскости, основанной на регистрации координат точек траектории движения изображения луча, отраженного от вращающегося плоского зеркала. Данные эксперимента хорошо согласуются с расчетными результатами, позволяя говорить о возможности достижения погрешности определения углового положения плоскости менее 2′, при ее малых отклонениях (до 1°). Рекомендуемый угол установки плоского зеркала составляет 15 — 20° к плоскости вращения.

ГЛАВА 6 ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

6.1 Схемы контроля геометрических параметров осесимметричных изделий

Схемы систем контроля геометрических параметров осесимметричных изделий, реализующие оптический геометрический метод с пространственным разрешением, использующие цифровые камеры с нетелецентрической оптикой для получения информации об основных формообразующих размерах осесимметричных тел, приведены на рисунке 6.1.

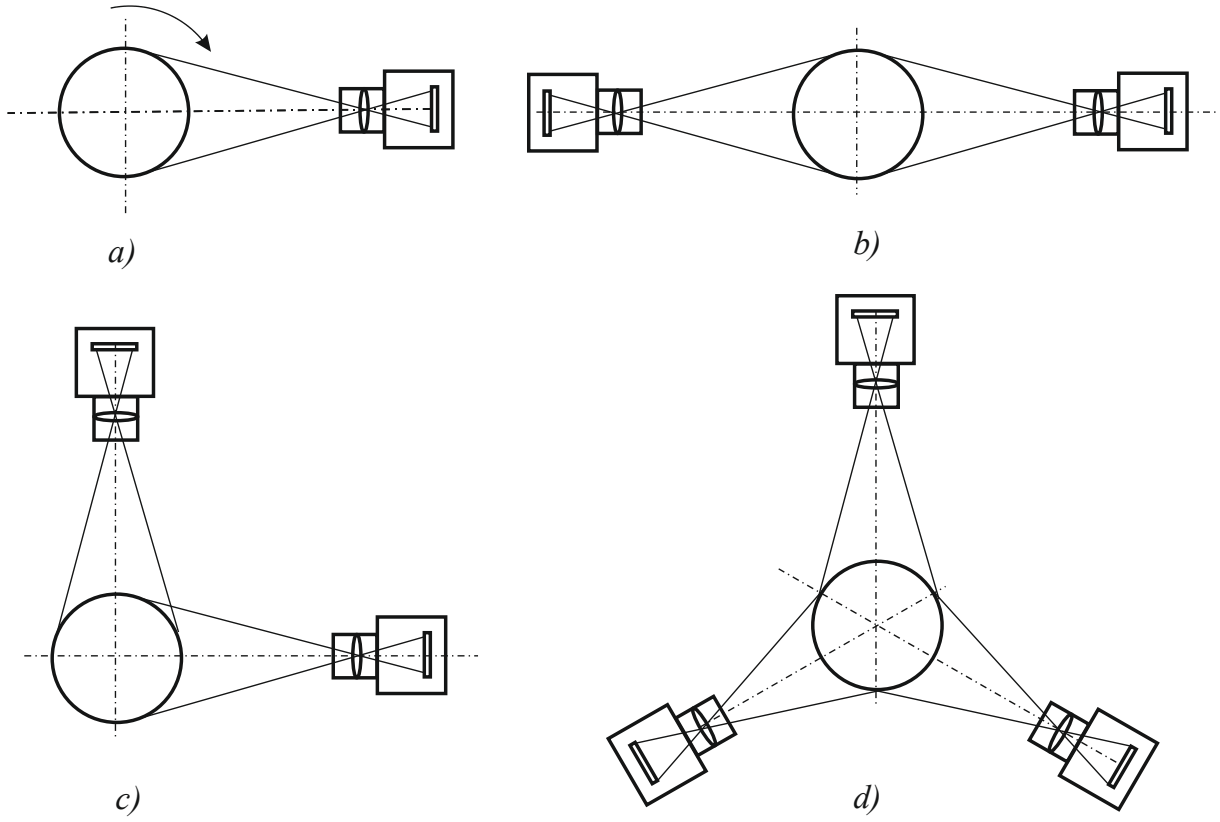


Рисунок 6.1 – Схемы контроля осесимметричных тел:
a – с одной камерой, *b*, *c* – с двумя камерами, *d* – с тремя камерами

Схема контроля осесимметричных тел на рисунке 6.1*a* с одной цифровой камерой при неподвижном положении объекта является наиболее простым

решением, однако точность определения формообразующих размеров детали в значительной степени зависит от погрешности ее установки. Контроль формы и состояния поверхности невозможен. Возможно использование данной схемы для получения измерительной информации о сечении детали как в проходящем, так и в отраженном свете.

Для оценки формы необходимо получать информацию как минимум с двух взаимно перпендикулярных сечений. Это возможно при дополнении данной схемы механизмом поворота контролируемого объекта, в результате чего появляется возможность для получения совокупности сечений. Достоинством такой разновидности схемы, показанной на рисунке 6.1*a,* является возможность выбора шага для получения требуемого количества сечений изображений, позволяющая дополнить описание геометрии параметрами формы изделия и дающая возможность проводить контроль поверхностных дефектов. Закрепление изделия с двух сторон, например в центрах, позволяет минимизировать погрешности установки. Однако наличие второй опоры усложняет систему контроля его размера и ограничивает возможность контроля нижней части изделия. Использование же консольного закрепления осесимметричного изделия может привести к погрешности определения сопряженных координат в свободной (незакрепленной) части, по причине искривления или овальности объекта контроля. Компенсация этой погрешности возможна при использование датчика угла поворота и алгоритма определения положения контролируемых сечений по двум изображениям, смещенным на 90° друг относительно друга.

Расположение двух камер на одной оси (рисунок 6.1*b*) позволяет получить изображение практически всей поверхности тела вращения, что дает возможность контролировать поверхностные дефекты тел вращения. Рассматриваемое компоновочное решение позволяет контролировать положение осесимметричных объектов не только в фиксированном положении, но и при их смещении (по приведенным в разделе 4.1. зависимостям в пределах 5% от рабочей дистанции). Поправку на смещение стержня вдоль оптической оси при контроле геометрических размеров стержня можно вычислять по результатам калибровки

как среднее значение размера, полученного с двух камер. Однако такое расположение камер не позволяет достоверно оценить форму изделия и компенсировать наклон относительно калибровочной плоскости.

Схема на рисунке 6.1*c* позволяет получить изображение осесимметричного тела в двух взаимно перпендикулярных сечениях, что позволяет судить о форме и основных размерах (по рассмотренному в разделе 4.2.3. алгоритму в пределах 5% от рабочей дистанции), однако плохо приспособлено для контроля состояния поверхности, поскольку четверть площади объекта находится вне поля зрения. Достоинством данной компоновки является простая реализация компенсации смещения объекта (как линейного, так и углового) в пределах поля зрения цифровой камеры.

Схема на рисунке 6.1*d* позволяет компенсировать недостатки схем на рисунках 6.1*b* и 6.1*c* и контролировать как поверхностные дефекты, так и форму с компенсацией изменения положения осесимметричных изделий, как при изменении угла наклона оси симметрии, так и при ее линейном смещении. Недостатками данного компоновочного решения являются ограниченный доступ к контролируемому объекту, увеличение стоимости за счет использования еще одной камеры и более сложные алгоритмы компенсации смещения контролируемого объекта от положения, в котором проводилась калибровка.

Упростить систему регистрации за счет применения оптических зеркальных преобразователей возможно на основании исследований, проведенных в разделе 4.2.3 с применением оптических преобразователей на базе плоских зеркал – зеркальных преобразователей (ЗП).

При их использовании схема на рисунке 6.1*c* может быть модифицирована, как показано на рисунке 6.2а, заменой одной камеры преобразователем с одиночным зеркалом, а схема 2*d* компоновочным решением с использованием зеркального измерительного преобразователя с угловым зеркалом (УЗ) (рисунок 6.2а).

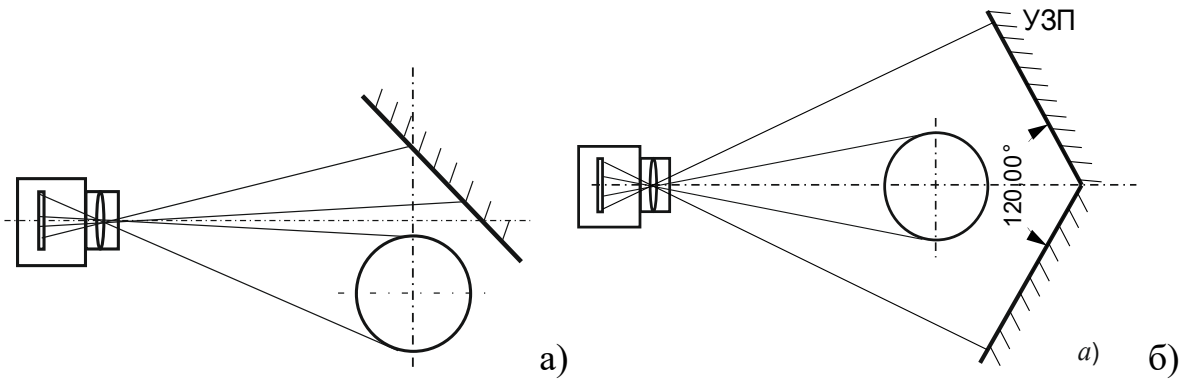


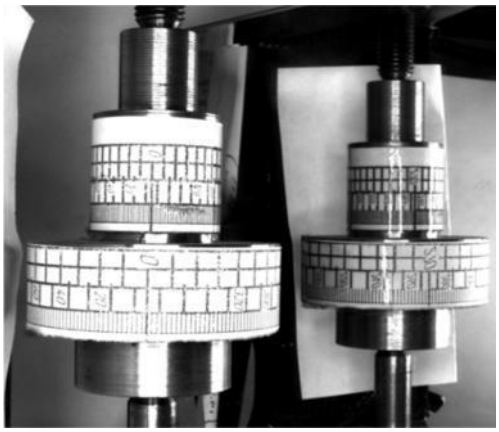
Рисунок 6.2 – Схема системы контроля осесимметричных изделий с ЗП:
а) - с одиночным зеркалом б) - с угловым зеркальным преобразователем

Схема, показанная на рисунке 6.2а, позволяет получить изображение осесимметричного тела в двух сечениях, однако в отличие от схемы на рисунке 6.1с сечения не перпендикулярны и имеют различные коэффициенты увеличения. По взаимному расположению изображений возможно определить положение при нефиксированном положении детали. Поле зрения позволяет наблюдать за поверхностью большей, чем на рисунке 4.35с, хотя так же не вся поверхность контролируемого объекта будет наблюдаться, как было показано на рисунке 4.37а, где наблюдаются отметки ~ 0±70° на первичном и ~ 250±70° на зеркальном. При калибровке системы нужно определять положение тест-объекта для каждого положения для компенсации проекционных погрешностей в соответствии с методикой рассмотренной в разделе 4.2.1.

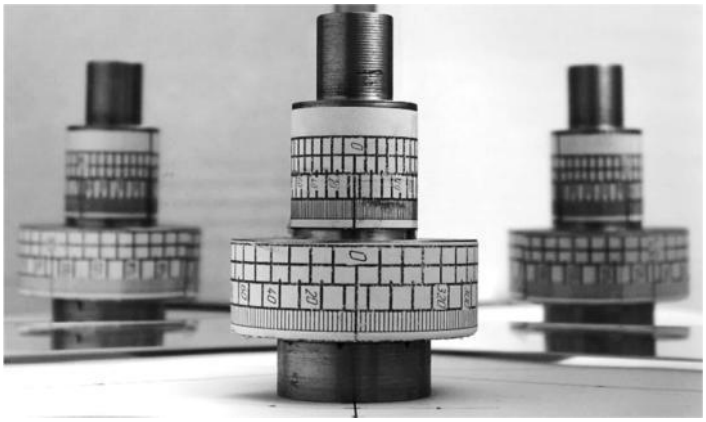
Компоновочное решение на рисунке 6.2б с угловым зеркальным преобразователем (УЗП) обеспечивает возможность получения изображения всей поверхности осесимметричного объекта с помощью углового зеркального преобразователя, ребро которого, в исходном положении, перпендикулярно оптической оси цифровой камеры [128]. Достоинством данной схемы является уменьшение стоимости системы вследствие использования одной камеры вместо трех.

Существенным недостатком рассмотренных схем является невозможность получения контрастных изображений обоих сечений, поскольку сфокусироваться

можно или на самой детали, или на ее изображениях. Следствием чего наблюдается размытость одного из изображений тела вращения. Это наглядно продемонстрировано на рисунках 6.3а и 6.3б, где фокусировка производилась на детали, поэтому вторичные изображения размыты, что ограничивает ее использование для высокоточных измерений без разработки специальной методики калибровки, учитывающей данный фактор.



а)



б)

Рисунок 6.3 – Изображение ступенчатого валика полученного цифровой камерой с объективом $f = 12$ мм системы контроля осесимметричных изделий: а) – с ОЗ и б) – УЗП

При этом зеркальный преобразователь должен достаточно близко располагаться к объекту контроля, поскольку при его удалении степень размытия изображения увеличивается.

Сравнительный анализ схем контроля тел вращения представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Сравнительный анализ схем контроля

Схема	Область применения	Достоинства	Недостатки
а	контроль размеров, формы и состояния поверхности	- выбор шага для получения изображений требуемого количества сечений для описания геометрии и поверхностных дефектов; - использование только 1 камеры; - выбор системы подсветки (в проходящем или отраженном свете).	- необходимость системы механической системы поворота изделия; - невозможность компенсация погрешности положения.

Продолжение таблицы 6.1

Схема	Возможности	Достоинства	Недостатки
b	контроль размеров и состояния поверхности	- получение изображения практически всей поверхности тела вращения, - возможность компенсация погрешности положения;	- невозможность контроля в проходящем свете; - невозможно контролировать форму;
c	контроль размеров и формы	- возможность компенсация погрешности положения; - выбор системы подсветки (в проходящем или отраженном свете).	- контролируется не вся поверхность
d	контроль размеров, формы и состояния поверхности	- получение изображение всей поверхности тела вращения, - возможность коррекции их смещений; - выбор системы подсветки (в проходящем или отраженном свете).	- использование 3х камер; - сложность с установкой объекта контроля.
с ОЗ	контроль размеров и формы	- возможность компенсация погрешности положения; - упрощение структуры системы регистрации.	- уменьшения разрешения изображения в 2 раза; - контролируется не вся поверхность - невозможность контроля в проходящем свете. - при недостаточной глубине фокусировки размытие зеркального изображения
с УЗП	контроль размеров, формы и состояния поверхности	- получение изображение всей поверхности тела вращения, - возможность коррекции смещений; - упрощение структуры системы регистрации	- уменьшения разрешения изображения в 3 раза; - невозможность контроля в проходящем свете. - при недостаточной глубине фокусировки размытие зеркального изображения

Исходя из рассмотренных достоинств и недостатков схема получения измерительной информации с использованием УЗП может найти применение для контроля канатов грузоподьемных устройств. Для детектирования регулярной структуры канатов может быть применен подход, предложенный в работе [102].

Особенностью фильтрационной обработки изображения является применение дискретного преобразования Фурье.

Обработка изображений для получения необходимых измерений выполняется по следующему алгоритму:

- получение изображения;
- сегментация изображения на 3 части (рисунок 6.4);
- поиск на выделенных изображениях характерных дефектов по методике, основанной на быстром преобразовании Фурье (БПФ);
- наложение калибровок на выделенные изображения и определение размеров канатов.

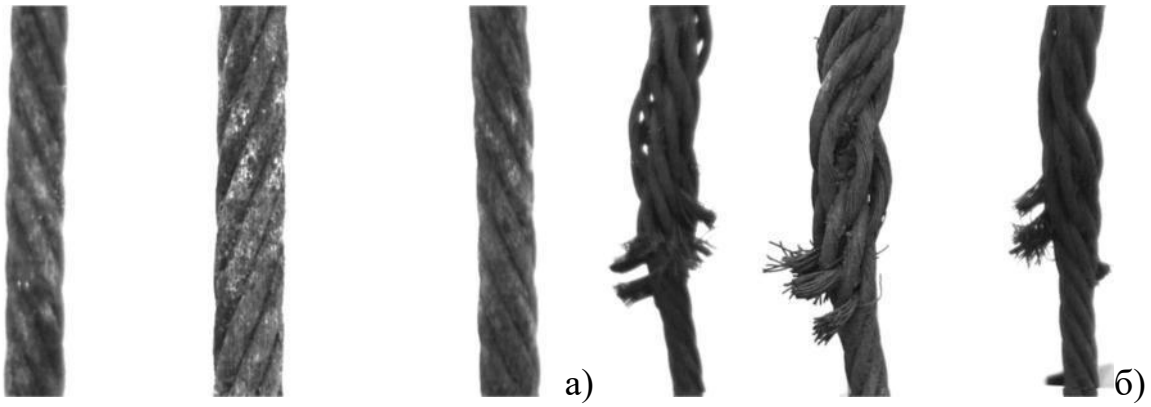


Рисунок 6.4 – Изображения канатов подъемных установок без повреждений (а) и с механическим повреждением (б)

Для поиска дефектов в выбранной программной среде используется функция *IMAQ FFT*, которая реализует функцию БПФ для заданного изображения. Так как БФП работает с комплексными числами, исходное изображение необходимо предварительно преобразовать в комплексную форму. Делается это при помощи виртуального прибора *IMAQ* I*mageToComplexPlane*. В данном случае исходное изображение помещается в действительную часть комплексного изображения.

На рисунке 6.5 показаны примеры результата программной обработки изображения целого каната и каната с дефектом соответственно [127]. На основе полученного Фурье-образа можно сделать выводы о наличии или отсутствии дефектов.

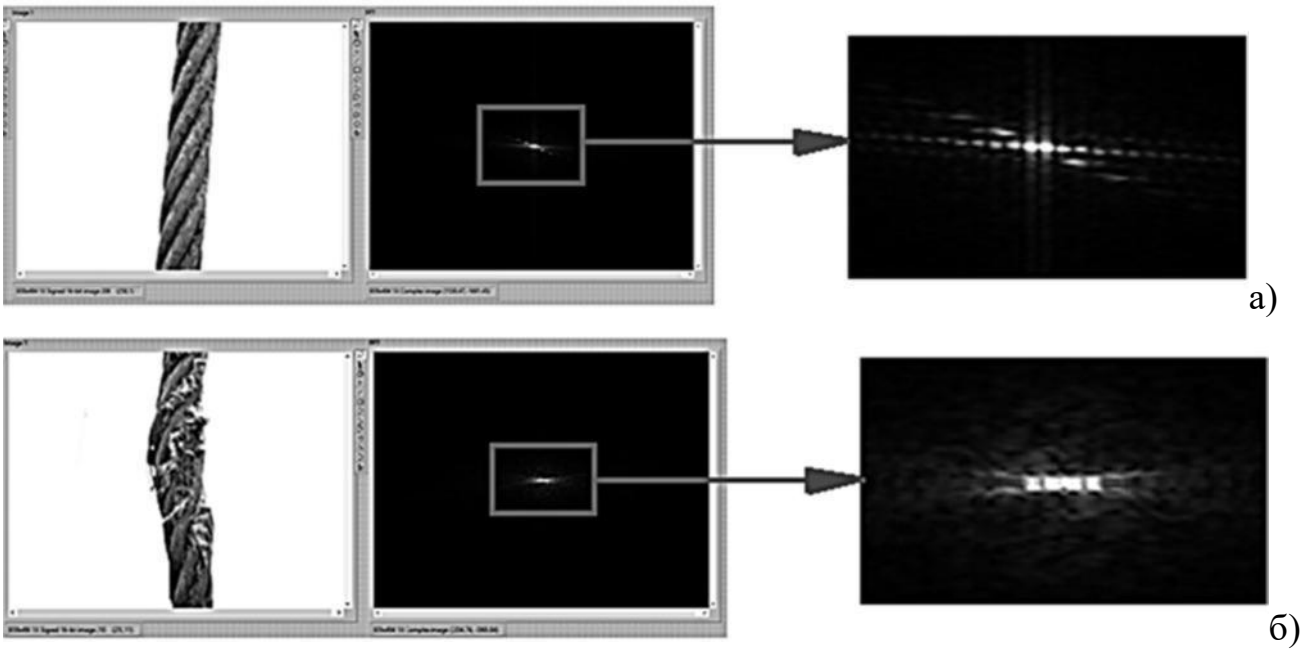


Рисунок. 6.5 - Исходное изображение каната и его Фурье-образ без повреждений (а) и с механическим повреждением (б)

6.2 Оценка метрологических характеристик систем оптического контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением

В качестве примера реализации методики оценки погрешности систем оптического контроля геометрических параметров изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением оценим достижимую точность процедуры определения основных формообразующих размеров токоподводящего анодного штыря в цеховых условиях при размещении системы на штыревом кране и на участке очистки. Для случая размещения системы контроля рассмотрим возможность установки токоподводящего штыря на заданный горизонт в теле анода.

Основой для этой оценки является коммерческий запрос, сделанный ООО «Русал НТЦ» 26.02.2015 на «Разработку установки дистанционного контроля коррозионного износа анодных токоподводящих штырей». В качестве цели работы предлагалось разработать установку дистанционного контроля

коррозионного износа анодных штырей за счет периодического бесконтактного измерения их геометрических размеров с погрешностью ±1мм. Конструкция установки должна быть совместима с имеющимися на ОАО «РУСАЛ Красноярск» штыревыми кранами с числовым программным управлением (ЧПУ) модели *NKM Noell* - 4/8/12,5/6,3т.- 25м (рисунок 6.6).

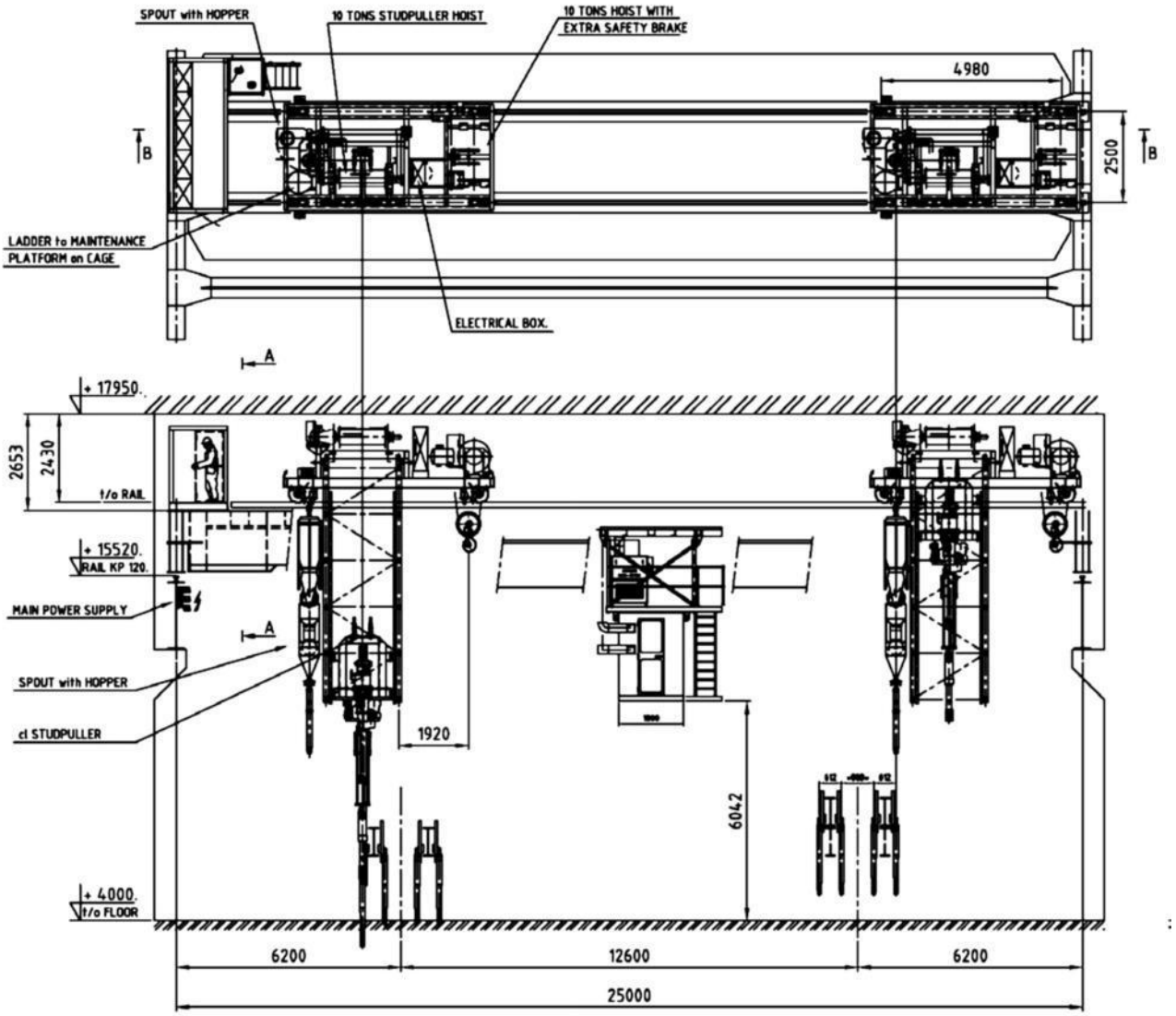


Рисунок 6.6 – Общий вид штыревого крана NKM Noell – 4/8/12,5/6,3т.-25м

Во время эксплуатации происходит интенсивный износ конечной части токоподводящего штыря – основного элемента, обеспечивающего устойчивую работу и формирование угольного анода. Изменение состояния элементов технологического оборудования вносит дополнительные возмущающие воздействия в систему управления процессом электролиза алюминия, причем

изменятся электрические параметры (электропроводность и теплопроводность). Контроль состояния токоподводящих стержней электролизеров Содерберга, их своевременная замена, точная установка «в теле анода» на заданный горизонт по конусу спекания в жидкой анодной массе позволяют стабилизировать процесс электролиза и тем самым упростить задачу управления [15, 16, 171].

Установка должна обеспечить:

- автоматическое бесконтактное измерение длины анодного штыря в процессе перестановки штыревым краном с погрешностью ±1мм;

- автоматическое бесконтактное измерение диаметра штыря в нижней части (контроль предельного износа) с погрешностью ±1мм и выдачу сигнала об отбраковке штыря;

- информирование оператора штыревого крана о результатах измерений для последующей установки штыря на заданное расстояние от нижней кромки штыря до подошвы анода с погрешностью ±5мм с помощью существующей (на основе ручного ввода измерительной информации о горизонте анода) на штыревом кране измерительной системы на основе импульсного энкодера.

Согласно заданию для измерения геометрии (длины) анодного штыря в конструкции установки должна использоваться оптическая информационно-измерительная система на основе цифровой видеокамеры. Принцип действия установки должен быть основан на получении цифрового изображения объекта с высоким разрешением, выделением контура объекта (распознаванием) на изображении, математической обработкой изображения (удаление дефектов и искажений), и расчета геометрических размеров объекта. Измерение геометрии (длины) анодного штыря должно производиться в процессе выполнения операции по его перестановке (рисунок 6.7). Достоверность распознавания объекта (анодного токопроводящего штыря) и определение его параметров должна быть не менее 95% (не более 5% ошибочных измерений или ошибок распознавания объекта).

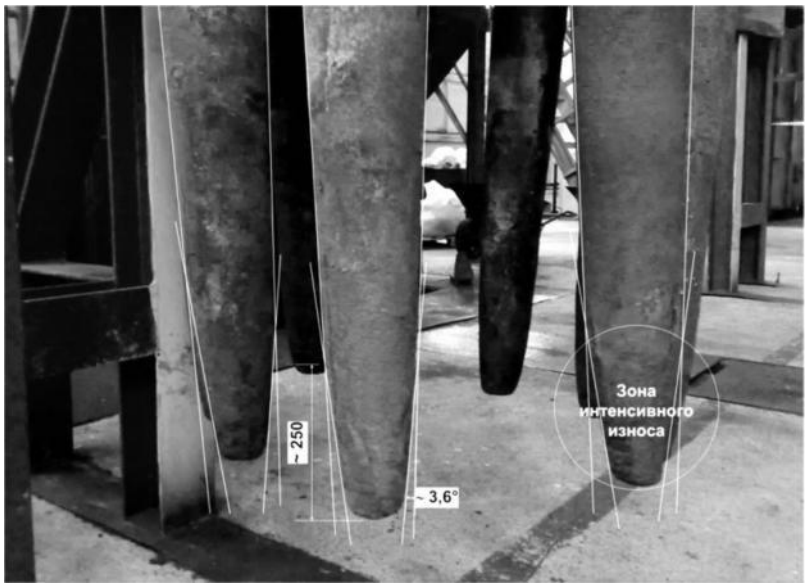


Рисунок 6.7 – Область интенсивного износа анодных штырей

6.2.1 Оценка погрешностей системы контроля токоподводящих штырей электролизеров при размещении на кране в электролизном цехе

Для предварительной оценки возможности достижения заданной точности в условиях электролизного цеха рассмотрим упрощённую схему контроля при заданном положении контролируемого стержня относительно цифровой камеры (рисунок 6.8).

В качестве устройств регистрации изображения выберем цифровые камеры: *ACE acA640-120gm* с матрицей 0,3 Мп (сенсор: CCD; 1/4′′, разрешение 659x494) и *Basler PILOT piA2400-17gm* с матрицей 5 Мрх (сенсор: CCD; 2/3′′; разрешение 2456x2058), как представителей аппаратной составляющей, имеющей максимальные и минимальные значения разрешения, характерные для большинства практически используемых оптических измерительных систем контроля геометрических параметров. Исходя из рисунка 6.8 расстояние до токоподводящего стержня примем равным 5 м. На основании рисунка 6.9, отображающего рабочую часть стержня, можно принять рабочую область контроля равной 300×250 мм, выберем объективы *LensRicoh FL-CC5028-2M* для первой и *VS Technology SV-10035V* для второй камеры соответственно.

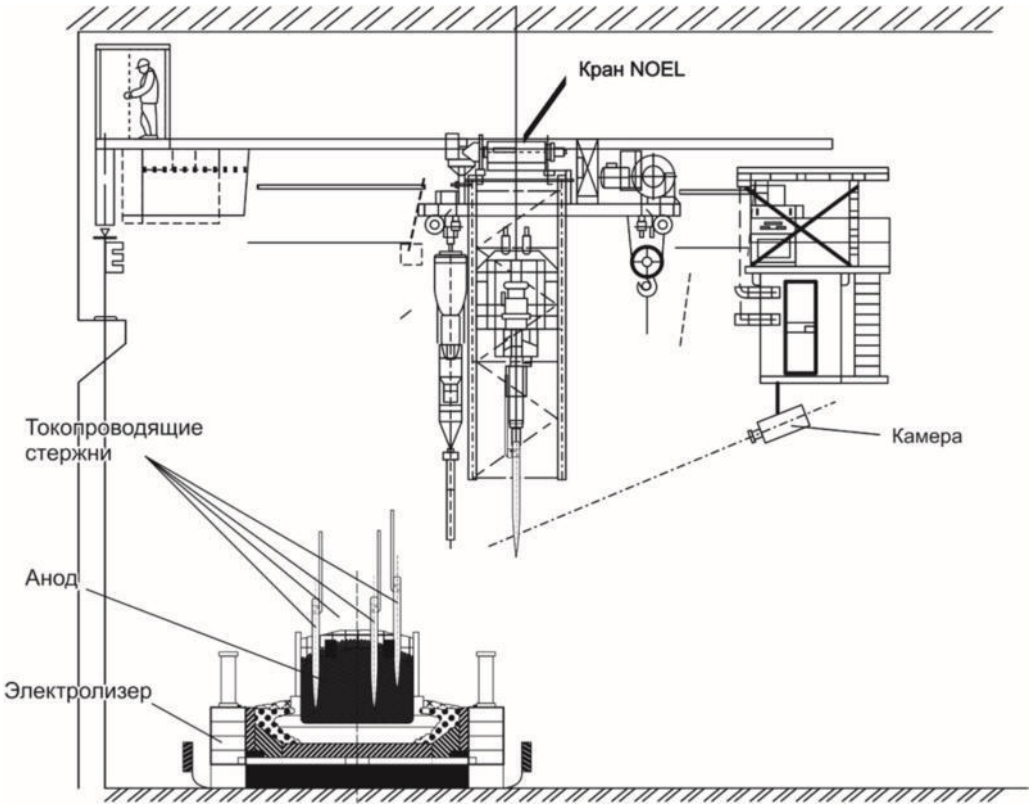


Рисунок 6.8 – Схема контроля состояния токоподводящих стальных стержней

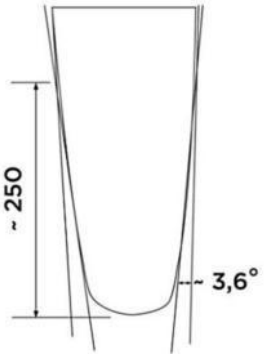


Рисунок 6.9 – Область изменений геометрии штыря при эксплуатации

Обозначим комплекты из камеры и соответствующего объектива как КТЗ 0,3 Мп и КТЗ 5 Мп.

Исходя из выбранной аппаратной части системы контроля (камер + объективов) можно определить реальное поле зрения, которое будет равным соответственно 365×264 мм и 415×348 мм. Тогда, с учётом угла установки камеры, принятым для расчетов равным 30° (рисунок 6.8), определим разрешение систем контроля 0,64 мм/px для 0,3 Мп и 0,2 мм/px для камеры 5 Мп.

Исходя из рассмотренных в разделе 4.1 источников погрешностей оптических систем контроля геометрических параметров, можно выделить следующие их составляющие для рассматриваемой системы контроля состояния токоподводящих стальных стержней (рисунок 6.10):

- от фоновой засветки;
- отражения от поверхности объекта;
- аберрации оптической системы;
- позиционирования объекта относительно цифровой камеры;
- положения цифровой камеры относительно объекта привязки – электролизера (при решении задачи установки токоподводящего стержня на заданный горизонт);
- рефракции оптической среды в цеховых условиях (от тепловых конвекционных потоков электролизера, рефракция обусловленная электромагнитным излучением электролизера).

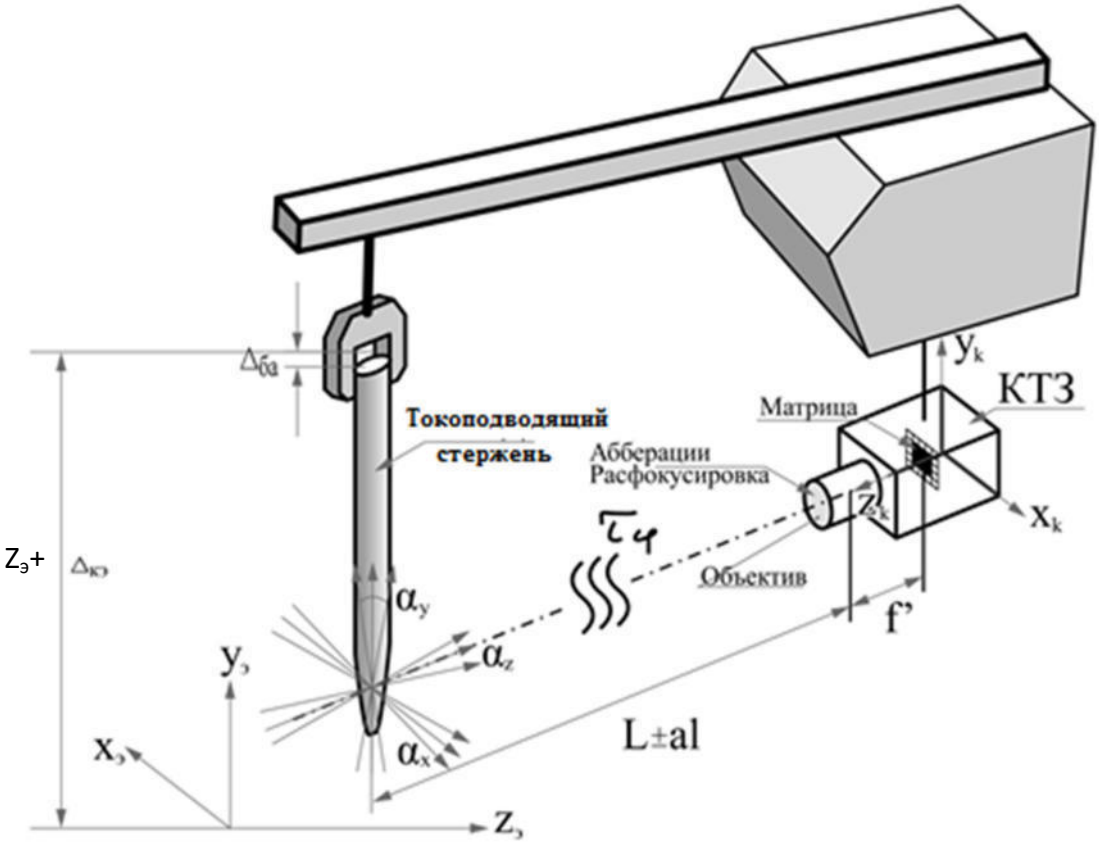


Рисунок 6.10 – Погрешности оптико-электронной системы контроля

Погрешности фоновой засветки и отражения от поверхности влияют на точность выделения объекта контроля при его распознавании. Учитывая цеховые условия с низким уровнем освещенности и необходимостью подсветки стержня для его контрастного выделения, в первом приближении, будем считать эти погрешности не превышающими ±0,5 px [8].

Оценка не скомпенсированной составляющей погрешности от аберраций оптической системы после калибровки цифровой камеры проводилась на основании данных полученных при использовании двух методик: стандартной компании *National Instruments (NI)* при использовании модели *Polynomial (Kl, K2, K3)* в раздел 3.2.2 и разработанной методики калибровки, которая описана в разделе 3.3 и результатов, полученных в разделе 5.4. Для системы 0,3 Мп стандартная калибровка *NI* для всего поля зрения обеспечивает погрешность не более ±1*px*, а для цифровых камер 5 Мп около ±2*px*. Использование разработанной методики калибровки, основанной на дискретизации пространства изображений (ДПИ) позволяет для камеры 5 Мп уменьшить ее до ±1*px*.

Для оценки влияния погрешности позиционирования объекта относительно камеры зададим его максимальное отклонение относительно плоскости калибровки равным ±20 мм. Вычислив изменение линейного увеличения для идеальной оптической системы по формуле (2.4), получим что при максимальном смещении погрешность определения изменения размеров токоподводящего стержня может достигать ±1,7/1 мм при оценки длины и ±1,2/0,5 мм при оценке диаметра для рассматриваемых камер 0,3 Мп /5 Мп.

Поскольку длина контролируемого объекта превышает поле зрения цифровых камер, то на точность определения его длины будет влиять погрешность его базирования в захвате. На основании анализа конструкции захвата примем эту величину равной ±0,5 мм.

Для оценки погрешности установки токоподводящего стержня на заданный горизонт необходимо учесть изменение положения цифровой камеры относительно объекта привязки – электролизера. Поскольку камера закреплена на мостовом кране, перемещающемся по рельсовым путям, то нужно учесть

наибольшее отклонение рельсовых путей мостовых кранов от прямой линии в вертикальной плоскости на всей длине пути, которое согласно [187] не должно превышать 10 мм и на соседних колоннах при величине пролета до 10 м. Дополнительно необходимо учесть прогиб моста крана, допустимая величина которого не превышает $\Delta/L \leq 0{,}001$ согласно [51] для кранов, которые должны выполнять точное позиционирование груза. Пролет крана L равен 25м (рисунок 6.6). Соответственно прогиб Δ будет мене 25 мм. Отклонения в вертикальной плоскости направляющих для перемещения его тележки по [51] могут быть до 2 мм. Учитывая случайный составляющих погрешностей этой группы, можно принять эту величину равной 27 мм для позиций обслуживания электролизеров.

Погрешность от рефракции оптической среды в цеховых условиях, вызывающей искажения изображения можно оценить, используя исследования вертикальной рефракции приведенной в разделе 3.5. Для рассматриваемого расстояния и интенсивности от тепловых потоков при коэффициенте рефракции - 2 не погрешность определения геометрических размеров от рефракции в оптическом тракте передачи информации можно считать случайной величиной не превышающей ±0,5 мм.

Для наглядности все погрешности сведены в таблицу 6.2. На основе данных этой таблицы можно оценить инструментальную погрешность определения диаметра и длины стержня, а так же его установки на заданный горизонт для выбранной аппаратной составляющей. Результаты оценки в таблице 6.3.

Проведенное исследование позволяет заключить, что применение оптических пассивных средств контроля в цеховых условиях обеспечивает возможность определения параметров рабочей части токоподводящего стержня электролизера с погрешностью ± 1 мм при не более 5% ошибочных измерений или ошибок распознавания объектов в случае использования цифровой камеры с разрешением 5 Мп, но не позволяет с заданной погрешностью определить длину стержня и решить задачу установки на заданный горизонт.

Таблица 6.2 – Составляющие погрешности измерений системы контроля

Составляющие погрешности	Относительная величина, % / абсолютная величина, мм			
	КТЗ 0,3 Мп		КТЗ 5 Мп	
	длина	диаметр	длина	диаметр
от фоновой засветки	±0,5px/ 0,3 мм		±1 px / 0,17 мм	
отражения от поверхности объекта				
аберрации оптической системы	±1*px*/ 0,6 мм		±2px / 0,34 мм (стандартные методики *NI*) ±1 *px* / 0,17 мм (методика ДПИ)	
позиционирования объекта относительно КТЗ	±1,7 мм	±1,2 мм	±1,0 мм	±0,5 мм
положения КТЗ относительно объекта привязки-электролизера	±0,5 мм (до 27 мм установка на заданный горизонт)	-	±0,5 мм (до 27 мм установка на заданный горизонт)	-
рефракция оптической среды в цеховых условиях	±0,5 мм			

Таблица 6.3 – Погрешность оценки параметров токоподводящих стержней

Параметры токоподводящих стержней	СТЗ 0,3 Мп		СТЗ 5 Мп			
			стандартная методика калибровки NI		методика ДПИ	
	мах.	СКВ	мах.	СКВ	мах.	СКВ
Диаметр (форма), размеры дефектов, мм	±2,6	±1,34	±1,51	±0,89	±1,34	±0,79
Длина, мм	±3,6	±1,8	±2,4	±1,1	±2,23	±1,17
Установка на заданный горизонт, мм	23,6±3,99	22	23,6±2,29	22	23,6±2,29	22

Для обеспечения заданной точности измерения длины стержня необходимо систему дистанционного контроля коррозионного износа анодных токоподводящих штырей дополнить элементами схемы активного типа, которая содержат внутри себя устройства формирования исходной измерительной информации (рисунок 4.19) [16].

Активный канал оптической системы, оснащенный лазерным излучателем с линейной разверткой позволяет сформировать на поверхности анодного штыря «световое сечение». Проецирование должно осуществляется на поверхность штыря не подверженного коррозии, что предполагает увеличение поля зрения (рисунке 4.50) до 0,5 … 0,7 м. Для фиксации изображения «светового сечения» используется камера технического зрения. Получение серии изображений «светового сечения» позволяет оценить величину случайных погрешностей, источниками которых являются тепловые потоки и электромагнитные излучения, на результат измерений (рисунок 6.11).

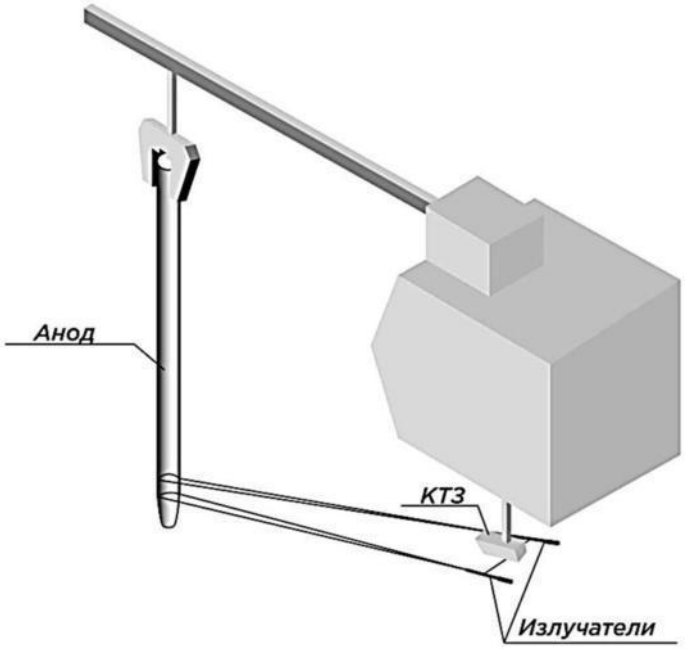


Рисунок 6.11 – Схема расположения элементов системы контроля анодных штырей

Укрупненный алгоритм процедуры контроля представлен на рисунке 6.12.

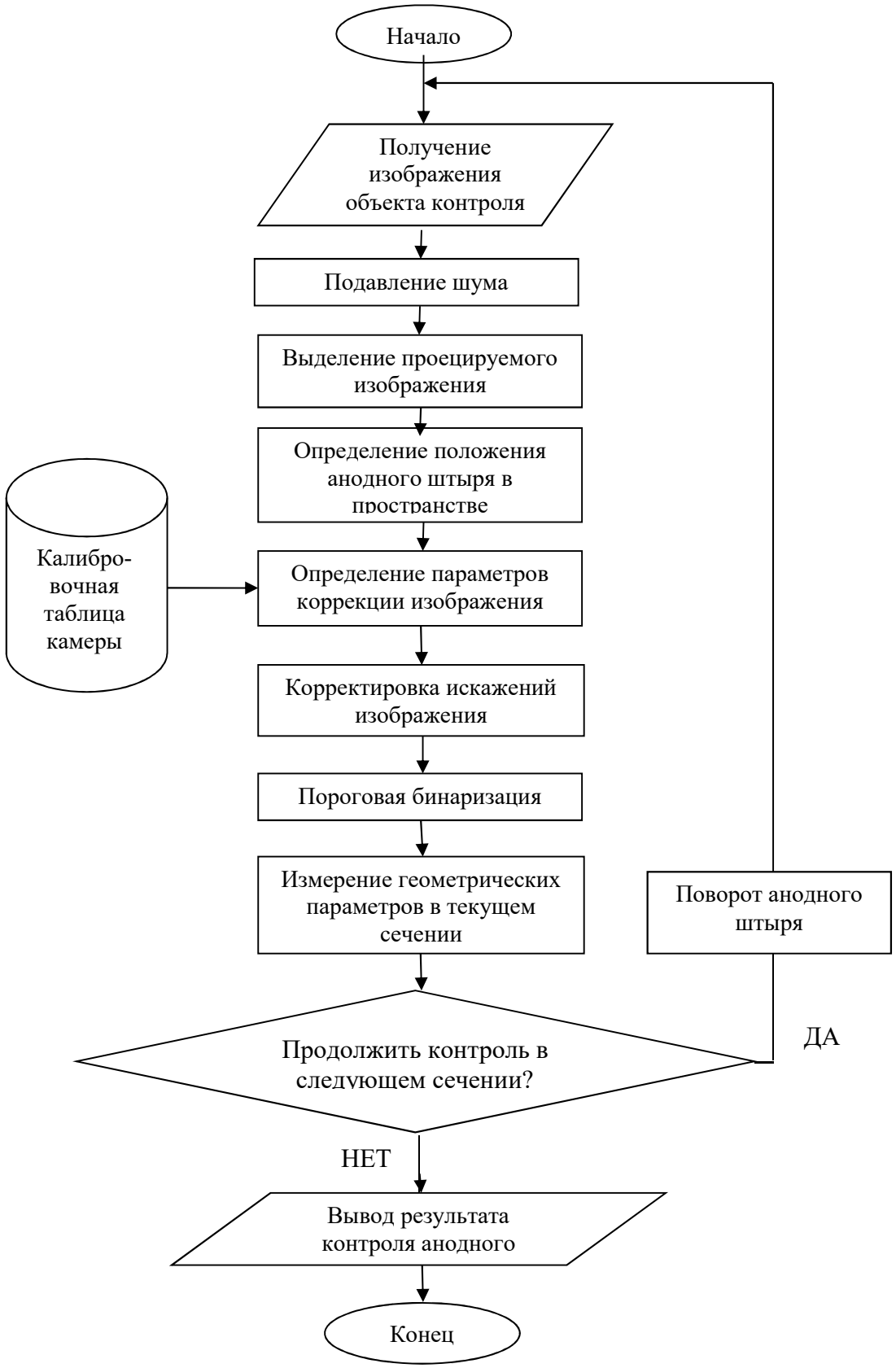


Рисунок 6.12 – Алгоритм процедуры контроля состояния анодного штыря

Однако введение данной схемы не решает все поставленные задачи контроля, а именно обеспечение необходимой точности постановки анодных штырей на заданный горизонт, поэтому представляется целесообразным выделение последней проблемы в отдельную задачу контроля и решения их по отдельности, используя наиболее эффективные средства.

6.2.2 Оценка погрешностей системы контроля токоподводящих штырей электролизеров при размещении на участке их очистки

Операции контроля состояния токоподводящего стержня представляется целесообразным проводить на участке их очистки. Достоверность контроля длины стержня в значительной степени определяется погрешностью базирования штыря в захвате.

Для контроля установки стержня на заданный горизонт требуются дополнительные технические решения, позволяющие компенсировать положения цифровой камеры относительно объекта привязки – электролизера. Решение данной задачи можно осуществлять за счет контактных систем контроля.

Оптическая система, использованная для контроля, показана на рисунке 6.13 [177]. На схеме показано положение плоскости *P,* в которой контролируется размер стержня *D.* В пространстве изображений матрица цифровой камеры обозначена *P′*. Исходя из поля зрения и требований по точности измерения минимальное разрешение цифровой камеры для регистрации изображений должно быть не менее 1600x1200 *px*, что соответствует матрице размером в 2 Мп и позволяет получить разрешение до 0,2 мм/*px*. Исходя из вышесказанного в качестве регистрирующих устройств системы контроля геометрии токоподводящих стержней будем рассматривать возможность применения цифровых камер с разрешением 2 и 5 Мп.

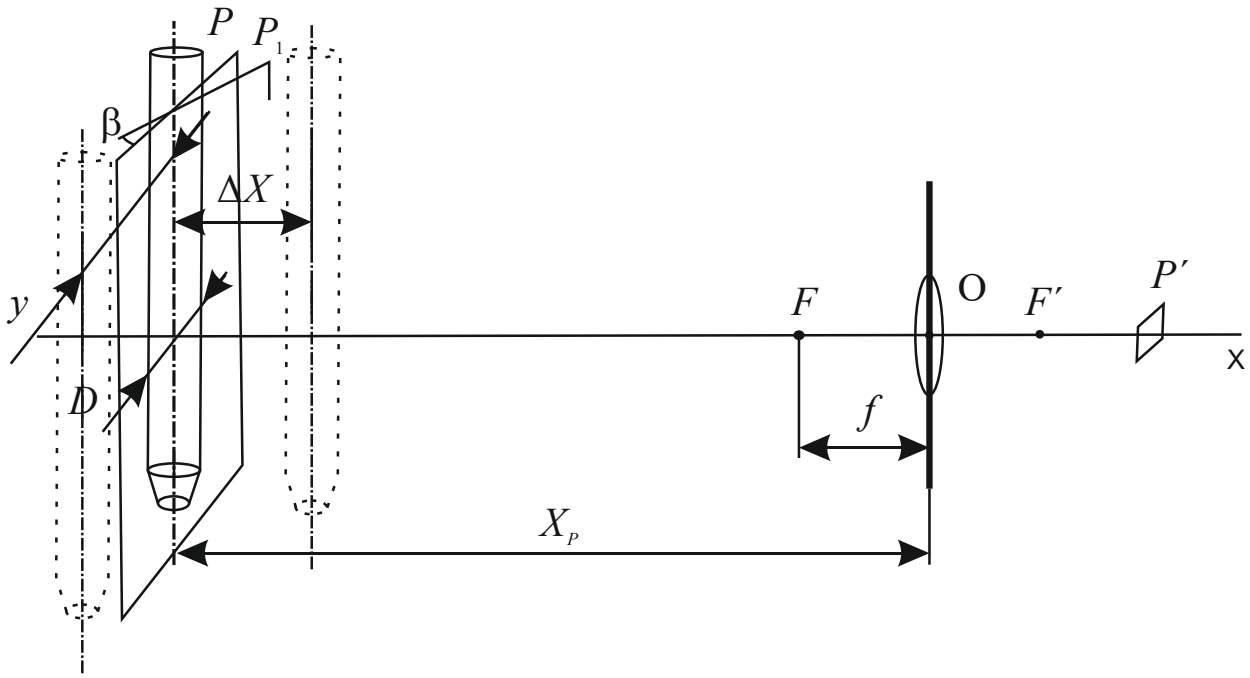


Рисунок 6.13 – Схема одноканальной пассивной системы контроля

Основные факторы, влияющие на точность определения геометрии токоподводящего штыря одноканальной пассивной системой контроля:

1. разрешение цифровой камеры,
2. аберрации оптической системы,
3. позиционирование штыря относительно цифровой камеры,
4. проекционная погрешность нетелецентрического объектива,
5. погрешность от фоновой засветки,
6. погрешность отражения от поверхности объекта,
7. погрешность рефракции оптической среды в цеховых условиях.

Для компенсации аббераций оптической системы проводят калибровку цифровых камер по тест-объекту, учитывая особенности калибровки систем контроля тел вращения, описанные в разделе 4.2.1.

Если задаться относительной погрешностью процедуры калибровки в 1 *px* (0,05% для рассматриваемого минимального разрешения цифровой камеры), то на основе зависимости 4.20 можно определить, что допустимыми будут угловые отклонения тест-объекта до 1°.

При смещении контролируемого объекта относительно плоскости калибровки перпендикулярно его оси симметрии на расстояние y происходит поворот изображения на угол α. На основе ранее полученной зависимости (4.16) для рассматриваемых камер с разрешением 2 и 5 Мп и объективами с f = 25 мм рабочая дистанция для заданного поля зрения L = 865 и 1208 мм и соответственно при отклонении мене 25 мм получим, что погрешность определения размера штыря составит менее 0,05%.

Проекционная погрешность нетелецентрического объектива на основании зависимости (4.13) при имеющихся отношениях размера стержня относительно поля зрения составляет 0,07 %.

Погрешность позиционирования штыря при его возможных отклонениях относительно плоскости калибровки ± 20 мм составляет 2.5% для камеры 2 Мп и 1,8% для 5 Мп, что при заданных расстояниях X_P дает погрешность в 2,5/1,8 мм соответственно.

Используя результаты вышеприведенные оценок составляющих погрешности и данные таблицы 6.3, представим результаты анализа погрешностей одноканальной пассивной системы контроля токоподводящих штырей в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Оценка погрешностей одноканальной пассивной системы контроля

Составляющие погрешности	Относительная величина, % / абсолютная величина, мм	
	камера 2 Мп	камера 5 Мп
аберрации оптической системы	±1 *px* / 0,25 мм	±1 *px* / 0,17 мм
позиционирования объекта относительно цифровой камеры	±2.5% / ±2,5 мм	1,8% / ±1,8 мм
объекта в плоскости калибровки перпендикулярно его оси симметрии	0,05 % / 0,05 мм	
проекционная погрешность нетелецентрического объектива	0,07 % / 0,07 мм	
от фоновой засветки	±1 *px*/ 0,25 мм	±1 *px* / 0,17 мм
отражения от поверхности объекта		
рефракция оптической среды в цеховых условиях	±0,1 мм	
Σmin-max/ СКВ	3,22/2.53	2,36/1,82

Результаты анализа показывают, что одноканальная система при стационарном положении объекта контроля не обеспечивает требуемой точности. Основной вклад вносит погрешность позиционирования объекта относительно цифровой камеры, что требует перейти к компоновке, обеспечивающей компенсацию данных погрешностей за счет увеличения числа камер, как на рисунках 6.1*c*-*d*, или с использованием зеркальных преобразователей в соответствии со схемами на рисунках 6.2 *a*-*b*.

Так, при схеме, показанной на рисунке 6.1c, возможно реализовать автоматический контроль геометрии анодных штырей с погрешностью ±1мм системой из двух цифровых камер, оптические оси которых пересекаются под углом 90°±1°. Это позволит получить максимальную погрешность определения длины 0,88/ 0,62 мм и 0,73/ 0,53 мм диаметра тела вращения для камер 2 и 5 Мп соответственно и отвечает заданным требованиям к точности их измерения. Для этого точность позиционирования тест-объекта при проведении процедуры калибровки по угловым отклонениям не должна превышать 1°, по линейным смещениям ±1/2 мм при использовании камер с разрешением 2 и 5 Мп соответственно и объективом с *f*=25мм.

6.3 Система контроля углов установки колес автомобилей

На основе разработанного метода п. 4.3 можно реализовать стенд для оперативного контроля установки колес автомобилей (рисунок 6.14) [123]. Действие системы основывается на независимом определении положений колес относительно устройств контроля и вычислении их взаимного положения на основании информации о расположении устройств контроля. Сведения о расположении устройств контроля могут быть получены в результате предварительной их настройки и юстировки.

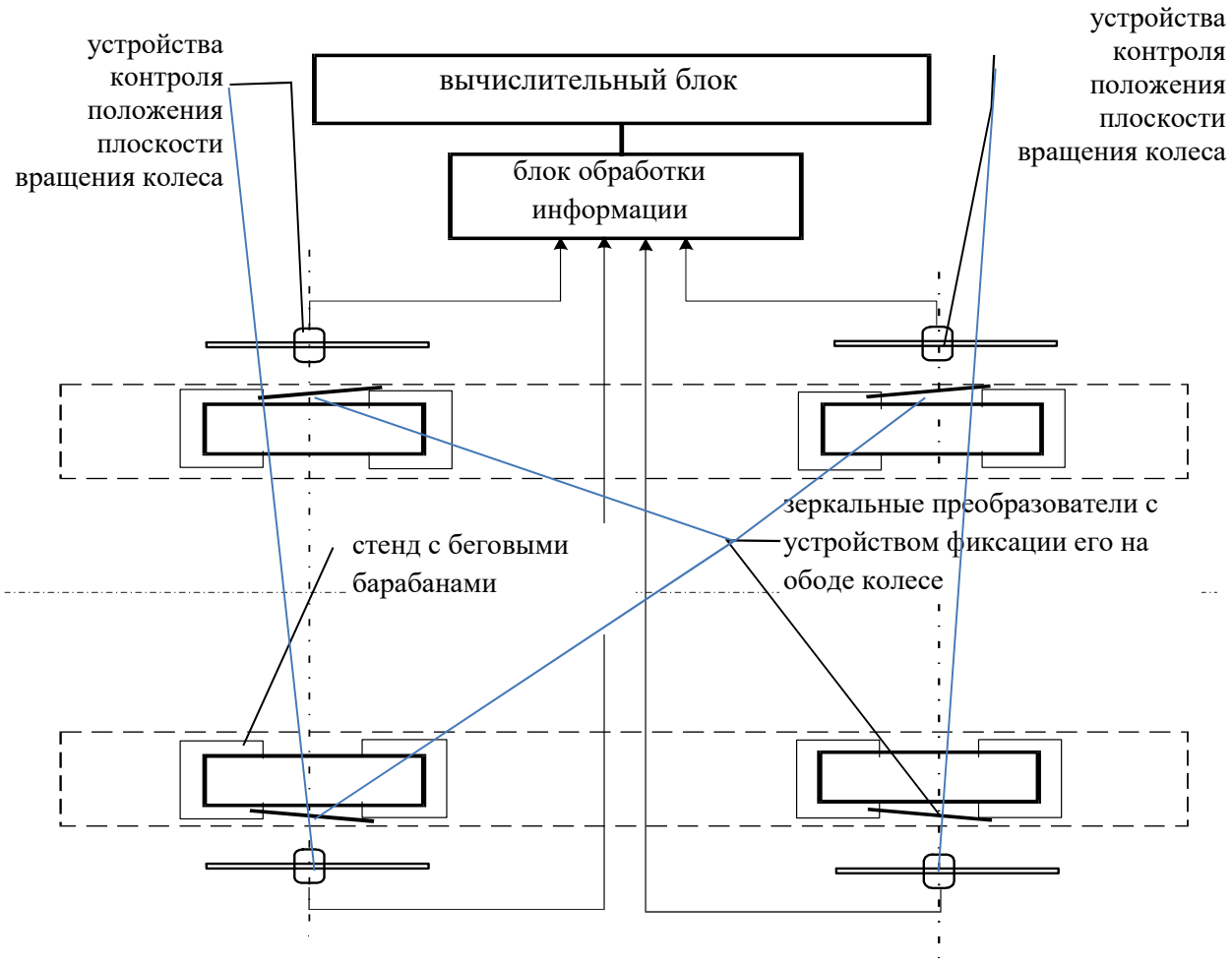


Рисунок 6.14 – Общая схема системы контроля углов установки колес автомобилей

Основным элементом стенда является устройство контроля положения плоскости вращения колеса, которое предназначено для формирования изображения светящейся марки и индикации ее отображения от ЗП. Схема получения измерительной информации приведена на рисунке 6.14.

С целью исключения влияния погрешностей установки зеркального преобразователя на колесе автомобиля и в связи с увеличением количества неизвестных параметров в схему устройства контроля включено четыре источника излучения, попарно расположенных на осях X и Y.

Особенности проведения контрольных измерений на стенде сводятся к следующему. Автомобиль устанавливают на стенде. Расположение его

параллельно оси стенда (допустимые предельные отклонения ±1°) обеспечивается за счет самоцентровки колес в беговых барабанах. На каждом колесе при помощи устройства фиксации закрепляется ЗП. Проворачивая колеса автомобиля посредством вращения беговых барабанов, фиксируем траекторию движения отображения светящейся марки от ЗП на поверхности анализа устройства контроля при помощи оптоэлектронными средствами (линеек фотоприемников или цифровой камеры). оптоэлектронными соединены через блок обработки измерительной информации с вычислительным устройством, снабженным устройством визуального отображения измерительной информации.

6.4 Выводы по Главе 6

1. Приведенная систематизация схем получения измерительной информации оптическими системами контроля изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением о геометрических параметрах осесимметричных объектах и анализ их достоинств и недостатков представляют набор решений по созданию автоматизированных систем контроля геометрических параметров осесимметричных объектов для конкретных производственных задач.
2. Предложен новый подход к оценке качества канатов шахтных подъемных установок, который основан на применении системы технического зрения. Особенностью фильтрационной обработки изображения является применение дискретного преобразования Фурье.
3. Рассмотрение возможности решения задач контроля геометрии токоподводящего стержня и его установки на заданный горизонт при размещении оптической измерительной системы на штыревом кране показало, что погрешность измерения существенно превышает заданные значения (до 22 мм вместо 1 мм). Вследствие чего совмещение данных задач представляется нецелесообразным.

4. Операцию контроля состояния токоподводящего стержня представляется целесообразным проводить на участке их очистки, что позволило бы использовать цифровые камеры с разрешением не менее 2 Мп для достижения заданной точности контроля формы стержня. Достоверность контроля длины стержня в значительной степени определяется погрешностью базирования штыря в захвате и может быть обеспечена применением схем контроля с компенсацией погрешность позиционирования.
5. Для контроля установки стержня на заданный горизонт требуются дополнительные технические решения, позволяющие компенсировать положения цифровой камеры относительно объекта привязки – электролизера. Решение данной задачи целесообразнее осуществлять за счет систем контроля основанных на прерывании луча (барьерных датчиках) или контактным способом.
6. Применение оптико-электронных стендов контроля углов установки колес автомобилей с использованием зеркальных преобразователей позволяет решить задачу оперативного контроля состояния ходовой части автомобилей, уменьшая затраты времени и исключения влияния субъективных погрешностей за счет получения дополнительной измерительной информации об углах наклона измерительных преобразователей.

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 учете особенностей объектов контроля, получении дополнительных информативных параметров о его положении и ориентации тест-объекта (или зеркального преобразователя) и на основе полученных аналитических зависимостей позволивших реализовать алгоритмы компенсации систематических и случайных составляющих погрешности измерений.

В ходе работы были проведены теоретические и экспериментальные исследования источников погрешностей при контроле плоских и осесимметричных изделий и выведены аналитические зависимости, алгоритмы и программное обеспечение, необходимое для разработки систем контроля плоских и осесимметричных изделий для различных отраслей промышленности.

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 оценка их качества в соответствии с требованиями стандартов. и 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 и поверхностной оценки состава. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для определения размера брикетированного материала в процессе его перемещения.

Проведенные исследования исходят из практической необходимости повышения точности процессов измерений геометрических параметров изделий при автоматизации производств различных отраслей промышленности с использованием доступных аппаратных средств.

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.

Подводя итоги проведенной работы, можно утверждать, что исследования погрешностей и предложенные методики их компенсации в сочетании с предложенными схемами получения измерительной информации позволяют существенно расширить области применения оптических средств контроля.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДПИ – дискретизация пространства изображения

ЗП – зеркальный преобразователь

ЗС – зеркальные системы

ИГ – измерительные головки

КИМ – контрольно-измерительные машины

ОЗ – одиночное зеркало

ОП – оптические преобразователи

ОЭС – оптико-электронная система;

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ПИ – проектор измерительный;

ПК – персональный компьютер;

ПО – программное обеспечение

СТЗ – системы технического зрения

ЧПУ – числовое программное управление

ШРУС – шарнир равных угловых скоростей;

УЗ – угловое зеркало;

CCD – charge-coupled device (ПЗС) прибор с зарядовой связью);

CMOS – complementary metal-oxide-semiconductor (КМОП) комплементарная структура металл-оксид-полупроводник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 3D Сканеры [Электронный ресурс]. –URL: http://top3dshop.ru / (дата обращения 08.05.2018)
2. Абакулина, Л.И. Зеркальные задатчики пространственных перемещений / Л.И. Абакулина, **А.А. Кульчицкий**, А.А. Сарвин (доклад) / Сборник докладов VIII научно-технических конф. «Экстремальная робототехника». – Санкт-Петербург. – Издательство СПбГТУ. – 1997. – С. 379-381
3. Абакулина, Л.И. Зеркальные задатчики точных перемещений / Л.И. Абакулина, **А.А. Кульчицкий**, А.А. Сарвин (доклад) /Сборник докладов VIII наученой-технических конференции «Экстремальная робототехника». – Санкт-Петербург. – Издательство СПбГТУ. 1997 – С. 377-378
4. Абакулина, Л.И. Моделирование задач сложения и разложения конечных поворотов / Л.И. Абакулина, **А.А. Кульчицкий**, А.А. Сарвин (доклад) // IX научно-техническая конференция “Экстремальная робототехника”: Материалы конференции. - Санкт-Петербург. – Издательство СПбГТУ. – 1998. – С. 398-402.
5. Абакулина, Л.И. Синтез оптических измерителей и задатчиков малых перемещений, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.02.11 / – СПб. – СЗПИ. – 2000. – 155с.
6. Абакумов, И.И. Алгоритмический способ компенсации погрешностей автоматизированной электронной системы контроля геометрических параметров объектов / И.И. Абакумов, **А.А. Кульчицкий** (доклад) // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: сборник трудов II международной научно-практической конференции Том II / - Санкт-Петербург. – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2014. – С. 104-107.

7. Абакумов, И.И. Компенсация погрешностей оптико-электронной системы автоматизированного контроля геометрических параметров объектов, автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.11.13 / – Санкт-Петербург. – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». –2013. – 149 с.
8. Абакумов, И.И. Компенсация погрешностей пассивной оптико-электронной системы контроля геометрии изделий / И.И. Абакумов, **А.А. Кульчицкий** // Измерительная техника. 2016. – № 8. – С. 27-30. Abakumov, I.I. Compensation of errors of passive optoelectronic monitoring system of geometry / I.I. Abakumov, **A.A. Kulchitsky** // Measurement Techniques. – 2016. – 59(8). – С. 826–831.
9. Абакумов, И.И. Применение светофильтров при контроле пороков стекла с использованием системы технического зрения [Текст] / И.И. Абакумов, В.В. Булатов // Труды XI Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления» I ч. – Санкт-Петербург. – СЗТУ, – 2010. – С.7-10.
10. Амромин, П.Д. Калибровка аэрофотоаппаратов по снимкам конвергентной съёмки, образующих замкнутый триплет. – Труды Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъёмки и картографии. – 1974. – № 35. – с. 69-78.
11. Аникст, Д.А. Высокоточные угловые измерения / Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин под ред. Ю.Г. Якушенкова. // М.: Машиностроение. – 1987. – 480 с.
12. Антипов, И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции [Текст] / И.Т. Антипов // Москва. – Картгеоцентр – Геодезиздат. – 2003. – 296 с.

13. Апенко, М.И. Оптические приборы в машиностроении. Справочник / М.И. Апенко, И.П. Араев, В.А. Афанасьев и др., под ред. Н.П. Заказнова. - Москва. – Машиностроение, – 1974. - 238 с.
14. Апенко, М.И. Прикладная оптика /Апенко М.И., Дубовик А.С.// Москва. – Наука. – 1982. – 612 с.
15. 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 (статья) // Цветные металлы. – 2018. – № 3. – С. 27-32
16. Бажин, В.Ю. Оптический контроль состояния стальных анодных штырей на электролизерах Содерберга / В.Ю. Бажин, А**.А. Кульчицкий**, Д.Н. Кадров, П.А Петров // Металлург. – 2016. – №63 (4). – С. 96-100.
Bazhin, V.Y. Optical monitoring of the condition of steel anode pins in soderberg electrolysis cells / V.Y. Bazhin, **A.A. Kulchitskii**, D.N. Kadrov, P.A. Petrov // Metallurgist. – 2016. – Т. 60. № 3-4. – С. 325-330.
17. Бажин, В.Ю. Оценка возможности контроля состава брикетированных алюминиевых материалов для вторичной переработки по их плотности / В.Ю. Бажин, **А.А. Кульчицкий**, Д.А. Кашин (доклад) // В сборнике: Технические науки: проблемы и решения. Сборник статей по материалам XV-XVI международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 46-50.
18. Бажин, В.Ю. Управление анодным эффектом на алюминиевом электролизере / В. Ю. Бажин, А. А. Власов, А. В. Лупенков // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 89–93.
19. Бегунов, Б.И. Теория оптических систем / Б.И. Бегунов, Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев // Москва. – Машиностроение. – 1973. – 488 с.
20. Белкин, И.М. Средства линейно-угловых измерений / И.М. Белкин. Справочник. - Москва. – Машиностроение. – 1986. – 368 с.

21. Блинников, А.А. Коррекция искажения перспективой в системе технического зрения / А.А. Блинников, В.И. Бойков, В.В. Булатов, **А.А. Кульчицкий**, Спорягин А.В. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. № 4. – С. 89-93.
22. Богуславский А.А. Методы программирования систем технического зрения реального времени: автореферат диссертация доктора физико-математических наук: 05.13.11 / Институт прикладной механики. - Москва, 2006. – URL: http://www.dissercat.com/content/programmnoe-obespechenie-sistem-tekhnicheskogo-zreniya-na-baze-ibm-sovmestimykh-personalnykh#ixzz5E9WSo2Ba / (дата обращения 08.05.2018)
23. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э.Вольф, перевод с англ.// 2 издание. – Москва. – 1973. – 713 с.
24. Бражкин, Б.С. Координатно-измерительные машины для контроля тел вращения / Б.С. Бражкин [и др.]. – Москва. – Миттель Пресс. – 2012. – 207 с.
25. Бублик, Д.А. К вопросу контроля геометрических параметров объектов двойной кривизны больших размеров при помощи системы технического зрения / Д.А. Бублик, Р.В. Кононенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – 23(4). – С. 670–677. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-670-677
26. 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 [Текст] //Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. – Иркутск. –2012. – № 2. – ИрГТУ. – С.21-26.
27. Булатов, В.В. Выделение линейных и эллипсовидных объектов на изображении на основе расчета коэффициента корреляции / В.В. Булатов // Современная наука и инновации. – Пятигорск. – СКФУ. – 2019. – №2 (26). – С. 72-81.

28. Булатов, В.В. Исследование систем освещения устройства автоматизированного детектирования пороков стекла. / Булатов В.В., Важенин А.Ю.// Материалы XVII Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2015». – Ухта. – УГТУ. – 2015 – С. 109-112.
29. Булатов, В.В. Методика обнаружения пороков стекла с применением камеры технического зрения/ В.В. Булатов, И.И. Абакумов, **А.А. Кульчицкий** // Научно-технические ведомости СПбГПУ «Наука и Образование». – Санкт-Петербург. – СПбГПУ. – 2011. – С.163-168.
30. Булатов, В.В. Оптико-электронная система детектирования пороков листового стекла на основе технологии технического зрения, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.11.13 / - Санкт-Петербург. – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2013. – 149 с.
31. 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.
32. Бусленко, Н.П. Метод статистических испытаний / Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер // Москва. – Фшматгиз. – 1961. – 226 с.
33. Быков, А.Л. Исследования методики калибровки аэрофотокамер на равнинном испытательном полигоне/ А.Л. Быков [Текст] // Геодезия и картография. – 2012. – №6. – С. 32–35.
34. Важенин, А.Ю. Автоматизированная система активного контроля по сопряженным плоскостям, диссертация магистра. – Санкт-Петербург. – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. – 91 с.
35. Васильева, И.И. Механические и оптико-механические приборы для линейных измерений. - Ленинград. – СЗПИ. – 1978. - 80 с.

36. Васин, Н.Н. Система технического зрения для контроля состояния железнодорожного пути / Н.Н. Васин, Р.Р. Диязитдинов // Компьютерная оптика. - 2016. –Т. 40, № 3. - С. 410-415. -DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-410-415
37. Вертикальная измерительная сканирующая видеосистема для контроля валов WMM DR. SCHNEIDER MESSTECHNIK – [Электронный ресурс]. –: URL: http://stankomashkomplekt.ru/katalog/oborudovanie_izmeritelnoe/kontrol_valov/dr_schneider_messtechnik/wmm/ – (дата обращения: 09.01.2018)
38. Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision / Ю.В.Визильтер, С.К. Желтов, В.Л. Князь, Л.II. Ходарсв, А.В. Моржнн // – Москва. – ДМК Пресс. – 2007. – 464 с.
39. Волосов, Д.С. Фотографическая оптика/ Д.С. Волосов. – Москва. – Искусство. – 1978. – 543с.
40. Гапшис, В.-А.А. Координатные измерительные машины и их применение / В.-А.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов и др. – Москва. – Машиностроение. – 1988. - 328 с.
41. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – Москва. – Техносфера. – 2012. - 1104 с.
42. Горевой, А.В. Методы восстановления трехмерной структуры объектов для многоканальных систем регистрации с использованием структурированной подсветки / А.В. Горевой, В.Я. Колючкин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2012. – С.185 – 201
43. ГОСТ 111-2001 Стекло листовое. Технические условия. Введен 2003-01-01. – Москва. – Госстрой России. – ГУП ЦПП. – 2002. – 35 с.
44. ГОСТ 111-2014 Стекло листовое бесцветное. Технические условия. Введен 2016-04-01. – Москва. – Стандартинформ. – 2016. – 15 с.
45. ГОСТ 19795-82 Проекторы измерительные. Общие технические условия – Москва. – Издательство стандартов. – 1988. – 9 с.

46. ГОСТ 23479-79 Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. Введен 1980-01-01. – Москва. – ИПК Издательство стандартов. – 2005. – 10с.
47. ГОСТ 31254-2004 (ИСО 14660-1:1999, ИСО 14660-2:1999) Основные нормы взаимозаменяемости. Геометрические элементы. Общие термины и определения. Введен 2005-07-01. – Москва. – Стандартинформ. – 2005. – 12 с.
48. ГОСТ 32361-2013 Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения. – Москва. – Стандартинформ. – 2016. – 8 с.
49. ГОСТ 32557-2013 Стекло и изделия из него Методы контроля геометрических параметров и показателей внешнего вида. Введен 2015-01-01. – Москва. – Стандартинформ. – 2014. – 14 с.
50. ГОСТ 32565-2013 Стекло безопасное для наземного транспорта. Общие технические условия. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2016. – 48 с.
51. ГОСТ 32579.5-2013 Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Часть 5. Краны мостового типа. – Москва. – Стандартинформ, – 2015. – 14 с
52. ГОСТ 5727-88 Стекло безопасное для наземного транспорта. Введен 2001-08-27. – Москва. – Стандартинформ. – 2006. – 18 с.
53. ГОСТ Р 53696-2009 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. – Москва. – Стандартинформ. –2009.– 8 с.
54. ГОСТ Р 54170-2010 Стекло листовое. Технические условия. Введен 2012-01-01. – Москва. – Стандартинформ. –2010. – 35 с.
55. ГОСТ Р 56542-2019 Национальный стандарт российской федерации контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Non-destructive testing. Classification of types and method». – Москва. – ИПК Издательство стандартов. – 2019. – 10 с.
56. ГОСТ Р 58399-2019 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Общие требования. – Москва. – Стандартинформ. – 2019. – 12 с.

57. ГОСТ Р ИСО 10360-2-2017 Характеристики изделий геометрические. Приемочные и перепроверочные испытания координатно-измерительных машин. Координатно-измерительные машины, применяемые для измерения линейных размеров. – Москва. – Стандартинформ. – 2019. – 28 с.
58. ГОСТ Р ИСО 230-1-2010 Испытания станков. Часть 1. Методы измерения геометрических параметров. – Москва. – Стандартинформ. –2010. – 85 с
59. ГОСТР 53696— 2009 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения, – Москва. – 2006. – ИПК Издательство стандартов. – 2010. – 8 с.
60. Грейм, И.А. Анализ, синтез и юстировка зеркально-призменных систем / И.А. Грейм. – Ленинград. – СЗПИ. – 1981. – с. 81
61. Грейм, И.А. Зеркально-призменные системы / И.А. Грейм //- Москва. – Машиностроение. –1981. - 125 с.
62. Грейм, И.А. Преобразование зеркально-призменных систем с применением бикватернионов / И.А. Грейм , М.Б. Шефтель // Известия вузов СССР. - “Приборостроение”. – 1978. – т. XXI, № 1. – С. 83-86
63. Гридин, В.Н. Адаптивные системы технического зрения / В.Н. Гридин, В.С. Титов, М.И. Труфанов. – Москва. – Наука. – 2009. – 442 с.
64. Гужов, В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: учеб. пособие / В.И. Гужов. – Новосибирск. – Издательствово НГТУ. – 2015. – 82 с.
65. Джост, Дж. Маркези Техника профессионального освещения, VERLAG PHOTOGRAPHIE / Дж. Маркези Джост // Третье дополненное издание. – 1996. – 210 с.
66. Дрок, М.К. Исследование точности определения превышений в ходах геодезического нивелирования на короткие расстояния в равнинной местности / М.К. Дрок // Научные записки ЛПИ. – 1961. – № 6. – С. 183–199.

67. Дрок, М.К. К вопросу о поправке в превышения за совместное влияние кривизны Земли и вертикальной рефракции при геодезическом нивелировании на малые расстояния / М.К. Дрок // Научные записки ЛПИ. – 1962. – № 7. – С. 3–30.

68. Дубиновский, В.Б. Калибровка снимков [Текст] / В.Б. Дубиновский. – Москва. – Недра. – 1982. – 224 с.

69. Жимулева, Е.С. Разработка и исследование телецентрических объективов /Е.С. Жимулева, П.С. Завьялов, М.С. Кравченко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIIIмеждунар. наученой конгр. и выст. (Новосибирск, 17-21 апр. 2017 г.): международной научной конференции «СибОптика-2017» : сборник материалов в 2 т. – Новосибирск. – 2017. − Т. 1. − С. 120-124.

70. Жимулева, Е.С. Разработка и создание оптико-электронных теневых проекционных систем для размерного контроля трехмерных объектов с повышенной точностью в промышленном производстве: автореферат диссертация кандидата техн. наук. / Е.С. Жимулева. – Новосибирск. – 2017. - 20 с.

71. Зародов, И.С. Оптико-электронный контроль оцинкованной проволоки / И.С.Зародов Е.В. Ершов// Технические науки. - 2013. - №1. - С. 23-25.

72. Земельман, М.А. Планирование технических измерении и оценка их погрешностей / М.А. Земельман, Н.П. – Москва. – Миф. Издательство стандартов. –1979. – 80 с.

73. Зыков, И.И. Метод обнаружения и распознавания дефектов листового стекла / И.И.Зыков // Информатика, управление и системный анализ: Труды IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием.– Тверь. – Тверской государственный технический университет. – 2016. – Т. II. – С. 19-24.

74. Иванов, О.А. Специальные приборы для линейно-угловых измерений / О.А. Иванов, В.Б. Коркин, В.А. Редкозубова и др. под ред. Ф.В. Цидулко. – Москва. – Издательство стандартов, 1983. 159 с.

75. Иванов, Ю.А. Технологии компьютерного зрения для наблюдения за объектами путевой инфраструктуры / Ю.А. Иванов // Техника железных дорог. - 2011. - №4(16).-С. 57-61.
76. Измерения в промышленности. Справ, в 3-х кн. Кн. 1. Теоретические основы. пер. с нем./ Под редакцией П. Профоса – 2-е над., перераб. и доп. — Москва. – Металлургия, 1990. 492 с.
77. Ильина, О.В. Зеркальные функциональные преобразователи оптических контрольно-измерительных систем. - Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О.В. Ильина. – Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 1992. – 129 с.
78. Иордан, В. Руководство по высшей геодезии. Прецизионное и тригонометрическое нивелирование / В. Иордан, О. Эггерт, М. Кнейсель – Москва. – Госгеолтехиздат. – 1963. – 263 с.
79. Ишанин, Г.Г. Приемники оптического излучения на внешнем фотоэффекте / Ишанин Г.Г., Мальцева Н.К. Учебно-методическое пособие. – Санкт-Петербург. – НИУ ИТМО. – 2013. - 103с.
80. Казаков, И.А. Оценка влияния тепловых потоков на точность определения размеров изделий оптической проекционной системой / И.А. Казаков, **А.А. Кульчицкий** // Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования». Октябрь 2020 г. №66, Часть 2 Издательство НИЦ «ЛЖурнал», 2020. – с. 7-11, doi: 10.18411/lj-10-2020-47 idsp: ljournal-10-2020-47. – URL: https://ljournal.ru/wp-content/uploads/2020/10/lj10_2020_p2.pdf (дата обращения: 26.10.2020)
81. Калинкина, Д. Проблема подавления шума на изображениях и видео и различные подходы к ее решению / Д. Калинкина, В. Дмитрий // Компьютерная графика и мультимедиа — 2005. — № 3. С. 75-80
82. Капичин, И.И. Оптико-электронные углоизмерительные системы / И.И. Капичин. - Киев: Техника, 1986. – 143 с.

83. Кизель, В.А. Отражение света / Кизель В. А. – Москва. – «Наука», Главная редакция физико-математической литературы. – 1973. – 352 с.

84. Кожевников, Д.А. Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта / Д.А. Кожевников, Р.В. Фёдорцев // Приборы и методы измерений.2017. – Т. 8, No 4. С. 374–385. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385.

85. Комарова, Т.Ю. Автоматизация визуального контроля электролизеров Содерберга / Т.Ю. Комарова, **А.А. Кульчицкий** // Вестник современных исследований. – 2017. – 11-1 (14), С. 223-224.

86. Комарова, Т.Ю. Автоматизация мониторинга и очистки от HF посредством красного шлама на участке электролизеров с анодом Содерберга / Т.Ю. Комарова, **А.А. Кульчицкий**, А.Б. Лебедев, В.Ю. Бажин // Вестник Иркутского государственного технического университета. Т. 23. № 4 (147)., 2019, С. 816-828 DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-816-828.

87. Комарова, Т.Ю. Автоматизация мониторинга технологического состояния электролизеров Содерберга при помощи систем технического зрения / Т.Ю. Комарова, **А.А. Кульчицкий** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 2 (44) часть 2. – С. 25-27.

88. Комарова, Т.Ю. О применении трехзеркальных систем с компланарными нормалями в качестве измерительных преобразователей средств контроля прямолинейности направляющих станков / Т.Ю. Комарова, **А.А. Кульчицкий** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 3-1 (34). – С. 85-89.

89. Комиссаров, А.В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий 25.00.34 - Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.В. Комиссаров. – Новосибирск. – СГУГиТ. – 2015. – 278 с.

90. Комиссаров, Д.В. Методика калибровки цифровых неметрических камер для наземных лазерных сканеров / Д.В. Комиссаров, А.В. Комиссаров - Текст: электронный. – 2006. URL: http://www.geoprofi.ru/default (дата обращения: 19.02.2019)

91. Компьютерное_зрение:_технологии,_рынок,_перспективы [Электронный ресурс]. – URL: http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B7%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5:_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8,_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA,_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D1%8B. (дата обращения: 19.02.2019)

92. Кононогов, С.А. Концепция обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы / С.А. Кононогов. В.Г. Лысенко, С.Ю. Золотарсвский // Приборы. - 2008.-№3.-С. 1-13.

93. Контактные измерительные системы для станков с ЧПУ Н-2000-3022-08-А Технические характеристики [Электронный ресурс]. – URL: http://zadelrf.ru/upload/uf/9c6/9c6bbbe5b782ff0c9bfde8d2d08da533.pdf / (дата обращения: 07.01.2020)

94. Коняхин, И.А. Оптико-электронный автоколлиматор для двухкоординатных угловых измерений / И.А. Коняхин, А.А. Моисеева, Ван Фонг Хоанг. // Изв. вузов. Приборостроение. –2016. – Т. 59. № 7. – С. 563—570.

95. Коняхин, И.А. Разработка принципов построения и методов расчета оптико-электронных трехкоординатных углоизмерительных устройств с отражателями. - Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И.А. Коняхин. – Ленинград. – ЛИТМО. – 1981. – 20 с.
96. Коняхин, И.А. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры. Справочник./ И.А. Коняхин, Э.Д. Панков. – Москва. – Недра. – 1991. – 224 с.
97. Координатно-измерительная машина TESA MH3D 454 Recorder [Электронный ресурс]. – URL: http://galika.ru/wp-content/uploads/2013/11/TESA-MH3D-454-Recorder.pdf (дата обращения: 05.02.2021)
98. Координатно-измерительные машины [Электронный ресурс]: – URL: <https://sonatec.ru/catalog/izmeritelnoe-oborudovanie/koordinatno-izmeritelnye-mashiny/ (дата обращения: 09.01.2019)
99. Королев, Ф. А. Теоретическая оптика / Ф.А. Королев - М., «Высшая школа», 1996 г. – 555 с.
100. Коротаев, В.В. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Часть 1.Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений / В.В. Коротаев, А.В. Прокофьев, А.Н. Тимофеев Учебное пособие. – Санкт-Петербург. – НИУИТМО. – 2012.– 114 с.
101. Котляр, В.В. Бесконтактное прецезионное измерение линейных смещений с использованием ДОЭ, формирующих моды Бесселя / В.В. Котляр, Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2001. вып.21. – С.102-104

102. Кофнов, О.В. Модель и алгоритмы обработки цифровых изображений для оценивания геометрических параметров материалов с периодической структурой, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: :05.13.11/ О.В. Кофнов - СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – 2015. – 175 с.
103. Кручинина, Н.И. Разработка методики анализа и юстировки зеркально-призменных координатных преобразователей. - Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Н.И. Кручинина. – Ленинград. - ЛИТМО. - 1985. – 20 с.
104. Кузьмич, И.В. Повышение качества контроля дефектов автомобильных стекол путем автоматизации процесса: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.06 / И.В. Кузьмич. – Москва. – 2006. – 122 с.
105. **Кульчицкий, А.А.** Автоматизированный мониторинг технологического процесса при производстве алюминия на электролизерах Содерберга с верхнимтокоподводом / А.А. Кульчицкий, Т.Ю. Комарова // Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки. – Санкт-Петербург, 01-02 ноября 2016 г., С. 46-49.
106. **Кульчицкий, А.А.** Автоматизированный стенд исследования позиционно-чувствительных фотоприемников / А.А. Кульчицкий, А.К. Наумова, В.А. Шабанов (доклад) // Сборник трудов всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы управления техническими, информационными и транспортными системами». - Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 2007. - С. 127–130.
107. **Кульчицкий, А.А.** Анализ действия одиночного вращающегося зеркала / А.А. Кульчицкий, А.А. Сарвин // Межвуз. сб. Вып.5. - Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 1997. – С. 93-98

108. **Кульчицкий, А.А.** Анализ схемных решений триангуляционных измерителей расстояний / А.А. Кульчицкий, Р.Р. Ахметов (доклад) // XI международная конференция молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления», Санкт-Петербург. – СЗТУ. – 2010. – С. 30-35.

109. **Кульчицкий, А.А.** Влияние параметров штрих-марки на номинальную статическую характеристику дифференциальных фотоприемников / А.А. Кульчицкий, И.С. Романов// Третья всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей "Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами". – Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 2009. - С. 188-192

110. **Кульчицкий, А.А.** Выбор и обоснование способа бесконтактной оценки состава брикетированных шихтовых материалов / Д.А. Кашин, А.А. Кульчицкий // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. № 7. – С. 3-8. DOI: 10.25791/asu.07.2019.743.

111. **Кульчицкий, А.А.** Движение изображения точки в системе из двух плоских вращающихся зеркал / А.А. Кульчицкий, А.А. Сарвин // Межвузовский сборник. Машиностроение и автоматизация производства Вып.6.- Санкт-Петербург. – СЗПИ, 1997– С. 122-127.

112. **Кульчицкий, А.А.** Изображение подвижной предметной точки во вращающемся одиночном зеркале / А.А. Кульчицкий, А.А. Сарвин // (статья). Деп. в ВИНИТИ № 1297 - В97, 1997.

113. **Кульчицкий, А.А.** Исследование моделей калибровки камер технического зрения для программной компенсации искажений в системах контроля геометрических параметров объектов / А.А. Кульчицкий, И.И. Абакумов // Инновационная наука. – 2015.– №10-1, С. 86-91.

114. **Кульчицкий, А.А.** Кинематический метод контроля положения вращающейся плоскости средствами функциональных зеркальных преобразователей, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. :05.02.11/ А.А. Кульчицкий. - Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 1998, –184 с.

115. **Кульчицкий, А.А.** Контроль положения осей вращения средствами зеркальных функциональных преобразователей / А.А. Кульчицкий, А.А. Сарвин // Межвуз. сб. Машиностроение и автоматизация производства. Вып.16. – Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 1999. – С. 72-75

116. **Кульчицкий, А.А.** Многоканальная оптическая система контроля геометрических параметров брикетированного шихтового материала / Кульчицкий А.А., Кашин Д.А. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2020. № 6. – С. 105-109. DOI 10.37882/2223–2966.202

117. **Кульчицкий, А.А.** Многофункциональное управление и мониторинг технического состояния электролизеров Содерберга при помощи систем технического зрения / А.А. Кульчицкий, Т.Ю. Комарова // Актуальные вопросы перспективных научных исследований. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. 2016.- ООО «НОВАЛЕНСО». – Смоленск. – 2016. -С. 133-134.

118. **Кульчицкий, А.А.** Моделирование влияния формы штрих-марки на номинальную статическую характеристику дифференциальных фотоприемников / А.А. Кульчицкий, А.П. Гижинский// Межвуз. сб. проблемы машиноведения и машиностроения, Вып.39. - Санкт-Петербург. – СЗТУ. – 2009. - С. 83-86.

119. **Кульчицкий, А.А.** Моделирование сигналов растровых измерительных преобразователей станочных систем / А.А. Кульчицкий, А.Ю. Стовбуненко (доклад)// Третья всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей "Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами". – Санкт-Петербург. – СЗПИ, 2009. - С. 238-241.

120. **Кульчицкий, А.А** О направлениях исследований оптико-электронных систем активного типа / А.А. Кульчицкий, Д.А. Кашин, Т.Ю. Комарова // Материалы по итогам I –ой Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика современной науки», 20 – 30 октября 2018. – С. 1-5.

121. **Кульчицкий, А.А** Оптико-электронные методы контроля в металлургии цветных металлов / А.А. Кульчицкий, Д.Н. Кадров, Т.Ю. Комарова // Научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук». 31 октября 2018 года. – Казань. – 2018. – С. 40-43.

122. **Кульчицкий, А.А.** О направлениях исследований оптико-электронных средств бесконтактных измерений / А.А. Кульчицкий, А.А. Сарвин (доклад)// Вторая всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами». – Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 2008 – С. 44-46.

123. **Кульчицкий, А.А.** Оптико-электронная система контроля углов установки колес автомобиля / А.А. Кульчицкий, О.К. Мансурова, Г.И. Болтунов // Современная наука и инновации, научный журнал, Пятигорск. – 2019. – №1(25). - С. 68-75.

124. **Кульчицкий, А.А.** Оптико-электронный кинематический контроль положения плоскости вращения / А.А. Кульчицкий, А.А. Сарвин // Межвузовский сборник. Машиностроение и автоматизация производства Выпуск 8. - Санкт-Петербург. – СЗПИ, 1998. – С. 86-89.

125. **Кульчицкий, А.А.** Применение оптической системы пассивного типа при контроле качества брикетированных шихтовых материалов в сборнике: Актуальные вопросы современной науки и образования / А.А. Кульчицкий, Д.А. Кашин // сборник статей III Международной научно-практической конференции: в 2 частях. – Пенза. – 2020. – С. 92-95.

126. **Кульчицкий, А.А.** Применение систем технического зрения для контроля технологических параметров и оборудования на производстве / А.А. Кульчицкий, А.В. Бойков, В.В. Булатов, Т.Ю. Комарова, В.Ю. Бажин// Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – № 20. – С. 17-22

127. **Кульчицкий, А.А.** Применение системы технического зрения для контроля качества канатов шахтных подъемных установок / А.А. Кульчицкий, В.В. Булатов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIII международной научной конференции, в 2 ч. – Санкт-Петербург. – 2020. –С. 301-304.

128. **Кульчицкий, А.А.** Система контроля геометрии осесимметричных изделий с угловым зеркальным преобразователем, Известия высших учебных заведений / А.А. Кульчицкий, А.И. Потапов, А.Г. Смирнов, В.И. Бойков // Приборостроение. – 2020. – Т. 63. № 8. – С. 720-726.

129. Курков, В.М. Методы учета систематических искажения аэроснимка. Самокалибровка. / В.М. Курков// "Известия вузов "Геодезия и аэрофотосъемка". -1980.-N6. – С.75-79.

130. Лазерная система XL-80 [Электронный ресурс] – URL: https://www.renishaw.ru/ru/xl-80-laser-system--8268 / (дата обращения: 03.02.2020)

131. Лазерные приборы для измерения объема сыпучих материалов [Электронный ресурс]. – URL: http://prin-spb.ru/index.php?route=product/category&path=92_93 / (дата обращения: 03.02.2020)
132. Лебедев, И.В. О некоторых свойствах систем плоских зеркал / И.В. Лебедев // Труды института физики и математики, АН БССР, Вып. 1. – 1956. 129 с.
133. Леонтьев, Г.В. Лазерный измеритель непрямолинейности – “лазерная струна” / Г.В. Леонтьев, Л.В. Пинаев, А.Г. Серегин // Оптический журнал”. – 2012. – 79, 10. – С. 52-57
134. Лобанов, А.Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов. 2-е издание, переработанное и дополненное / А.Н. Лобанов — Москва. – Недра. – 1984. – 652 с.
135. Лукьяница, А.А. Цифровая обработка видеоизображений / А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин // Методы вычитания фона. – Москва. - 2009. - С. 25 - 36.
136. Лысов, И.А. Оптический метод бесконтактного измерения малых линейных перемещений: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: по специальности 05.02.11 / И.А. Лысов – Санкт-Петербург. – СЗТУ. – 2006. – 170 с.
137. Махов, В. Построение систем технического зрения на базе компьютерных технологий / В. Махов, В. Широбоков, А. Закутаев // National Instruments Control Engineering. – Россия.– 2018. – №8. – С. 56-63.
138. Махов, В.Е. Автоматизированная система контроля линейных размеров в партии деталей / В.Е. Махов [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.labview.ru/solutions/228/item1584/ (дата обращения: 26.12.2017)
139. Махов, В.Е. Исследование границ изображения методом выделения контраста с использованием оптико-электронной системы Часть 1. Научно-методические принципы контроля границ изображения методом выделения контраста / В.Е. Махов, А.И. Потапов, С.Е. Шалдаев // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 10. – С. 44-51.

140. Махов, В.Е. Исследование границ изображения методом выделения контраста с использованием оптико-электронной системы. Часть 2. Экспериментальные модельные исследования границ изображения на основе вейвлет-преобразований / В.Е. Махов, А.И. Потапов, С.Е. Шалдаев // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 11. – С. 4-11.
141. Махов, В.Е. Контроль линейных размеров изделий на базе технологий фирмы “National Instruments” / В.Е. Махов // Известия ВУЗов. Приборостроение. –2010. – Т. 53, № 7. - С. 54-60
142. Медведев, А. Промышленные видеокамеры для систем машинного зрения / Медведев А.// Современные технологии автоматизации. – 2013. – № 4. – С. 26-30
143. Мерзликина, Н.В. Взаимозаменяемость и нормирование точности: учеб. пособие / Н.В. Мерзликина, В.С. Секацкий, В.А. Титов. – Красноярск: ИПЦ СФУ. – 2011. – 178 с.
144. Миф, Н.П. Модели и оценка погрешности измерений / Н.П. Миф. – Москва. - Изд-во стандартов. – 1976. – 144 с.
145. Мишкинд, С.И. Системы технического зрения для автоматизации машиностроительного производства / С.И. Мишкинд //Технология машиностроительного производства. – Москва. – НИИмаш. – 1982. - 88 с.
146. Набока, Е.В. Анализ погрешностей измерений на координатно-измерительных машинах / Е.В. Набока, В.В. Лысюк // Вестник НТУ «ХПИ». Технологии в машиностроении: сборник научных трудов. - 2010. - С 84-88.
147. Неизвестный, С.И. Приборы с зарядовой связью - основа современной телевизионной техники / С.И. Неизвестный, О.Ю. Никулин // Основные характеристики ПЗС. "Специальная техника". – 1999. – № 5 С. 44-51.
148. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник/ Клюев В.В.[и др]. – Москва. – Машиностроение. – 2005. - 657 с.

150. Никонов, А.В. К вопросу о влиянии вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами / А.В. Никонов // Вестник СГГА. - 2014. - Вып. 1 (25). - С. 12-26.
151. Обзор производителей оптических измерительных систем и их продукции: часть I [Электронный ресурс]. – URL: http://mastermodel.ru / articles / obzor-proizvoditeley-opticheskih-izmeritelnyh-sistem-i-ih-produkcii-chast-i загл. с экрана. (дата обращения: 05.03.2021)
152. Общая теория измерений: Учебное пособие / Под редакцией академика РАН Н. Н. Евтихиева. – Москва. – Горячая линия-Телеком. – 2007 - 176 с. :ISBN 5-93517-271-2
153. Общие методы и средства линейно-угловых измерений. – Москва. – Издательство стандартов. – 1981. – 215 с.
154. ОК 021-95 Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. Введен 1996-01-01. М.: Стандартинформ, 1996. – 10 с.
155. Определение точного объема сыпучего материала в кузове самосвала [Электронный ресурс]. – URL: https://samosval.info/stati-na-samosval-info/opredelenie-obema-sypuchego-materiala-v-kuzove.php/ (дата обращения: 03.02.2020)
156. Оптико-электронные приборы в контрольно-измерительной технике/ под. ред. Панкова Э.Д. , Порфирьева Л.Ф., Труды ЛИТМО. - Ленинград. – 1979. – 80 с.
157. Основы работы с Robotic Operating System [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/post/128024/ (дата обращения: 13.02.2020)
158. Панов, В.А. Справочник конструктора оптико-механических приборов/ Панов В.А., Кругер М.Я.; под редакцией В.А Панова. Издание 3-е – Ленинград. – «Машиностроение». – 1980. – 742 с.
159. Патент № 5724128 USA, G01B11/275 Measuring arrangements characterised by the use of optical means for measuring angles or tapers; for testing the alignment of axes for testing wheel alignment Daniel B. January, 1995-12-28.

160. Патент № DE102012202054A1 German G01B11/2755, Measuring arrangements characterised by the use of optical means for measuring angles or tapers; for testing the alignment of axes for testing wheel alignment using photoelectric detection means, 2012-02-10.
161. Патент RU 2 679 547 C1 Способ компенсации геометрического шума матричного фотоприемника. Автор патента: Сенин А. С. (RU) [Электронный ресурс] – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2679547C1_20190211 (дата обращения:. 13.03.2018.)
162. Патент RU2079810C1 Способ геодезических измерений объемных объектов по заданным световым маркам и устройство для его осуществления Авторы патента: Арефьев А.А. Здоркин Ю.П. [Электронный ресурс] – URL: http://www.findpatent.ru/patent/207/2079810.html / (дата обращения: 05.02.2020)
163. Патент US 0087241.23B2 Method and device forvehicle measurement, 2014-05-13.
164. Патент US 2014/0219509 A1 Device and method for measuring the characteristic angles and dimensions of wheels, steering system and chassis of vehicles in general, 2012-05-22.
165. Патент на полезную модель RUS 115463. Устройство автоматизированного детектирования пороков стекла, В.В. Булатов , И.И. Абакумов , **А.А. Кульчицкий**, В.А. Шабанов, А.К. Наумова , патент на полезную модель RUS 115463, заявка №2011141391 от 12.10.2011.
166. Патракеев, Н. LabVIEW 8 — новые возможности автоматизации проектирования контрольно- измерительных систем / Н. Патракеев, А. Потапов, В. Махов // Компоненты и технологии. 2007. No 2 (67).
167. Педь С.Е. Исследование методической погрешности координатных измерений геометрических параметров деталей машин / С.Е. Педь// Измерительная техника. – 2014. – С. 28-32.

168. Першин, В.А. Типаж и техническая эксплуатация оборудования для автосервисов. / В.А. Першин, А.Н. Ременцов, ЮГ. Сапронов, С.Г. Соловьев. – Ростов. – Феникс. – 2008. – 413 с.
169. Петешов, А.В. Методы и алгоритмы обработки изображений для автоматизированного контроля геометрических параметров объектов с неоднородной структурой поверхности: диссертация … кандидата технических наук: 05.11.16/ А.В. Петешов. - Тула. – 2006. – 136 с.
170. Петров, Д.Ю. Алгоритмическое обеспечение классификации точечных дефектов листового стекла / Д.Ю. Петров, В.П. Мешалкин, И.В. Ефимов, В.А. Иващенко // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 1-6
171. Петров, П.А. Программное обеспечение для мониторинга систем управления питанием высокоамперных электролизеров в производстве алюминия / П.А. Петров, Ю.В. Шариков, А.А. Власов, В.Ю. Бажин, **А.А. Кульчицкий** // Металлург. – 2016. – № 8. – С. 12-15.
172. ПИ-600ЦВ1 ПРОЕКТОР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ [Электронный ресурс]. – URL: https://npzoptics.ru/catalog/optiko-mehanicheskie_pribory/pi-600cv1/ (дата обращения: 07.01.2020)
173. Погарев, Г.В. Юстировка оптических приборов / Г.В. Погарев. – Ленинград. – Машиностроение, – 1968. -292 с.
174. Попов, С.Б. Использование структурированной подсветки в системах технического зрения / С.Б. Попов // Компьютерная оптика. – 2013. – том 37, № 2. – С. 233-238

175. Потапов, А.И. Анализ точности устройства контроля положения вращающейся плоскости / А.И. Потапов, **А.А. Кульчицкий**, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2018. – № 11. – С. 17-24. DOI: 10.1134/S0130308218110039

Potapov, A.I. Analyzing the accuracy of a device for controlling the position of a rotating plane / A.I. Potapov, **A.A. Kulchitskii**, Y.G. Smorodinskii // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – T. 54. № 11. – C. 757-764.DOI: 10.1134/S1061830918110086

176. Потапов, А.И. Контроль линейных размеров на базе смарт-камеры / А.И. Потапов, В.Е. Махов, Я.Г. Смородинский, Е.Я. Маневич// Дефектоскопия. – 2019. – № 7. – С. 37-45.

177. Потапов, А.И. Оценка погрешности системы контроля геометрии токопроводящих стержней для электролизеров с самообжигающимся анодом / А.И. Потапов, **А.А. Кульчицкий**, Я.Г. Смородинский, А.Г. Смирнов // Дефектоскопия. – 2020. – № 3. – С. 58-64. Potapov, A. I. Evaluating the Error of a System for Monitoring the Geometry of Anode Posts in Electrolytic Cells with Self-Baking Anode Russ / A.I. Potapov, **A.A. Kulchitskiy**, Y.G. Smorodinskii, A.G. Smirnov //J Nondestruct Test. – 2020. – 56. PP. 268–274.

178. Приборы и инструменты для измерения линейных и угловых размеров. – Москва. – ВНИИТЭМР. – 1992. – 68 с.

179. Программно-аппаратный комплекс измерения объёма сыпучего материала (ПАК ИО) [Электронный ресурс]. – URL: http://prin-spb.ru/index.php?route=product/product&path=92_93&product_id=115 / (дата обращения: 23.01.2019)

180. Производство алюминия. Пособие для мастеров и рабочих цехов электролиза алюминиевых заводов. – Санкт-Петербург. – Издательство Санкт-Петербургского университета. – 2007. – 126 с.

181. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: Перевод. с английского / У. Прэтт — Москва. – Мир. – 1982. — Кн. 2 — 480 с.
182. Пьей, С.В. Исследование зависимости погрешности измерения от параметров объекта и процесса измерения в сканирующих оптоэлектронных информационно-измерительных системах Специальность 05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении) (технические науки), диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / С.В. Пьей – Москва. – МГТУ «СТАНКИН». – 2020, 156 с.
183. Разин И.В. Автоматизированный комплекс анализа полутоновых изображений на основе принципов инвариантного их описания: диссертация … кандидата технических наук: 05.11.16 / И.В. Разин. – Санкт-Петербург. – 2003. – 192 с.
184. Разработка систем распознавания на основе Point Cloud Library [Электронный ресурс]. – URL: https://www.softreactor.ru/razrabotka-sistem-raspoznavaniya-na-osnove-point-cloud-library/ (дата обращения: 13.02.2020)
185. РМГ 64-2003 ГСИ Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. – Москва. - ИПК «Московский печатник». – 2004. - 18 с.
186. Руководящий документ: РД 2 БВ00-9-90. Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология [текст]. – Москва. – ВНИИизмерения. – 1990 – 28 с.
187. Руководящий документ: РД 50:48:0075.03.05 Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации надземных крановых путей. [Электронный ресурс]. – URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293847/4293847880.htm (дата обращения 24.08.2021 г.)
188. Румшиский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшиский. – Москва. – Наука. – 1971. - 192 с.

189. Сайт компании Riftek [Электронный ресурс]. – URL: https://riftek.com/ru (дата обращения 24.10.2020 г.)
190. Сарвин, А.А. Анализ влияния геометрических и кинематических параметров на форму траектории движения изображения точки в двух вращающихся зеркалах / А.А. Сарвин, **А.А. Кульчицкий**. – Москва. – Депонировано в ВИНИТИ № 1979 - В97, 1997
191. Сарвин, А.А. Исследование и разработка оптических базных приборов для измерения больших размеров в машиностроении, Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. / А.А. Сарвин – Ленинград. – СЗПИ. – 1971. – 20 с.
192. Сарвин, А.А. Исследование характерных особенностей оптико-электронных средств измерения расстояний / А.А. Сарвин, **А.А. Кульчицкий** (доклад) // Труды Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию вуза «Системы и процессы управления и обработки информации» в 2 ч. – Санкт-Петербург. – СЗТУ. – 2010. – С. 559–566.
193. Сарвин, А.А. Оптические и оптоэлектронные методы бесконтактных измерений геометрических параметров, диссертация на соискание ученой степени доктора. технических наук. 05.02.11 / А.А. Сарвин. - Санкт-Петербург. – СЗПИ. – 2002. – 346 с.
194. Сарвин, А.А. Оптические методы бесконтактных измерений линейных перемещений (монография) / А.А. Сарвин, **А.А. Кульчицкий**, А.К. Наумова - Санкт-Петербург. – Издательство СЗТУ – 2011. – 195 с.
195. Сарвин, А.А. Оптические функциональные преобразователи для измерительных устройств / А.А. Сарвин, И.А. Грейм // Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. Выпуск 6. – Ленинград. – Машиностроение. – 1972. - 320 с.

196. Сарвин, А.А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров / А.А. Сарвин. – Ленинград. – Издательство Ленинградского университета. – 1983. – 144с.
197. Сарвин, А.А., Контроль положения плоскости вращения / А.А. Сарвин, **А.А. Кульчицкий**, Л.И. Абакулина // IX научно-техническая конференция “Экстремальная робототехника”: Материалы конференции. - Санкт-Петербург. – Издательство СПбГТУ. – 1998 – С. 403-408
198. Свидетельство государственной о регистрации программы для ЭВМ RU 2015615743, 22.05.2015. Программа калибровки камер технического зрения для компенсации искажений оптического тракта Заявка № 2015612339 от 30.03.2015 / И.И. Абакумов, **А.А. Кульчицкий**, А.С. Швалёв, заявитель СПб Горный университет, 1 с.
199. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612948, Программа активного контроля положения плоской поверхности в пространстве, заявка № 2016610484 от 25 января 2016 г. / И.И. Абакумов, А.Ю. Важенин, **А.А. Кульчицкий**, заявитель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» - 1 с.
200. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615551, RU 2015615551, заявка № 2015612336 от 30.03.2015, Программа комплексной компенсации погрешностей оптико-электронных систем контроля геометрических параметров, опубл. 20.05.2015 / И.И. Абакумов, **А.А. Кульчицкий**, А.В. Бойков, заявитель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» - 1с.

201. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020665277, Российская Федерация, заявка № 2020664591 от 20.11.2020 г., Программа контроля размеров осесимметричных изделий с компенсацией перспективной ошибки одноканальной оптической системы, опубликовано 25.11.2020 г. / **А.А. Кульчицкий**, Д.А. Кашин, А.Г. Смирнов, заявитель Горный университет. – 1 с.
202. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611543, Российская Федерация, заявка № 2021610741 28.01.2021 г., Программа определения положения тест-объекта при калибровке оптической проекционной системы контроля осесимметричных изделий, / **А.А. Кульчицкий**, Д.А. Кашин, Н.А. Романова, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.02.2021 г. заявитель Горный университет. – 1 с.
203. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614999, RU 2018614999, заявка № 2018611955 от 28.02.2018 Определение размера брикета на ленте конвейера, опубликовано 23.04.2018, В.Ю. Бажин, Д.А. Кашин, **А.А. Кульчицкий**, заявитель Горный университет. – 1 с.
204. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615959, Российская Федерация, заявка № 2020615082 от 02.06.2020 г., Программа определения геометрических параметров брикетированных материалов на основе анализа их цифровых изображений, опубликовано 05.06.20 / Д.А. Кашин, **А.А. Кульчицкий**, Э.Р. Федорова, заявитель Горный университет. – 1 с.
205. Семенов, Д.М. Оптоэлектронные системы бесконтактного размерного контроля удаленных объектов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.13, Д.М. Семенов. – Санкт-Петербург. – СЗТУ. – 2010. – 150 с.
206. Семенцов, А.В. Разработка тест-объекта для калибровки цифровых камер / А.В. Семенцов //Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 7. С. 60-65.

207. Семин, М.С. Обзор решения прикладных задач с помощью систем технического зрения. Бесконтактное измерение объема круглых лесоматериалов./ М.С. Семин [Электронный ресурс]. – URL: http://videoscan.ru/page/718 / (дата обращения:31.03.2018)
208. Сивцов, Г.П. О преобразовании векторов оптической системой из четырех плоских зеркал / Г.П. Сивцов // ОМП. – 1979. – № 2, С. 16-18.
209. Сочивко, Е.П. Исследование зеркально-призменных систем и разработка основных положений для их юстировки: Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. / Е.П. Сочивко – Ленинград. – СЗПИ. – 1975. – 20 с.
210. Специальные приборы для линейно-угловых измерений. – Москва. – Издательство стандартов. - 1983. – 91 с.
211. Справочник. Вычислительная оптика; под общ. ред. М.М. Русинова.- Ленинград. – Машиностроение. - 1984. – 488 с.
212. Станочные датчики для привязки и измерения компонентов [Электронный ресурс]. – URL: https://www.renishaw.ru/ru/machine-tool-probes-for-component-setting-and-inspection--6075 (дата обращения 07.01.2020)
213. Стоечные КИМ серии Land [Электронный ресурс]. – URL: https://www.arttool.ru/catalog/equipment/kim-portalnogo-tipa/koodinatno-izmeritelnye-mashiny-stroechnogo-tipa-land/ (дата обращения 05.02.2021)
214. Телецентрическая оптика: повышение точности оптических измерений [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vitec.ru/znaniya/articles/povyshenie-tochnosti-opticheskikh-izmereniy/ (дата обращения 19.02.2018).
215. Телецентрические системы задней подсветки [Электронный ресурс] – URL: http://www.azimp.ru/edmund/telecentric-lenses/ (дата обращения: 08.03.2021)
216. Телецентрическое освещение [Электронный ресурс] – URL: https://visionmachines.ru/catalog/svet/nestrukturirovannyy_svet/podsvetka_optoengineering/teletsentricheskoe_osveshchenie/ (дата обращения: 08.03.2021)

217. Технические требования ФКГП 1000.00.000 Д2, ОАО «ПФ «КМТ». – 2001. – 3 с.
218. Технический контроль в машиностроении: Справочник проектировщика / Под общ. ред. В.Н. Чупырина, В.Н. Никифорова, - Москва. – Машиностроение. – 1987. - 512 с.
219. Тудоровский, А.И. Теория оптических приборов. т. 1, - 2-е изд. / А.И. Тудоровский. – Москва. – Издательство АН СССР. – 1948. - 661 с.
220. Турыгин, И.А. Прикладная оптика /Турыгин И.А.– Москва. - Машиностроение, ч. 1, 1965 г. – 362 с.; ч. II, – 1966. – 431 с.
221. Фёдоров, Е.М Методы и приборы оптического бесконтактного двухкоординатного контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства / Е.М. Фёдоров, А.Е. Гольдштейн, В.В. Редько // Ползуновский вестник. - 2010. - №2. - С. 141-149.
222. Фёдоров, Е.М. Вычисление геометрических параметров двухкоординатных измерителей диаметра протяженных изделий / Е.М. Фёдоров, А.А. Эдличко // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. № 2 – С. 18-21 – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/6927276 (дата обращения: 13.01.2019)
223. Фѐдоров, Е.М. Расчет диаметра в бесконтактных трёхкоординатных измерителях / Е.М. Фѐдоров, А.А. Коба // Ползуновский вестник. - 2016. - №4. - С. 88-93.
224. Фролов, Д.Н. Опыт разработки устройства бесконтактного измерения диаметра кабельных изделий // Д.Н. Фролов, А.Р. Свендровский, А.А. Гольцеймер, Ю.Г. Гладышев.- Электротехника. -1991. -№ 3. -С. 26-28. – URL: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2010_02/pdf/140fedorov.pdf (дата обращения: 01.04.2018)
225. Фрумкин, В.Д. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике / В.Д. Фрумкин, Н.А. Рубичев. – Москва. – Машиностроение. - 1987. - 168 с.

226. Харазов, А.М. Диагностическое обеспечение технического обслуживания и ремонта автомобилей / А.М. Харазов. – Москва. – Высшая школа. – 1990. - 208 с.
227. Чуриловский, В.Н. Теория оптических приборов / В.Н. Чуриловский. – Ленинград. – Машиностроение. – 1966. - 564 с.
228. Шальнов, Е. Алгоритм вычитания фона, основанный на поблочных классификаторах / Е. Шальнов, В. Кононов, В. Конушин // Материалы XXI международной конференции по компьютерной графике и мультимедии. 26-30 сентября 2011 г. / – Москва .– 2011. – С. 278.
229. Шарова, Е.А. Точные измерения углов /Е.А. Шарова – Москва. – Машиностроение. – 1970. – 40 с.
230. Эльдиб, И.С.А. Разработка методики совершенствования технологического процесса холодной штамповки изделий на основе оптического 3d-сканирования и численного моделирования, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением», / И. С. А. Эльдиб – Москва. – «Московский политехнический университет», – 2020. 173 с.
231. Этингоф, М.И. Приборы для линейных измерений / М.И. Этингоф. [Электронный ресурс]. - URL: http://dopusk.net/?page_id=1793 (дата обращения: 22.04.2019)
232. Якушенков, Ю.Г. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах / Ю.Г. Якушенков, В.Н. Луканцев, М.П. Колосов – Москва. – Радио и связь. – 1981.—180 с.
233. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчёт оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. / Ю.Г. Якушенков– Москва. – Логос. – 2004. – 514 с.
234. Bayram, A. Glass Surface Defects Detection with Wavelet, TransformsInternational / Akdemir Bayram, Öztürk Şaban // Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2015. –Vol. 3, No. 3, – pp. 170-173.

235 Bookstein, F.L. Principal Warps: Thin-platessplines and decomposition of deformations, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. –1989. – vol 11(6).– pp. 567-585.

236. Bosch FWA 9000. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.fwa9000.com/en/bosch-automotive-aftermarket (дата обращения: 22.04.2018)

237. Brown, D.C. Close-range camera calibration /Brown D. C. // Photogrammetric Engineering. – 1971. – 37(8):855–866.

238. Brown, D.C. Decentering Distortion of Lenses /Brown D. C. // Photogrammetric Engineering. – 1966. – No 5. – P. 444-462.

239. Brown, D.C. The Bandle adjustment - Progress and Prospects. ISP Symposium Commission 3. /Brown D. C. – Helsinki. – 1976. - 33 p.

240. Bullatov, V.V. Features of translucent materials and products defects detection with support of optical system / V.V. Bulllatov, **A.A. Kulchitskii** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – 1515. – 052007.

241. Busby, J. 3D Scanning Reflective Objects With Photogrammetry / J. Busby [Электронный ресурс]. – URL: http://www.3dscanstore.com/index.php?route=journal2/blog/post&journal_blog_post_id=19. (дата обращения: 11.05.2020).

242. Ebner H. Self calibrating block adjustment. / H.Ebner // ISP Symposium Commission 3. Helsinki, 1976. – 17 p.

243. Fitzgibbon, A.W. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion / A.W. Fitzgibbon// Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). (2001). IEEE. doi:10.1109/CVPR.2001.990465.

244. Francesco, A. An automated visual inspection system for the glass industry / A.Francesco, F. Attivissimo, A. Di Nisio, M. Savino //16th IMEKO TC4 Symposium Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements Sept. – Italy. – Florence. - 2008. –22-24.

245. Groth, Samuel R Glass Defect Detection Techniques using Digital Image Processing –A Review / Samuel R Groth, Ren Zhongfei // International Journal of Digital Application & Contemporary research Website: www.ijdacr.com (Volume 1, Issue 10, May 2013).

246. Hexagon Absolute Arm SI с внутренним сканером, RS6 [Электронный ресурс]. - URL: https://gfk-hexagon.ru/products/romer_abs_arm_si (дата обращения: 07.01.2020).

247. Industrial Cameras, Technical Features, and Market [Электронный ресурс]. - URL: https://industryeurope.com/industrial-cameras-technical-features-and-market/ (дата обращения: 14.03.2020).

248. **Kul'chitskii, A.A.** The choice of a method for non-contact assessment of the composition of briquetted charge materials / A.A. Kul'chitskii, D.A. Kashin // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1399, Engineering and Materials Science, 2019, 044108, doi:10.1088/1742-6596/1399/4/044108.

249. **Kulchitskii A.** Optical inspection of solids of revolution by means of non-telecentric optics / A. Kulchitskii, E. Fedorova // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – November 2019. – 378:012062. - DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012062

250. **Kulchitskii, A.A.** Reduction of Measurement Error of Axisymmetric Parts With an Optical System / A.A.Kulchitskii, A.A. Zubareva// Lecture Notes in Networks and Systems XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021": Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, - 2021. – vol 246. Springer, Cham. pp. 788-796 – https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_88

251. Lanman, D. Surround structured lighting: 3-D scanning with orthographic illumination / D.Lanman, D.Crispell, G. Taubin// Computer Vision and Image Understanding. – 2009 – Vol. 113, № 11 – P. 1107-1117.

252. Laser illumination [Электронный ресурс]. - URL: https://www.vision-doctor.com/en/laser-illumination.html (дата обращения: 08.03.2021)

253. Laser StingRay Structured Light Pattern Generating [Электронный ресурс]. – URL: http://www.mkoi.org/files/coherent/datasheets/StingRay_DS_0213_3.pdf (дата обращения: 08.03.2021)
254. M2 – M3 Measuring big shafts as easily as small ones [Электронный ресурс]. - URL: https://www.vicivision.com/optical-measuring-machines-for-turned-parts/non-contact-measuring-systems-for-shafts/ (дата обращения: 07.01.2020)
255. Martin, Jacob A. Estimating index of refraction from polarimetrichyperspectral imaging measurements / Martin, Jacob A.; Gross, Kevin C.// Optics Express. – 2016. – 24(16). - 17928-17940
256. Maying, F. Optical measurement: techniques and application/ Franz Mayinger (editor), Springer-Verlag, Berlin. – 1994. - 464 p.
257. NI Vision for LabVIEW Basics, June 2014, 371007H-01
258. NI Vision Concepts Help, August 2012, 372916M-01
259. Novak, M.D. High-temperature materials testing with full-field strain measurement: Experimental design and practice / M.D.Novak, F.W. Zok // Rev. Sci. Instrum. – 2011. – 82. – 115101
260. OpenCV [Электронный ресурс]. - URL: https://opencv.org/ (дата обращения:13.02.2020)
261. OpenCV шаг за шагом [Электронный ресурс]. – URL: http://robocraft.ru/page/opencv/ (дата обращения:13.02.2020)
262. Optics Error-free depiction of the field of view [Электронный ресурс]. – URL: https://www.vision-doctor.com/en/optical-basics/lens-mount-and-flange-back.html / (дата обращения:30.03.2019)
263. Pratt, W. Digital Color Image Coding and Transmission / W.Pratt // University of Southern California, Electronic Sciences Laboratory, USCEE Report 403, June 1971.

264. PRECITEC LR. Optical sensor for ultra-precision surfaces [Электронный ресурс]. - URL: https://pvp-snk.ru/image/data/01Aicon/01kontrolno-izm-machini/05datchiki-kim/04opticheskie-izmer-golovki/04PRECITEC/PRECITEC.pdf (дата обращения:08.03.2021)
265. Renishaw XL80 сравнение с Lasertex-Lasos LL10 [Электронный ресурс]. - URL: https://interferometer.ru/konkurenti// (дата обращения:03.02.2020)
266. Rocco Furferi, Lapo Governi, Yary Volpe, Monica Carfagni Design and Assessment of a Machine Vision System for Automatic Vehicle Wheel Alignment Int J Adv Robotic Sy, 2013, V. 10, 242:2013. [Электронный ресурс]. - URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/44640/InTech-Design_and_assessment_of_a_machine_vision_system_for_automatic_vehicle_wheel_alignment.pdf (дата обращения: 24.07.2018)
267. ROMER Absolute Arm (SE) [Электронный ресурс]. - URL: https://www.gfk-leica.ru/katalog/promyshlennye_izmereniia_i_metrologiia/portativnye_izmeritelnye_ryki/romer_absolute_arm_se/ (дата обращения:08.03.2021)
268. Ronald Muller FRAMOS market survey [Электронный ресурс]. - URL: https://www.framos.com/en/news/framos-launches-embedded-vision-ecosystem-of-sensor-modules-and-adapters/ (дата обращения: 05.02.2020)
269. ROS [Электронный ресурс]. - URL: https://www.ros.org. / (дата обращения: 13.02.2020)
270. Rusinkiewicz, S. Real-time 3D model acquisition / S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, M. Levoy // ACM Transactions on Graphics. – 2002 – Vol. 21, № 3 – PP. 438-446.
271. Salvi, J. A State of the Art in Structured Light Patterns for Surface Profilometry / J. Salvi , S.Fernandez, T. Pribanic, X.Llado// Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 43. – No. 8. – PP. 2666–2680.
272. Salvi, J. Pattern codification strategies in structured light systems / J. Salvi, J.i Pages, J. Batlle. // Pattern Recognition 37. – 2004. – PP. 827–848.

273. Seitz, S.M. View Morphing / S.M. Seitz, C.R. Dyer // Proc. SIGRAPH 96, in Computer Graphics, 1996, pp. 21-30. [Электронный ресурс]. - URL: https://www.researchgate.net/publication/2314467_View_Morphing (дата обращения: 07.03.2020)
274. Stand alone presetter E68LA IS [Электронный ресурс]. - URL: https://www.elbocontrolli.com/Products/Larth/larth_gb.pdf. (дата обращения: 07.01.2020)
275. Sturm, P.F. On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications / P.F.Sturm, S.J.Maybank // CVPR99. – 1999. – PP. 432–437.
276. Surkov, I.V. Development of methods and means of coordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments / I.V. Surkov // Measurement Techniques: Volume 54, Issue 7 (2011), Page 758-763.
277. Tan, Q. A Model of Diameter Measurement Based on the Machine Vision. / Q. Tan, Y. Kou, J. Miao, S. Liu, B. Chai // Symmetry 2021, 13, 187. https://doi.org/10.3390/sym13020187 [Электронный ресурс]. - URL: https://www.researchgate.net/publication/348775992_A_Model_of_Diameter_Measurement_Based_on_the_Machine_Vision (дата обращения: 18.03.2020)
278. Telecentric lenses tutorial [Электронный ресурс]. - URL: //https://www.opto-e.com/resources/telecentric-lenses-tutorial (дата обращения:22.09.2020).
279. Tribhuwan, S. Detection of Defects in Glass Sheet using C.S.C based Segmentation Method / Singh Tribhuwan, Rajeshwar Lal Dua, Sunil Agrawal, Abhishek Achary// International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 68– No.14, April 2013, pp. 29-32, 2013.

280. Tsai, R.Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses / R.Y.Tsai // IEEE Int. Journal on Robotics and Automation. – 1987. – Vol. 3. – P. 323–344. PCL [Электронный ресурс] – URL: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/Tsai.pdf (дата обращения: 18.03.2020)

281. What is PCL [Электронный ресурс] – URL: http://www.pointclouds.org/about/ (дата обращения: 13.02.2020)

282. Yaryshev, S.N., Konyakhin, I.A., Timofeev, A.N., Korotaev, V.V., Djamiykov, T.S. Universal Optoelectronic Measuring Modules in Advanced Distributed Measuring Systems//XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), 2020, pp. 9238198

283 Zhang, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration / Z. Zhang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22 (11). – P. 1330–1334. 5 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration (дата обращения: 18.03.2020)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в АО "Энертек"

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Кульчицкого Александра Александровича
«Оптический контроль изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением», представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Настоящим актом подтверждается использование следующих результатов диссертационного исследования Кульчицкого Александра Александровича «Оптический контроль изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением»: методики компенсации систематических проекционных погрешностей определения основных формообразующих размеров осесимметричных деталей системами оптического контроля геометрических параметров, реализующих геометрический метод с пространственным разрешением по изображениям их сечений, при применении цифровых камер с объективами с фиксированным фокусным расстоянием.

Результаты использовались 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.

Генеральный директор		Авакуев С.Н.
(должность руководителя организации)	(подпись)	(ФИО)

дата 10.09.21 М.П.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ»

STC ENERGOAVTOMATIZATSIYA, LLC
Salavat Yulaev Prospect, 58
Ufa, Republic Bashkortostan, 450071
e-mail:info@ntcea.ru, www.ntcea.ru
tel.:+7 (347) 286-16-84
ITN 7801300320, KPP027601001

ЭНЕРГО АВТОМАТИЗАЦИЯ

ООО «НТЦ «ЭНЕРГОАВТОМАТИЗАЦИЯ»
450071, Республика Башкортостан, г. Уфа
Проспект Салавата Юлаева, 58, офис 401
e-mail:info@ntcea.ru, www.ntcea.ru
тел.:+7 (347) 286-16-84
ИНН 7801300320, КПП027601001

АКТ
о внедрении результатов диссертационного исследования
Кульчицкого Александра Александровича
«Оптический контроль изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением»,
представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Настоящим актом подтверждается использование следующих результатов диссертационного исследования Кульчицкого Александра Александровича «Оптический контроль изделий и технологического оборудования геометрическим методом с пространственным разрешением»: 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 компенсации субъективных погрешностей установки измерительного преобразователя. Основанием для использования является Распоряжение по Обществу (№34-05/2021 от 31.05.2021 г. «О рассмотрении возможности применения и проведения опытной эксплуатации системы машинного зрения при реализации автоматизированных систем диагностики и мониторинга роторного оборудования»). Результаты работ 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.

Технический директор _____ Зеленов А.С.
(должность руководителя организации) *(подпись)* *(ФИО)*

31.08.2021 М.П.