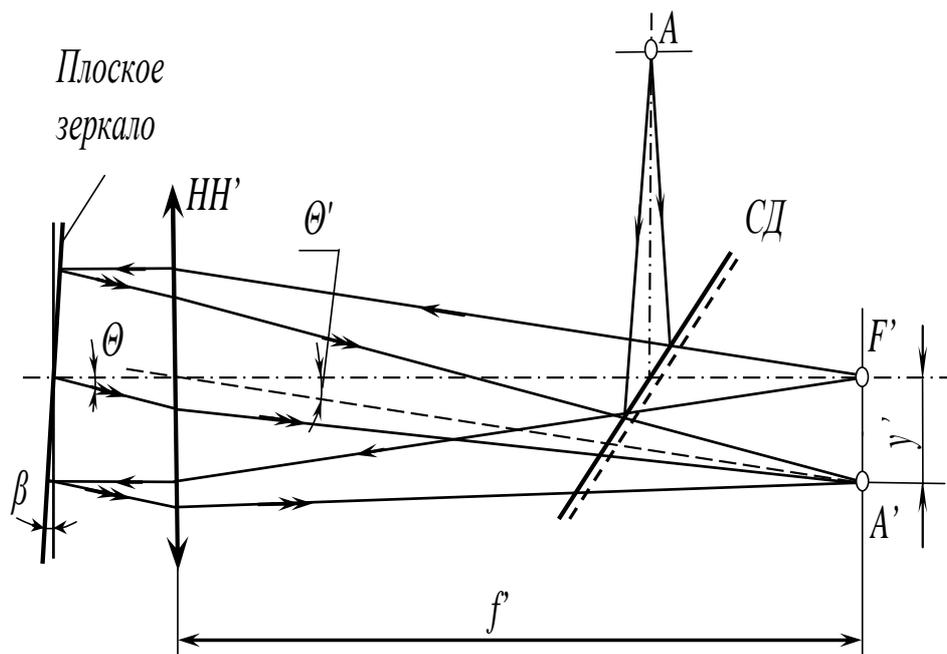


И.А. Коняхин, Т.В. Тургалиева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
(УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
АВТОКОЛЛИМАТОРЫ)



Санкт-Петербург
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

И.А. Коняхин, Т.В. Тургалиева
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
(УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
АВТОКОЛЛИМАТОРЫ)

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлению подготовки 12.04.02 Опотехника, по
специальности 12.05.01

в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры, специалитета

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2019

Коняхин И.А., Тургалиева Т.В. Экспериментальное исследование информационно-измерительных оптико-электронных систем (углоизмерительные автоколлиматоры)– СПб: Университет ИТМО, 2019. – 64 с.

Рецензент(ы):

Лукьянов Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

На примере углоизмерительных автоколлиматоров рассматриваются основные методики экспериментального определения основных метрологических параметров и характеристики оптико-электронных информационно-измерительных систем: статической характеристики, погрешности и диапазона измерения. Анализируются алгоритмы измерения углов поворота объекта с помощью автоколлиматоров. Приводятся методики обработки данных эксперимента. Излагаются основные приёмы автоматизированного управления специализированным контрольно-измерительным стендом, реализованные в пакете прикладных программ LabView.

Пособие предназначено для использования при выполнении лабораторных работ и научно-исследовательских работ по программе подготовки магистров по направлению 12.04.02 Опотехника и специалистов по специальности 12.05.01 Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Коняхин И.А., Тургалиева Т.В., 2019

Содержание

Содержание	3
Введение	5
1 Измерение углов поворота объекта автоколлимационным методом	7
1.1 Структура автоколлиматора	7
1.2 Серийные автоколлиматоры	8
Контрольные вопросы	9
2 Аналитическая модель измерения поворота объекта с помощью трёхкоординатного автоколлиматора	10
2.1 Системы координат при угловых измерениях	10
2.2 Выражение для орта отражённого пучка. Обобщённый алгоритм трёхкоординатных измерений	12
2.3 Трёхкоординатные измерения с использованием контрольного элемента на основе тетраэдрического отражателя	13
2.4 Трёхкоординатный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания	17
Контрольные вопросы	20
3 Структурная схема исследуемого трёхкоординатного автоколлиматора....	21
Контрольные вопросы	23
4 Материальное обеспечение лабораторных работ по экспериментальному исследованию оптико-электронного автоколлиматора	24
4.1 Стенд для исследования оптико-электронного автоколлиматора при измерении коллимационных углов	24
4.2 Стенд для исследования оптико-электронного автоколлиматора при измерении угла скручивания	30
4.3 Стенд для исследования трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора	32
5 Описание программного обеспечения экспериментальных исследований оптико-электронного автоколлиматора	33
Контрольные вопросы по разделам 4 и 5	36
6 Методика проведения экспериментальных исследований при выполнении лабораторных работ	37
6.1 Последовательность выполнения лабораторной работы «Исследование оптико-электронного автоколлиматора при измерении коллимационных углов»	37
6.2 Последовательность выполнения лабораторной работы «Исследование оптико-электронного автоколлиматора при измерении угла скручивания»	45
6.3 Методика выполнения лабораторной работы «Исследование трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора»	47
Контрольные вопросы	47

7	Обработка экспериментальных данных. Анализ результатов эксперимента и оформление отчёта	48
	Заключение	50
	Пример выполнения отчета по лабораторной работе	51
	Список использованной литературы.....	62

Введение

Информационно-измерительные оптико-электронные и лазерные системы широко используются для высокоточного размерного контроля и мониторинга состояния объектов. Универсальность таких систем и реализуемых ими методов измерений позволяет проводить размерный контроль объектов любого размера и получать полный объем информации для анализа геометрии изготавливаемых изделий в различных отраслях промышленности, энергетики, строительной индустрии.

Работа рассматриваемых информационно-измерительных систем базируется на принципе координатной метрологии, в соответствии с которым оптико-электронным приёмным каналом системы определяются линейные и угловые перемещения специальных контрольных элементов, установленных в определённых точках объекта, или пространственные координаты их текущего положения. В ряде систем контрольным элементом является малая область поверхности самого объекта, подсвечиваемая с помощью излучающего канала измерительной системы.

Значительным подклассом информационно-измерительных систем являются углоизмерительные автоколлиматоры, отличительной особенностью которых является отсутствие электрических связей с объектом, на котором устанавливается контрольный элемент в виде малогабаритного отражателя.

Оптико-электронный автоколлиматор представляет собой углоизмерительную систему, в состав которой входят оптические, оптоэлектронные, микропроцессорные и электромеханические функциональные блоки. Аналитическое и экспериментальное исследование этапов последовательной обработки информации функциональными блоками, алгоритмов трёхкоординатных измерений, определение соотношений между их основными параметрами позволяет практически изучить системотехнический подход к проектированию современных устройств оптоэлектроники.

Настоящее пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 12.04.02 «Оптоэлектроника» по программе магистратуры «Прикладная оптика» (дисциплина «Системное проектирование оптико-электронных приборов и систем»), специалистов по направлению 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» (дисциплина «Аналитика и исследование оптико-электронных приборов») по направлению 12.04.02 «Оптоэлектроника», специализация «Оптико-электронные приборы и системы» (дисциплина «Основы проектирования оптико-электронных приборов и систем»).

В пособии кратко рассмотрены принципы построения автоколлимационных углоизмерительных систем, проанализированы

особенности формирования рабочих световых пучков различными отражательными элементами, подробно рассмотрены алгоритмы измерения углов поворота. Особое внимание уделяется изучению методик экспериментального определения основных параметров информационно-измерительных систем: функционала статической характеристики, оценки погрешности измерения в заданном диапазоне углов, определения взаимного влияния измеряемых угловых координат. В процессе выполнения лабораторных работ обучающиеся на практике осваивают эти методики, используя современные аппаратно-программные комплексы, реализованные в технологии LabView.

Практические методики экспериментального исследования рассматриваются в трёх лабораторных работах:

1. Исследование двухкоординатного оптико-электронного автоколлиматора для измерения коллимационных углов
2. Исследование оптико-электронного автоколлиматора для измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью.
3. Исследование трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора, для измерения угловых координат объекта (двух коллимационных углов и угла скручивания)

Объём каждой лабораторной работы – 8 часов. При этом 2 часа отводится на изучение основных теоретических положений, 4 часа – на настройку блоков экспериментальной установки и 2 часа - на анализ и обработку результатов измерений. Оформление отчёта предполагается за время, отведённое на самостоятельную работу.

В пособии по всем трём лабораторным работам приводится теория функционирования исследуемой системы, указана цель исследований, задачи, которые необходимо решить в результате, подробно указаны практические шаги выполнения методики исследований, а также приводятся контрольные вопросы для самопроверки.

Контроль знаний предполагает оформление студентом отчета в соответствии с требованиями, изложенными в Приложении к настоящему пособию, а также его защиту преподавателю, включающую развернутые ответы на вопросы для самопроверки. Целью защиты является контроль приобретенных студентом компетенций, предусмотренных направлениями подготовки и формируемых в рамках осваиваемой дисциплины (модуля), включая уровень достижения студентом конкретных результатов обучения (умений, навыков). При необходимости, в ходе подготовки к защите отчета студенту может потребоваться изучение дополнительной литературы, список которой приведен в конце настоящего пособия, а также литературы, рекомендованной преподавателем.

1 Измерение углов поворота объекта автоколлимационным методом

1.1 Структура автоколлиматора

В соответствии с автоколлимационным принципом измерений на объекте, поворот которого нужно определить, располагается отражатель – обычно, плоское зеркало (Рисунок 1.1).

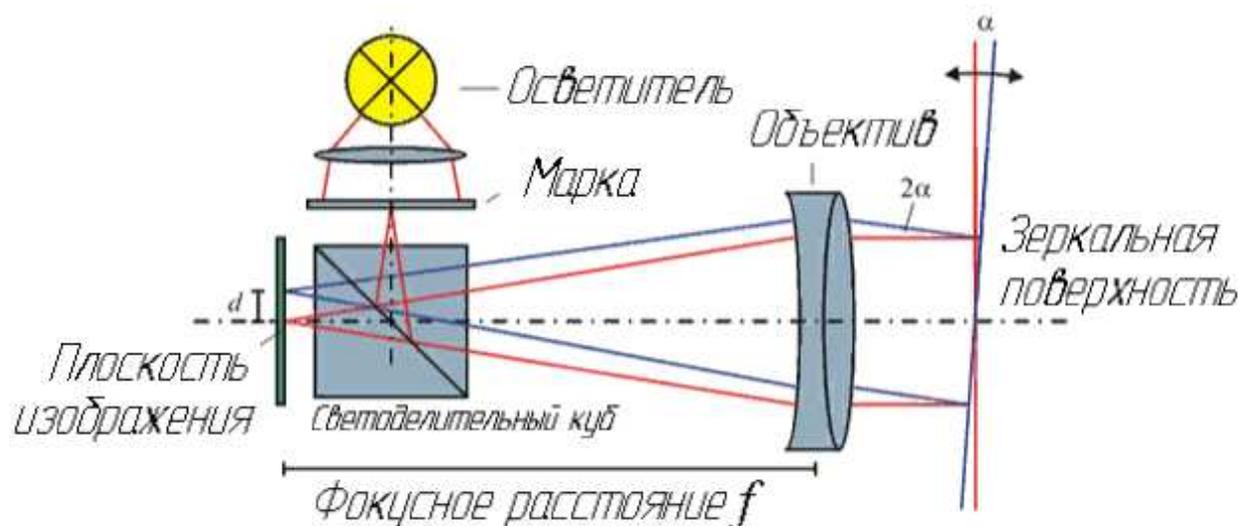


Рисунок 1.1 – Структура автоколлиматора

На неподвижной жёсткой базе располагается собственно автоколлиматор, в состав которого входит излучающий канал, объектив и приёмная система. Совмещение осей излучающего канала и приёмной системы с осью Объектива реализуется Светоделительным кубом с полупрозрачным покрытием, нанесённым на диагональную плоскость. Осветитель с помощью Конденсора подсвечивает Марку излучающего канала, которая располагается в фокальной плоскости Объектива. Излучение Марки формируется Объективом в параллельный пучок лучей, падающий на Зеркальную поверхность отражателя. При отсутствии углов поворота объекта нормаль к Зеркальной поверхности параллельна оптической оси Объектива и, следовательно, после отражения параллельный пучок сформирует изображение Марки в центре Плоскости изображения.

В случае поворота контролируемого объекта на угол α относительно оси, перпендикулярной оптической оси объектива, Зеркальная поверхность поворачивается на тот же угол α , что приводит к отклонению оси отражённого пучка относительно исходного направления на угол $2 \cdot \alpha$. Такое отклонение пучка вызывает смещение изображения Марки на величину d , определяемую выражением:

$$d = \operatorname{tg}(2 \cdot \alpha) \cdot f, \quad (1.1)$$

где f - фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

При малых углах поворота возможно использование приближения $\operatorname{tg}(2 \cdot \alpha) \approx \alpha$ (погрешность приближения не более 1 угл. сек. при величине α до 41 угл. мин.), что позволяет упростить выражение (1.1):

$$d = 2 \cdot \alpha \cdot f . \quad (1.2)$$

Плоскость изображения совмещена с чувствительной площадкой анализатора автоколлиматора (на рисунке не указан) – сеткой с окуляром (в случае визуального автоколлиматора) или фотоприёмной матрицей (ПЗС или КМОП) с микропроцессорной системой обработки видеок кадров. Анализатор автоколлиматора измеряет перемещение d в плоскости анализа, после чего по выражениям (1.1) или (1.2) вычисляется измеряемый угол α поворота объекта.

1.2 Серийные автоколлиматоры

Оптико-электронные автоколлиматоры (АК) выпускаются многими предприятиями и фирмами, наиболее крупными из которых являются Trioptics (Германия), Оптротех (Россия), Taylor Hobson (США), Möller-Wedel (Германия). Серийные АК снабжены специальным программным обеспечением для проведения измерений и обработки результатов, при работе приборы подключаются к персональному компьютеру или ноутбуку (ПК).

В частности, фирма Trioptics выпускает 5 серий автоколлиматоров для решения различных задач, при этом модельный ряд каждой серии включает 4-5 приборов, различающихся диапазонами измерения и погрешностью измерения [1], (Рисунок 1.2).

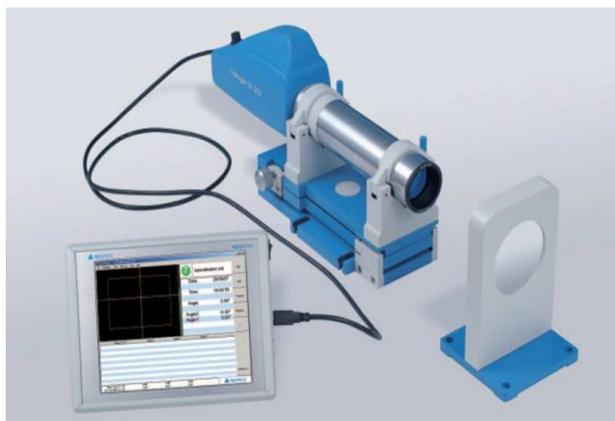


Рисунок 1.2 – Автоколлиматор TriAngle® TA100-38 (Универсальная серия)

Санкт-Петербургская компания Оптротех выпускает две серии АК: серию «15» для измерений в научных и метрологических лабораториях и, соответственно, серию «12» для работы в цеховых и заводских условиях [2]. (Рисунок 1.3).

Фирмы Möller-Wedel (Германия) и Taylor Hobson (США) производят

универсальные АК с повышенной устойчивостью к влиянию внешних факторов, что позволяет их использовать как в лабораторных, так и цеховых условиях [3],[4].



Рисунок 1.3 – Автоколлиматор Оптро-АК-015 (серия «15»)

В Таблице 1.1 приведены параметры некоторых серийных АК.

Таблица 1.1 – Параметры серийных автоколлиматоров

Фирма-производитель	Оптротех, Россия	TRIOPTICS, Германия	Taylor Hobson, США	Möller-Wedel, Германия
Модель	ОПТРО АК-015	TriAngle® TA 150-38	Ultra	ELCOMAT 300
Диапазон измерения, угл. мин.	±4	73×54	30×30	±4
Погрешность измерения, угл. сек.	0,05	1,7	0,2	0,1
Фокусное расстояние объектива, мм	1000	150	30	300
Рабочая дистанция, м	до 10	1,5	5	до 15
Габариты, мм	530×160×160	320×155×220	420×95×105	420×95×135

Особенностью всех серийных АК является двухкоординатный режим работы, в соответствии с которым выполняется измерение угла поворота объекта относительно одной или двух осей, перпендикулярных оптической оси объектива. Такие АК проектируются по отработанным методикам, их параметры и метрологические возможности хорошо изучены.

В настоящее время наибольший интерес для исследования представляет новый класс АК - трёхкоординатные автоколлиматоры, позволяющие измерить углы пространственного поворота объекта.

Контрольные вопросы

1. В чем преимущество автоколлимационных систем перед контактными датчиками измерения угла наклона или угломерами активного типа с излучающими метками в контрольных точках?

3. Каким параметром оптической системы в значительной степени определяется погрешность измерения автоколлиматора ?

4. Какой параметр серийного автоколлиматора ограничивает габариты контролируемого объекта величиной 10–20 метров ?

2 Аналитическая модель измерения поворота объекта с помощью трёхкоординатного автоколлиматора

2.1 Системы координат при угловых измерениях

Эффективность решения многих метрологических задач, связанных с угловыми измерениями возрастает, при использовании трёхкоординатных оптико-электронных автоколлиматоров, позволяющих контролировать положение объекта относительно трёх осей, две из которых перпендикулярны оптической оси автоколлиматора (коллимационные оси), а третья параллельна оптической оси автоколлиматора (оси скручивания), т.е. контролировать поворот объекта относительно трех взаимно-перпендикулярных осей.

Структура таких трёхкоординатных оптико-электронных автоколлиматоров включает собственно автоколлиматор поз. 1 (рисунок 2.1), установленный на некотором базовом объекте, а также пассивную отражающую оптическую систему – контрольный элемент (КЭ) поз. 2, связанный с объектом, пространственное положение которого контролируется [5, 6].

Если с базовым объектом связать неподвижную систему координат XYZ , а с контролируемым объектом – систему $X_1Y_1Z_1$, то пространственное угловое положение контролируемого объекта определяется тремя угловыми координатами – углами Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 поворота системы координат $X_1Y_1Z_1$ (рисунок 2.1).

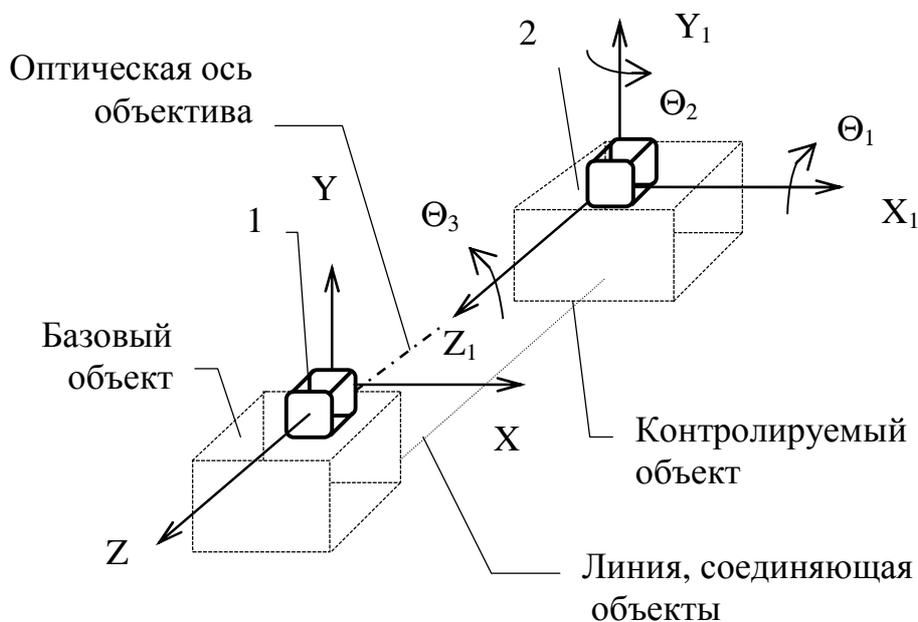


Рисунок 2.1 – Системы координат при трёхкоординатных измерениях

Измерение трёх угловых координат требуется при выполнении многих измерительных задач [6,7], в частности, можно указать:

– определение угловых деформаций натуральных образцов и специальных моделей при испытаниях новых материалов и изделий, выполнении производственных операций по обработке крупногабаритных деталей;

– измерение угловых деформаций оснований, опорных плит, несущих элементов и направляющих крупногабаритных производственных установок и приборных комплексов для уменьшения погрешностей их функционирования;

– контроль точности сопряжения и взаимного расположения частей и блоков в процессе монтажа и при работе в технологическом режиме для оборудования и агрегатов в строительстве, энергетике, промышленных производствах, машиностроении и приборостроении; например, необходим контроль установки по углу ферм, стеновых панелей, технологического оборудования, определение ориентации осей подкрановых балок и путей, измерения непрямолинейности направляющих станков, цеховых кранов;

– измерение взаимного углового положения рабочего органа и детали в процессе обработки, при испытаниях робототехнических систем, монтаже авиационных и корабельных стапелей, координатных стендов и т.д.;

– оперативный контроль деформаций и прогибов нагруженных элементов промышленных и жилых сооружений: нефте- и газопроводов, фундаментов реакторов, пролетов мостов, плотин, стенок доков, резервуаров с целью мониторинга их состояния и повышения надежности и безопасности функционирования;

– контроль оптических и радиотелескопов с составными отражающими элементами, взаимное пространственное положение которых контролируется как на этапе начальной юстировки, так и в процессе функционирования;

– контроль углового положения частей и блоков систем навигации и ориентации крупногабаритных космических аппаратов (орбитальных станций), отсчетные базы которых требуют взаимной привязки и согласования в масштабе реального времени. В частности, необходимы измерения угловых уходов гиролатформ, солнечных и звездных датчиков, учет разворота оптических элементов в перископах и системах передачи направления на горизонты горных выработок;

– контроль элементов распределенных сетей контрольно-измерительных датчиков (деформации, температуры, вибрации, полей и т.д.) различного назначения, достоверность результатов работы которых во многом определяется неизменностью взаимного пространственного положения элементов их базирования.

– в машиностроении, самолетостроении – метрологическое

обеспечение сборки крупных конструкций: самолетов, конвейерных линий;

– в энергетике – контроль плит фундаментов реакторов, составных турбоагрегатов атомных и гидроэлектростанций.

2.2 Выражение для орта отражённого пучка. Обобщённый алгоритм трёхкоординатных измерений

Общий алгоритм автоколлимационного измерения угловой ориентации может быть найден из выражения для орта \mathbf{B} отражённого пучка [6]:

$$\mathbf{B}_1(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) = M_r(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot M_{d1} \cdot M_r^{-1}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot \mathbf{A}, \quad (2.1)$$

где \mathbf{A} – орт падающего на КЭ пучка, M_{d1} – матрица отражения, определяющая КЭ в системе координат $X_1Y_1Z_1$, связанной с контролируемым объектом; $M_r(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3)$ и $M_r^{-1}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3)$ – матрицы поворотов, определяющие соответственно преобразование координат из системы $X_1Y_1Z_1$ в систему XYZ и обратно - из системы $X_1Y_1Z_1$ в систему XYZ . Эти матрицы прямого и обратного преобразований операторов являются функциями измеряемых углов $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$. Орты \mathbf{A} и \mathbf{B} падающего и отражённого пучков определены в системе координат XYZ , связанной с базовым объектом.

Орт отражённого пучка \mathbf{B}_1 может быть записан в виде однострочковой матрицы своих координат по осям системы XYZ :

$$B_1(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) = \begin{pmatrix} B_{1x}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \\ B_{1y}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \\ B_{1z}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

При малых углах поворота смещения x_1, y_1 изображения марки в плоскости изображения определяют по выражениям, аналогичным (1.2):

$$x_1 = B_{1x}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot f, \quad (2.3)$$

$$y_1 = B_{1y}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot f, \quad (2.4)$$

где f – фокусное расстояние объектива АК.

Смещения x_1, y_1 изображения марки измеряются анализатором АК, после чего микропроцессорная система по уравнениям (2.3) и (2.4) при известных параметрах f и матрице отражения M_{d1} вычисляет измеряемые углы.

Очевидно, двух указанных уравнений недостаточно для определения трёх угловых поворотов $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$, что определяет необходимость использования при трёхкоординатных измерениях двух отражающих контрольных элементов с матрицами отражения M_{d1} и M_{d2} , каждый из которых независимо формирует отдельный отражённый пучок,

соответственно, с ортами \mathbf{V}_1 и \mathbf{V}_2 . В результате на анализаторе АК формируются два изображения марки, при этом смещения x_2, y_2 второго изображения после измерения дают два дополнительных уравнения:

$$x_2 = B_{2x}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot f, \quad (2.5)$$

$$y_2 = B_{2y}(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot f, \quad (2.6)$$

которые с уравнениями (2.4), (2.3) образуют систему (точнее, три уравнения из четырёх), корнями которой являются три измеряемых угла $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$.

Выражение для матрицы \mathbf{M}_r поворотов определяется формулой (14.10-26) из [8] после переобозначения в нём углов $\nu = \Theta_1, \psi = \Theta_2, \varphi = \Theta_3$. При малых углах поворота выражение (14.10-26) приводится к виду:

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} 1 & -\Theta_3 & \Theta_2 \\ \Theta_3 & 1 & -\Theta_1 \\ -\Theta_2 & \Theta_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

при этом погрешность определения величин $\mathbf{V}_x, \mathbf{V}_y$ координат ортов отражённых лучей не превосходит 1 угл. сек при углах поворота $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ до 38 угл. мин. .

2.3 Трёхкоординатные измерения с использованием контрольного элемента на основе тетраэдрического отражателя

Контрольный элемент для трёхкоординатных измерений представляет собой стеклянный тетраэдр, углы между гранями которого имеют малые отступления от 90° [9, 10]. В этом случае тетраэдрический отражатель (ТО) уже не является «идеальным» ретрорефлектором (угловым отражателем) и представляет собой контрольный элемент, функционально состоящий из двух отражателей, формирующих две группы отражённых пучков.

Одна группа образована пучком с ортом \mathbf{V}_1 , отражённым от первого отражателя - фронтальной грани стеклянного тетраэдра как от автоколлимационного зеркала (поток излучения отражённого пучка составляет примерно 6% от потока падающего на КЭ пучка) – Рисунок 2.2.

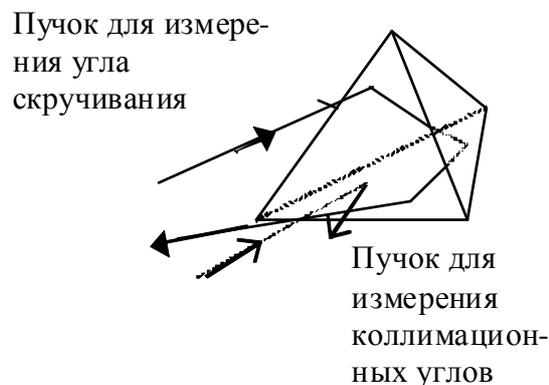


Рисунок 2.2 – Структура тетраэдрического отражателя

Изображение, сформированное этим пучком, используется для измерения коллимационных углов Θ_1, Θ_2 .

Перед началом измерений фронтальная грань ТО устанавливается перпендикулярно оптической оси объектива АК, при этом орт \mathbf{N} нормали к грани сонаправлен с осью OZ (Рисунок 2.3). Тогда матрица отражения M_{d1} первого отражателя – коллимационного зеркала, образованного фронтальной гранью, определяется выражением (70) из[14]:

$$\mathbf{M}_{d1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Вторая группа отражённых пучков формируется вторым функциональным отражателем – собственно стеклянным тетраэдром в результате последовательного отражения от его трёх граней (Рисунок 2.2). У используемого тетраэдрического отражателя два двугранных угла между отражающими гранями имеют заданное отступление $\delta_2 = \delta_3 = \delta$ от 90° [5,6,11, 12]. Третий двугранный угол равен 90° ($\delta_3 = 0$) - рисунок 2.3, а). При таких величинах углов формируются две пары отражённых пучков, расположенных во взаимно-перпендикулярных плоскостях, при этом в каждой паре орт пучка расположен симметрично относительно орта \mathbf{N} нормали к фронтальной грани тетраэдра и составляет с ней угол Δ . Для измерения угла скручивания Θ_3 используются изображения, сформированные парой пучков с ортами $\mathbf{V}_2^1, \mathbf{V}_2^2$, расположенных в плоскости X OZ (Рисунок 2.3).

Матрица отражения M_{d2} второго отражателя – стеклянного тетраэдра определяется выражением [6,10].

$$\mathbf{M}^{1,2}_{d2} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{\Delta^2}{2} & 0 & \mp \Delta \\ 0 & -1 & 0 \\ \pm \Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

где верхний индекс 1 и, соответственно, верхние знаки у элементов матрицы соответствуют отражённому пучку с ортом \mathbf{V}_2^1 .

В этом выражении параметр Δ определяется величиной δ по выражению:

$$\Delta = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \delta \cdot n, \quad (2.10)$$

где n – показатель преломления стекла тетраэдра;

Пучки, отражённые двумя рассмотренными отражателями, формируют в фокальной плоскости объектива автоколлиматора изображения марки: поз. 5 для измерения коллимационных углов и поз. 1, 2 для измерения угла скручивания (рисунок 2.3, б).

При повороте объекта, с которым связан КЭ, на малые углы Θ_1, Θ_2 ,

Θ_3 (рисунок 2.3, а) относительно осей OX , OY , OZ изображения поз. 2, 1 сместятся соответственно на величину $\pm y_2$, пропорциональную углу Θ_3 (изображения поз. 4, 3 на рисунок 2.3, б), а изображение поз. 5 сместится на величину x_1 и y_1 , пропорционально углам Θ_2 и Θ_1 соответственно (изображение поз. 6 на рисунке 2.3, б).

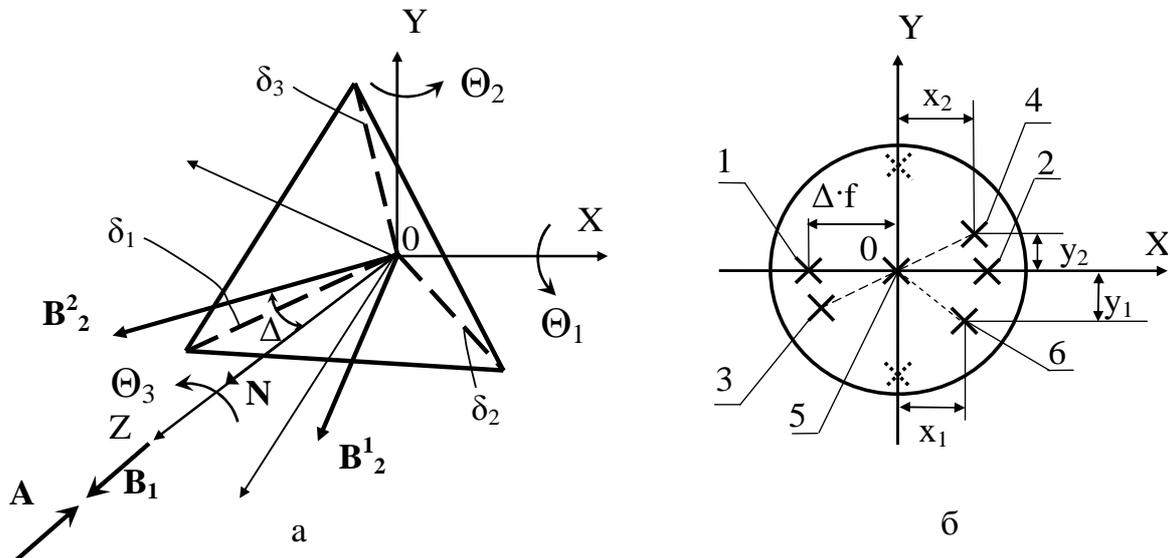


Рисунок 2.3 – Тетраэдрический отражатель (а) и изображение марки автоколлиматора в фокальной плоскости приемного объектива (б): 1, 2, 5 – изображения при $\Theta_3=0$, $\Theta_1=\Theta_2=0$, 3,4,6 – при $\Theta_1 \neq 0$, $\Theta_2 \neq 0$, $\Theta_3 \neq 0$; штриховыми линиями указаны неиспользуемые изображения

Каждый из пучков пары для измерения угла скручивания Θ_3 , составляет с осью объектива автоколлиматора угол Δ , который численно равен коэффициенту передачи между углом поворота ТО на угол скручивания и отклонением отраженного пучка от первоначального направления и, соответственно, определяет чувствительность измерения скручивания.

Орт A падающего на КЭ пучка параллелен оптической оси объектива АК и задаётся одностолбцовой матрицей:

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Орт B_1 пучка, отражённого от фронтальной грани как от автоколлимационного зеркала, определяется при подстановке в общее выражение (2.1) выражений для матрицы M_r поворота (2.7) и матрицы отражения M_{dl} (2.8):

$$B_l = \begin{bmatrix} 2 \cdot \Theta_2 \\ -2 \cdot \Theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \\ B_{1z} \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

По измеренным смещениям x_1 и y_1 изображения марки б, которые пропорциональны составляющим орта \mathbf{B}_{1x} и \mathbf{B}_{1y} , коллимационные углы Θ_1 и Θ_2 определяются по (2.12) в соответствии с алгоритмом:

$$\Theta_1 = \frac{B_{1y}}{-2} = -\frac{y_1}{2 \cdot f'}, \quad \Theta_2 = \frac{B_{2y}}{2} = \frac{x_1}{2 \cdot f'}, \quad (2.13)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора.

Чувствительность измерения коллимационных углов в соответствии с выражением (2.13) определяется параметром $\Delta_k = 2$ – коэффициентом передачи между коллимационным углом поворота Θ_1 или Θ_2 и отклонением отраженного пучка от первоначального направления.

Аналогичным образом орты $\mathbf{B}_{2,1}^1, \mathbf{B}_{2,2}^2$ пучков, отражённых собственно стеклянным тетраэдром рассматриваемого ТО, определяются при подстановке в общее выражение (2.1) выражений для матрицы M_r поворота (2.7) и матриц отражения $M^{1,2}_{d2}$ (2.9):

$$\mathbf{B}_{2,2}^{1,2} = \begin{bmatrix} \mp \Delta \\ \mp \Delta \cdot \Theta_3 + \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_1}{2} \\ 1 - \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{2,2x}^{1,2} \\ B_{2,2y}^{1,2} \\ B_{2,2z}^{1,2} \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

Величина составляющей ортов $B_{2,2y}^{1,2}$ пропорциональна смещениям y_2 изображений 3,4 марки (рисунок 2.3):

$$y_2 = B_{2,2y}^{1,2} \cdot f', \quad (2.15)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора.

Исходя из выражения (2.15), алгоритм измерения угла скручивания Θ_3 :

$$\Theta_3 = \frac{B_{2,2y}^{1,2}}{\mp \Delta} = \mp \frac{y_2}{\Delta \cdot f'}. \quad (2.16)$$

Как следует из (2.14), погрешность измерения вследствие влияния коллимационного угла при измерении угла скручивания равна:

$$\delta_{\Theta_3} = \frac{\Delta \cdot \Theta_1}{2}. \quad (2.17)$$

Из выражения (2.16) следует, что чувствительность измерения угла скручивания в рассматриваемой схеме трёхкоординатного автоколлиматора определяется величиной параметра Δ .

В отсутствие поворота на угол скручивания изображения 1,2 пучков, фиксируемые анализатором в фокальной плоскости приемного объектива

автоколлиматора, расположены не в центре поля зрения, а на его крае, т.е. величина параметра Δ в данной схеме измерения ограничена угловым полем автоколлиматора (рисунок 2.3, б).

При использовании рассмотренного контрольного элемента автоколлиматор не обладает достаточной чувствительностью к повороту на угол скручивания Θ_3 вследствие малости коэффициента передачи Δ , величина которого ограничена угловым полем серийного автоколлиматора (например, для автоколлиматора АК-0,5 с угловым полем 12 угл. мин. коэффициент передачи по скручиванию равен $\Delta = 0,0035$, что значительно меньше чувствительности $\Delta_3 = 2$ для коллимационных углов при использовании плоского зеркала) [13].

2.4 Трёхкоординатный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания

Для повышения чувствительности Δ измерения угла скручивания Θ_3 при использовании типового автоколлиматора с малым угловым полем объектива предлагается использовать схему с переотражением пучка, реализуемым дополнительным плоским зеркалом поз. 3 (рисунок 2.4, а).

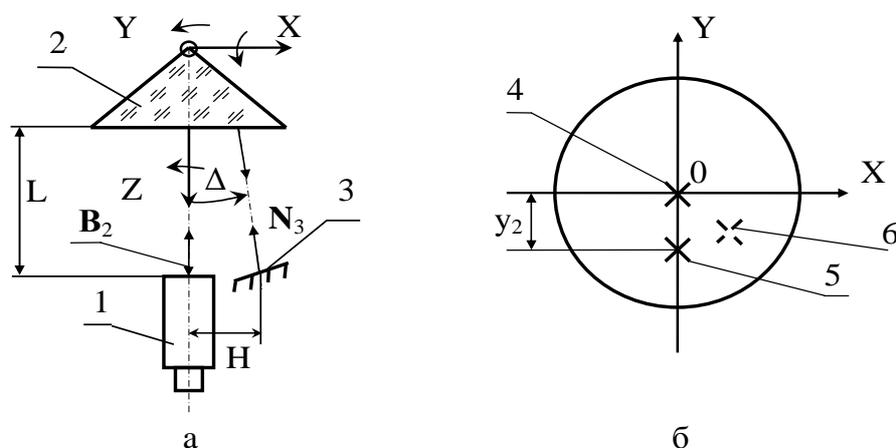


Рисунок 2.4 – Схема автоколлиматора с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания (а); изображения марки на матрице (б): 1 – автоколлиматор, 2 – тетраэдрический отражатель, 3 – плоское зеркало, 4 – изображение марки при $\Theta_3=0$, 5 – изображение марки при $\Theta_3 \neq 0$, 6 – дополнительное изображение марки для измерения коллимационных углов

В результате один из пучков, отражённых собственно стеклянным тетраэдром ТО, например, с ортом \mathbf{B}_2^2 (Далее обозначается как \mathbf{B}_2) минует приемный объектив и после отражения от дополнительного зеркала поз. 3 (рисунок 2.4, а) направляется вновь на тетраэдрический отражатель. После повторного отражения от тетраэдрического отражателя поз. 2 формируется

изображение поз. 4 марки (рисунок 2.4, б) на анализаторе, расположенном в фокальной плоскости объектива автоколлиматора.

Величина выноса дополнительного плоского зеркала составляет (рисунок 2.4, а):

$$H = L \cdot \operatorname{tg} \Delta, \quad (2.18)$$

где L – расстояние между оптической осью автоколлиматора и центром плоского зеркала, Δ – угол между ортом \mathbf{B}_2 отражённого пучка и оптической осью объектива АК. Величина угла Δ в этом случае значительно больше, чем в рассмотренной в разделе 2.3 схеме измерения, что определяет увеличение чувствительности измерения по сравнению со схемой (рисунок 2.3) без переотражения пучка.

Орт нормали \mathbf{N}_3 к поверхности дополнительного зеркала 3 определяется выражением (согласно рисунка 2.4, а):

$$\mathbf{N}_3 = \begin{bmatrix} -\sin(\Delta) \\ 0 \\ -\cos(\Delta) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -\Delta \\ 0 \\ -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{3x} \\ N_{3y} \\ N_{3z} \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Матрица отражения зеркала определяется формулой (69) из [[14]:

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cdot N_x^2 & -2 \cdot N_x \cdot N_y & -2 \cdot N_x \cdot N_z \\ -2 \cdot N_x \cdot N_y & 1 - 2 \cdot N_y^2 & -2 \cdot N_y \cdot N_z \\ -2 \cdot N_x \cdot N_z & -2 \cdot N_y \cdot N_z & 1 - 2 \cdot N_z^2 \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

где N_x, N_y, N_z – координаты орта \mathbf{N} нормали к плоскости зеркала.

При подстановке в выражение (2.20) координат орта согласно (2.19) получаем матрицу отражения для зеркала 3:

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 - 2 \cdot \Delta^2 & 0 & -2 \cdot \Delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -2 \cdot \Delta & 0 & -1 + 2 \cdot \Delta^2 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Поворот объекта, с которым связан ТО, на малые углы $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ вокруг осей OX, OY, OZ приводит к смещению изображения марки поз. 4 на величину y_2 , пропорциональную углу скручивания Θ_3 , относительно центра анализатора (изображение поз. 5 на рисунок 2.4, б).

Для данной схемы орт \mathbf{B}_2 (рисунок 2.4, а) пучка после отражения в последовательности «тетраэдрический отражатель – дополнительное зеркало – тетраэдрический отражатель» определяется выражением:

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M}_{d2} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M}_{d2} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (2.22)$$

где \mathbf{M}_3 – матрица действия плоского зеркала 3.

В соответствии с выражением (2.22), орт \mathbf{B}_2 отраженного пучка с

учетом величин второго порядка малости равен:

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \cdot \Delta \cdot \Theta_3 - \Delta^2 \cdot \Theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{2x} \\ B_{2y} \\ B_{2z} \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Как следует из выражения (2.23), по величине составляющей орта B_{2y} пропорциональной смещению y_2 изображения марки, угол скручивания Θ_3 определяется по алгоритму:

$$\Theta_3 = -\frac{B_{2y}}{2 \cdot \Delta} = -\frac{y_2}{2 \cdot \Delta \cdot f'}, \quad (2.24)$$

где f' – фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

Погрешность измерения угла скручивания Θ_3 вследствие влияния коллимационного угла Θ_1 также определяется выражением (2.17). Если величиной этой составляющей погрешности пренебречь нельзя, следует использовать точный алгоритм в соответствии со второй строкой выражения (2.23):

$$\Theta_3 = -\frac{y_2}{2 \cdot \Delta \cdot f'} - \frac{\Delta \cdot \Theta_1}{2}, \quad (2.25)$$

При этом угол Θ_1 предварительно измеряется по пучку, отражённому от фронтальной грани стеклянного тетраэдра.

Соответственно при трёхкоординатных измерениях углов $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ коллимационные углы Θ_2, Θ_1 в рассмотренном автоколлиматоре с переотражением пучка осуществляется аналогично схеме, изображенной на рисунке 2.3.

При сравнении выражений (2.16) и (2.23) следует, что чувствительность измерения к углу скручивания Θ_3 , определяемая в обоих случаях составляющей B_{2y} орта отраженного пучка, в схеме с переотражением пучка увеличена. Например, в схеме с переотражением пучка величина H выноса зеркала составляет величину 100 мм, что на дистанции до ТО 1000 мм определяет величину угла $\Delta = 0,1$ рад. Тогда в соответствии с выражением (2.23) коэффициент передачи равен $K = 2 \cdot \Delta = 0,2$, что практически в 60 раз больше по сравнению с чувствительностью измерения в схеме без переотражения пучка. Кроме того, в данной схеме величина параметра Δ угловым полем автоколлиматора не ограничена, поскольку при нулевом значении угла скручивания отраженный пучок формирует изображение поз. 4 (рисунок 2.4, б) в центре поля зрения автоколлиматора.

Таким образом, схема автоколлиматора с дополнительным зеркалом позволяет:

- проводить независимые измерения коллимационных углов;
- радикально увеличить чувствительность измерения угла

скручивания по сравнению со схемой без переотражения пучка.

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры практических задач, требующих измерения трёх угловых координат контролируемого объекта.

2. Дайте определение коллимационных углов и угла скручивания; как расположены оси поворота на эти углы относительно оптической оси объектива автоколлиматора?

3. Какие именно объекты и преобразования описывают матрицы, входящие в общий алгоритм автоколлимационных измерений?

4. В каких компонентах выражения общего алгоритма автоколлимационных измерений содержится информация об измеряемых углах; какие величины непосредственно измеряются анализирующей системой автоколлиматора?

5. Скольким отражателям должен быть эквивалентен контрольный элемент для трёхкоординатных измерений; по какой причине эти измерения невозможны при наличии единственного отражателя?

6. При использовании для трёхкоординатных измерений контрольного элемента в виде стеклянного тетраэдрического отражателя каким именно отражателем он эквивалентен; какова схема хода лучей при отражении от них?

7. Укажите на недостатки трёхкоординатного автоколлиматора со схемой хода лучей «без переотражения»; какие изображения формируются в плоскости анализа приёмной системы, чем как определяются их перемещения при измерениях углов?

8. В чём преимущество трёхкоординатного автоколлиматора со схемой хода лучей «с переотражением от дополнительного зеркала»; какие изображения формируются в плоскости анализа приёмной системы, чем и как именно определяются их перемещения при измерениях углов?

9. Какими параметрами определяется чувствительность к измеряемым коллимационным углам и углу скручивания в схемах «без» и «с переотражением от дополнительного зеркала»?

10. Какие именно объекты и преобразования описывают матрицы, входящие в алгоритм автоколлимационных измерений в схеме автоколлиматора «с переотражением от дополнительного зеркала»?

11. Какая из угловых координат измеряется с погрешностью, величина которой определяется влиянием другой измеряемой угловой координаты? Сравните величины этой погрешности для двух рассмотренных измерительных схем.

12. Какие параметры конфигурации тетраэдра определяют матрицы отражения тетраэдрического отражателя для трёхкоординатных измерений ?

3 Структурная схема исследуемого трёхкоординатного автоколлиматора

На основе рассмотренной в разделе 2.4 модернизированной схемы автоколлимационного измерения с дополнительным зеркалом разработана структура трёхкоординатного оптико-электронного автоколлиматора с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания (рисунок 3.1).

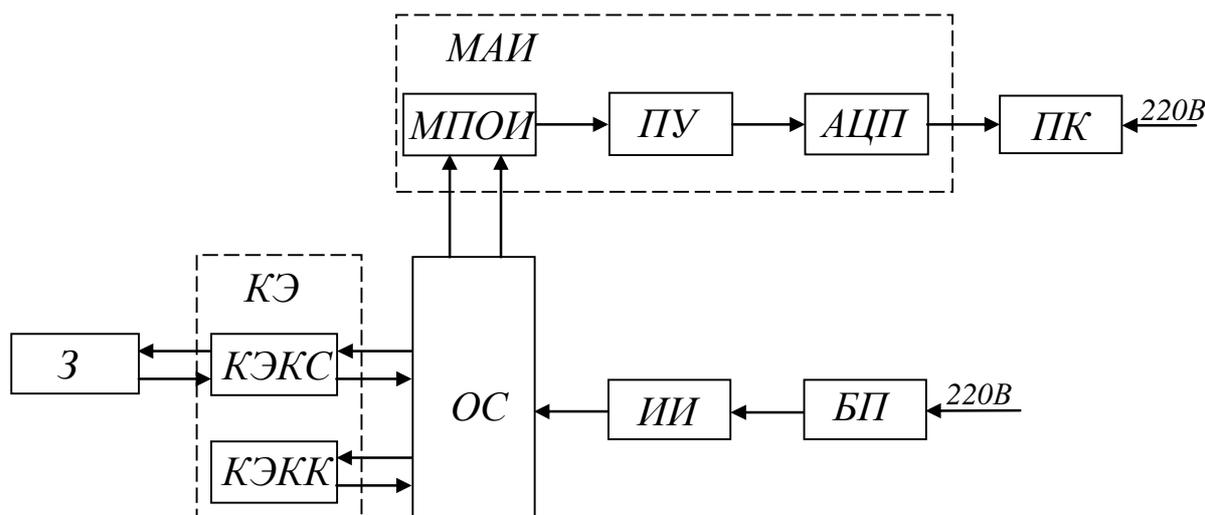


Рисунок 3.1 – Структурная схема оптико-электронного трёхкоординатного автоколлиматора

Структурная схема прибора (рисунок 3.1) содержит следующие элементы: З – зеркало; КЭ – контрольный элемент (тетраэдрический отражатель, или трипельпризма) в составе КЭКС – контрольного элемента для измерения скручивания; КЭКК – контрольного элемента для измерения коллимационных углов; ОС – оптическая система (объектив и светоделительная призма-куб); ИИ – источник излучения с маркой в виде диафрагмы; БП – блок питания ИИ; МАИ – матричный анализатор изображения, включающий МПОИ – матричный приемник оптического излучения, ПУ – предварительный усилитель сигнала с МПОИ, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер.

Оптической системой ОС прибора из пучка, приходящего от ИИ, установленного в фокусе объектива ОС, формируется пучок, падающий на контрольный элемент КЭ, установленный на контролируемом объекте. Излучающая марка выполнена в виде диафрагмы диаметром 0,5 мм, подсвечиваемой инфракрасным излучающим диодом. Питание излучающего диода осуществляется БП, подключённым к стандартной сети 220 В.

МАИ на основе КМОП-матрицы (рисунок 3.1) образован МПОИ,

предварительным усилителем ПУ и АЦП. Поток излучения, формирующий изображения марки преобразовывается МПОИ в электрический сигнал и направляется в предварительный видеоусилитель ПУ, где происходит его предварительная фильтрация и усиление до уровня, необходимого для максимально эффективного использования всех разрядов аналогово-цифрового преобразователя АЦП (определяется опорным напряжением АЦП). С АЦП видеосигнал, преобразованный в цифровой код, поступает в ПК для дальнейшей обработки. ПК питается от сети в 220 В.

В качестве КЭ используется ТО с заданным отклонением двух двугранных углов между отражающими гранями от 90° .

Рассматриваемый КЭ эквивалентен двум отражателям: КЭКС (отражающие грани ТО) и КЭКК (фронтальная грань ТО как автоколлимационное зеркало). Соответственно формируются две группы отражённых пучков – для измерения угла скручивания Θ_3 и для измерения коллимационных углов Θ_1 и Θ_2 .

Пучок для измерения скручивания Θ_3 КЭКС отражает под углом Δ к оптической оси в направлении зеркала 3. Далее, отразившись от зеркала 3, пучок повторно проходит КЭКС и переотражается им в направлении ОС. Пучок для измерения коллимационных углов, полученный отражением от КЭКК (передней грани КЭ), направляется в ОС. Тогда на МАИ, чувствительная площадка которого расположена в фокальной плоскости ОС, формируются два изображения марки 1, 2 (рисунок 3.2).

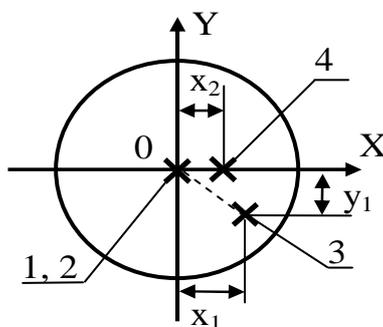


Рисунок 3.2 – Положения изображений марки в плоскости анализатора

При повороте КЭ на углы Θ_1 и Θ_2 (коллимационные углы) изображение 1 смещается относительно центра поля зрения в положение 3, причём величина смещения y_1 относительно оси ОХ пропорциональна углу Θ_1 , а смещение x_1 относительно ОУ – углу Θ_2 . Изображение 2 смещается на x_2 пропорционально повороту отражающего КЭ на угол скручивания Θ_3 в положение 4. В рассматриваемой схеме в отличие от варианта, соответствующего рисункам 2.3,2.4, ребро двугранного угла ТО, равного 90° расположено в плоскости ZOХ, а не ZOУ. Такое положение ребра ТО, а следовательно, и соответствующее ему горизонтальное смещение переотражающего плоского зеркала 3 упрощает конструкцию

автоколлиматора.

В рассматриваемой схеме орт \mathbf{B}_2 отраженного пучка автоколлиматора в соответствии с выражением (2.22) равен

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_3 + \Delta^2 \cdot \Theta_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{2x} \\ B_{2y} \\ B_{2z} \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Алгоритм измерения угла скручивания при малых величинах измеряемых углов примет следующий вид:

$$\Theta_3 = \frac{B_{2x}}{2 \cdot \Delta} = \frac{x_2}{2 \cdot \Delta \cdot f'}, \quad (3.2)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора, x_2 – измеряемое смещение изображения марки в плоскости КМОП-матрицы.

Алгоритм измерения коллимационных углов соответствует выражению (2.13).

В результате обработки видеосигнала определяются смещения x_1, y_1 и x_2 изображений марки на чувствительной площадке матричного анализатора, которые с точностью до постоянного коэффициента, равного фокусному расстоянию объектива автоколлиматора, принимаются равными координатам ортов отраженных пучков. Далее угол скручивания определяется по алгоритму (3.2), коллимационные углы – по алгоритму (2.13).

Контрольные вопросы

1. Как связаны параметры расположения дополнительного зеркала с параметрами тетраэдрического отражателя в схеме исследуемого в лабораторной работе варианта автоколлиматора с переотражением пучка?
2. В чём различие измерительных схем исследуемого в лабораторной работе трёхкоординатного автоколлиматора и рассмотренного при принципиальном теоретическом анализе в разделе 2.4.? По какой причине изменена измерительная схема?
3. Какие изображения марки формируются в плоскости анализа приёмной системы исследуемого в лабораторной работе автоколлиматора? Каковы величины и направления их перемещения при измерениях углов?
4. Как изменится направление перемещения изображений в случае, если углы поворота тетраэдрического отражателя изменят знак на противоположный?
5. Дайте определение параметру Δ в алгоритме измерения угла скручивания. Какими параметрами тетраэдрического отражателя определяется его величина? Как влияет величина Δ на ход рабочих пучков автоколлиматора?
6. Учитывает ли рассмотренный алгоритм измерения угла скручивания влияние одного из коллимационных углов?

4 Материальное обеспечение лабораторных работ по экспериментальному исследованию оптико-электронного автоколлиматора

Цель лабораторных работ: изучение принципа действия оптико-электронного информационно-измерительного прибора, реализующего высокоточное угловое позиционирование автоколлимационным методом, практическое освоение методики определения основных метрологических характеристик информационно-измерительного средства измерения.

Задачи исследований, выполняемых в лабораторной работе:

- изучение общих принципов работы оптико-электронного информационно-измерительного прибора как согласованной системы оптических, оптоэлектронных, микропроцессорных и электронных блоков;
- изучение методики экспериментального исследования оптико-электронного углоизмерительного автоколлиматора, а также структуры и характеристик современных лабораторных средств для её реализации;
- получение практических навыков по снятию статической характеристики оптико-электронного измерительного средства на примере автоколлиматора в диапазоне задаваемых поворотов контрольного элемента;

Отдельной задачей исследования является освоение методик обработки экспериментальных данных и получения практических значений параметров измерительного средства, в частности:

- линейной интерполяции статической характеристики автоколлиматора;
- определения погрешности измерения углов скручивания и коллимационных углов при использовании линеаризованной статической характеристики;
- определения коэффициента передачи контрольного элемента по измеренным углам.

Указанные задачи исследований выполняются на разработанном стенде, который в зависимости от компоновки позволяет проводить эксперименты с автоколлиматором в трёх режимах его работы: измерения коллимационных углов, измерения угла скручивания, трёхкоординатных измерений.

4.1 Стенд для исследования оптико-электронного автоколлиматора при измерении коллимационных углов

На рисунке 4.1 представлена схема стенда для исследования оптико-электронного автоколлиматора при измерении коллимационных углов

поворота объекта в диапазоне до $20'$.

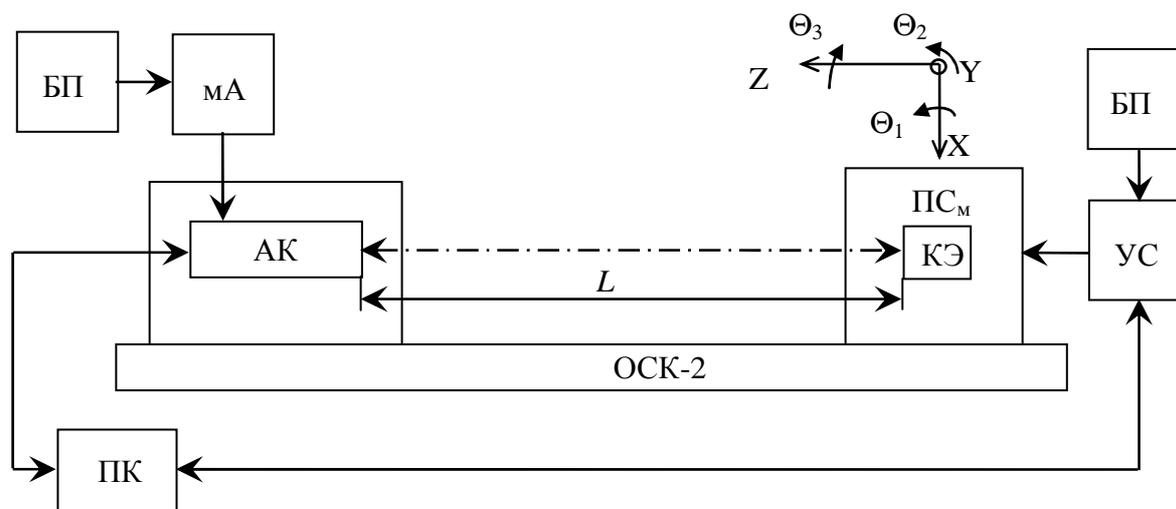


Рисунок 4.1 – Схема стенда для исследования оптико-электронного автоколлиматора при измерении коллимационных углов

В состав учебного стенда входят (рисунок 4.1):

- автоколлиматор (АК);
- контрольный элемент (КЭ) на базе ТО (трипельпризмы), его входная грань используется как автоколлимационное зеркало;
- персональный компьютер (ПК), на базе которого реализован единый центр управления и обработки информации;
- блок питания (БП) источника излучения автоколлиматора
- миллиамперметр (мА);
- оптическая скамья ОСК-2;
- поворотный столик моторизованный ($ПС_M$) предназначен для углового поворота КЭ на заданные углы. ПС позволяет задавать повороты относительно коллимационной оси ОУ;
- устройство сопряжения (УС) поворотного столика с блоком питания (БП).

Автоколлиматор конструктивно образован тремя основными узлами (рисунок 4.2): объективом поз. 1, и автоколлимационным модулем поз. 2, соединенными между собой корпусом поз. 3. Плоское зеркало поз. 4 закреплено с помощью хомута на трубе автоколлиматора. Для измерений коллимационных углов плоское зеркало не используется, так как измерения проводятся по части пучка, отраженной от фронтальной грани КЭ как от автоколлимационного зеркала. Автоколлиматор установлен на блок крепления поз. 5. Фокусное расстояние объектива автоколлиматора 263 мм.

Автоколлимационный модуль (рисунок 4.3) состоит из блока крепления светоделиителя, источника излучения поз. 1, фотоприемного

модуля поз. 2.

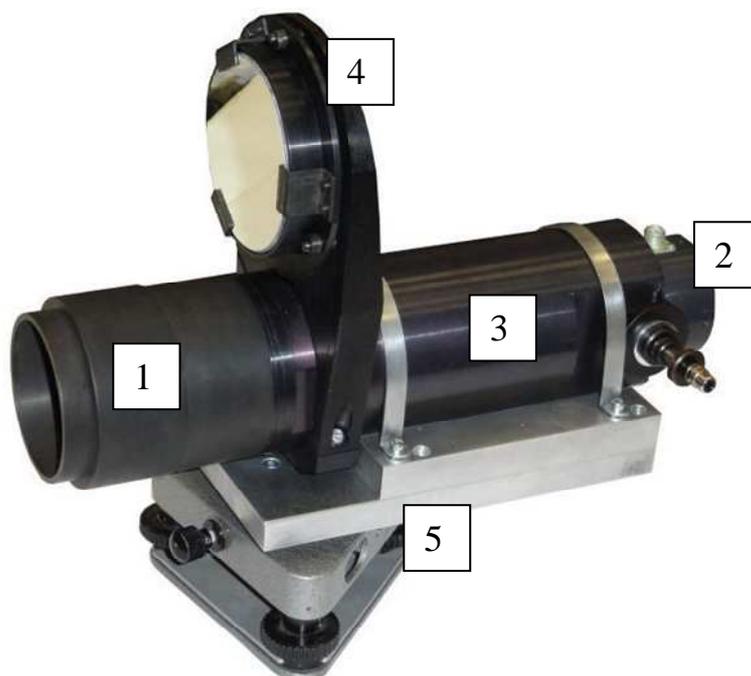


Рисунок 4.2 – Базовый блок системы

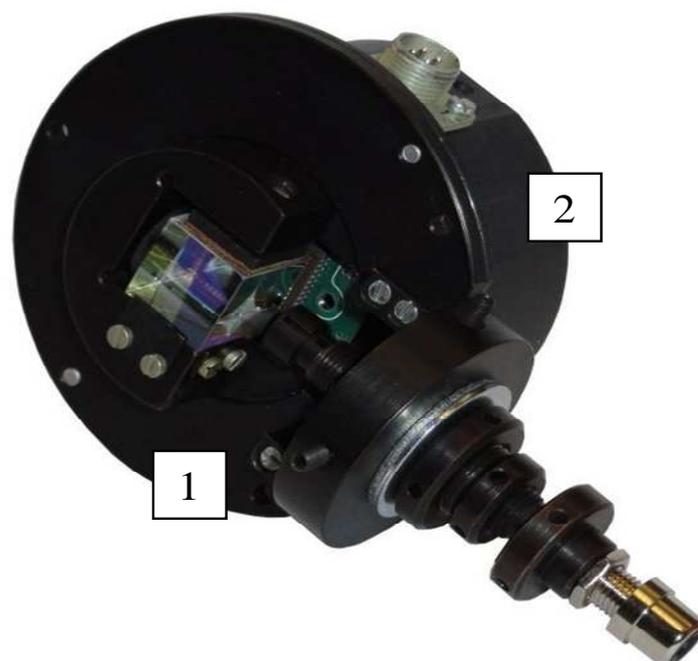


Рисунок 4.3 – Автоколлимационный модуль

В качестве источника излучения автоколлиматора выбран полупроводниковый излучающий диод (ПИД) марки L-34F3C (материал – AsGa) фирмы Kingbright. Диафрагма, диаметром 0,3 мм, установленная перед ПИД является излучающей маркой автоколлиматора.

Основные технические данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные параметры излучающего диода

Параметр	Величина
Мощность излучения при $I_{np} = 20 \text{ мА}$, не менее	0,02 Вт
Постоянное прямое напряжение ($I_{np} = 20 \text{ мА}$), не более	1,2 В
Половина эффективного угла диаграммы направленности излучения	25°
Длина волны излучения в максимуме спектральной плотности (λ), нм	940
Диаметр излучающего элемента	3 мм

Для питания и регулировки яркости ПИД автоколлиматора используется стандартный блок питания (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Блок питания источника излучения

В схему питания ПИД для точного контроля тока на ПИД подключается миллиамперметр (рисунок 4.5). Цена деления микроамперметра 1 мА.



Рисунок 4.5 – Микроамперметр

Основным элементом фотоприемного модуля является приемник оптического излучения (ПОИ). Для данного АК используется ТВ камера с КМОП-матрицей VEA/VIA-535 ООО «ЭВС» [15]. Параметры матрицы приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные параметры КМОП-матрицы

Параметр	Величина
Фоточувствительная площадка	7,19(Н)мм×5,39(В)мм
Количество пикселей	2529(Н)×1944(В)
Размер пикселя	2,775 (Н)мкм×2,775 (В)мкм
Рабочий диапазон длин волн	400–1100 мкм
Величина освещенности насыщения по источнику типа «А» $E_{v\text{нас}}$, лк	$E_{v\text{нас}} = 8$ лк
Динамический диапазон	$Dr = 60$ дБ(1000)
Напряжение питания	+5 В
Диапазон рабочей температуры	(+1...+45) °С

ТВ камера выполнена на единой печатной плате. С одной стороны платы расположен светочувствительный элемент – КМОП-матрица. В соответствии с технологией изготовления этих фотоприемников блок аналоговой обработки видеосигнала и АЦП интегрированы в кристалл КМОП-фотоприемника. Необходимое напряжение питания (+5В) для ТВ камеры АК поступает от USB шины ПК.

В процессе работы с ТВ камеры на USB порт ПК поступает цифровой видеосигнал, в результате обработки которого определяются смещения изображений, формируемых в плоскости анализа АК, и вычисляются измеряемые углы поворота объекта.

Общий вид КЭ представлен на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Контрольный элемент

Контрольный элемент представляет собой стеклянную призму в форме тетраэдрического отражателя (трипельпризму), два двугранных угла между отражающими гранями которого имеют малые отступления от 90° и равны 91°20'20". КЭ изготовлен из стекла К8 ($n = 1,507792$ для $\lambda=940$ нм) и имеет коэффициент преобразования, определяющий чувствительность

измерения угла скручивания , равный (см. выражение (2.10)) $\Delta = 0,1$.

Разработанный КЭ позволяет регистрировать угловые повороты объекта, на котором он установлен, относительно трех ортогональных осей независимо от линейных перемещений объекта.

Моторизованный поворотный столик представляет собой однокоординатную подвижку (рисунок 4.7) (8MR190-90-4247) фирмы Standa [16].



Рисунок 4.7 – Большой моторизованный поворотный столик

Управление подвижкой осуществляется посредством ПК через устройство сопряжения – микрошаговый контроллер (USB интерфейс) 8SMC1-USBhF-B1-1 фирмы Standa [17].

Таблица 4.3 – Характеристики поворотного столика 8MR190-90-4247 фирмы Standa

8MR190-90-4247	
Диапазон	360 угл. град
Точность	54 угл. сек

Внешний вид устройства сопряжения показан на рисунке 4.8. Питание подается через блок питания (рисунок 4.9).



Рисунок 4.8 – Устройство сопряжения



Рисунок 4.9 – Блок питания

4.2 Стенд для исследования опико-электронного автоколлиматора при измерении угла скручивания

На рисунке 4.10 представлена схема стенда исследования опико-электронного автоколлиматора в режиме измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью в диапазоне до $20'$.

Состав данного учебного стенда (рисунок 4.10) отличается от стенда для измерения коллимационных углов (рисунок 4.1) наличием:

- дополнительного отражателя – плоского зеркала (З);
- поворотного столика с ручной регулировкой ($ПС_p$), предназначенного для углового поворота КЭ на заданные углы. ПС позволяет задавать повороты относительно оси скручивания OZ.

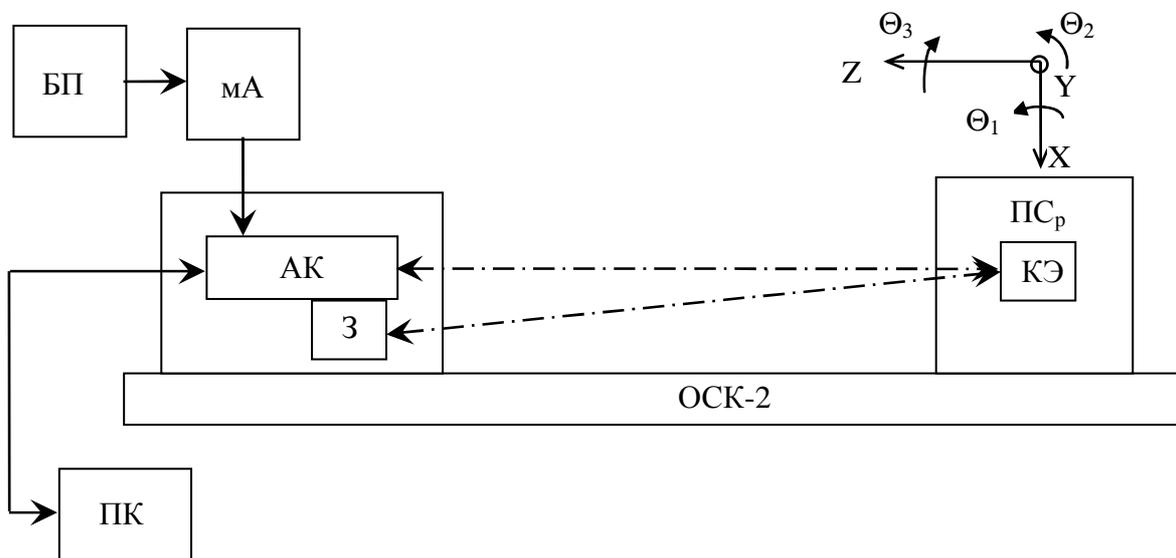


Рисунок 4.10 – Схема стенда для исследования опико-электронного автоколлиматора при измерении угла скручивания

Для измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью используется дополнительный отражатель в виде плоского зеркала поз. 2 (рисунок 4.2), закрепленного на трубе автоколлиматора. Дополнительный

отражатель обеспечивает переотражение пучка, приводящее к увеличению чувствительности измерения угла скручивания (см. раздел 2.4). Диаметр плоского зеркала равен 85 мм. Зеркало выполнено из стекла марки К8 с внешним зеркальным покрытием. Угол наклона зеркала $\alpha = 0,1$ рад выставляется регулировочными винтами (рисунок 4.11).

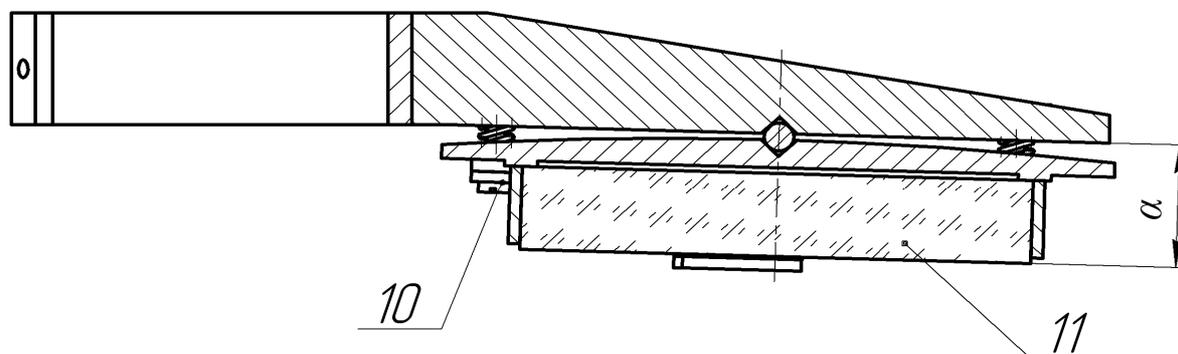


Рисунок 4.11 – Конструкция узла бокового зеркала; 10 – регулировочный винт, 11 - зеркало

Поворотный столик (рисунок 4.12) представляет собой рычажный механизм с закрепленным на нем КЭ. Значение угла поворота вокруг оси скручивания OZ выставляется по шкале ПС (рисунок 4.13). Цена деления составляет 5 секунд.

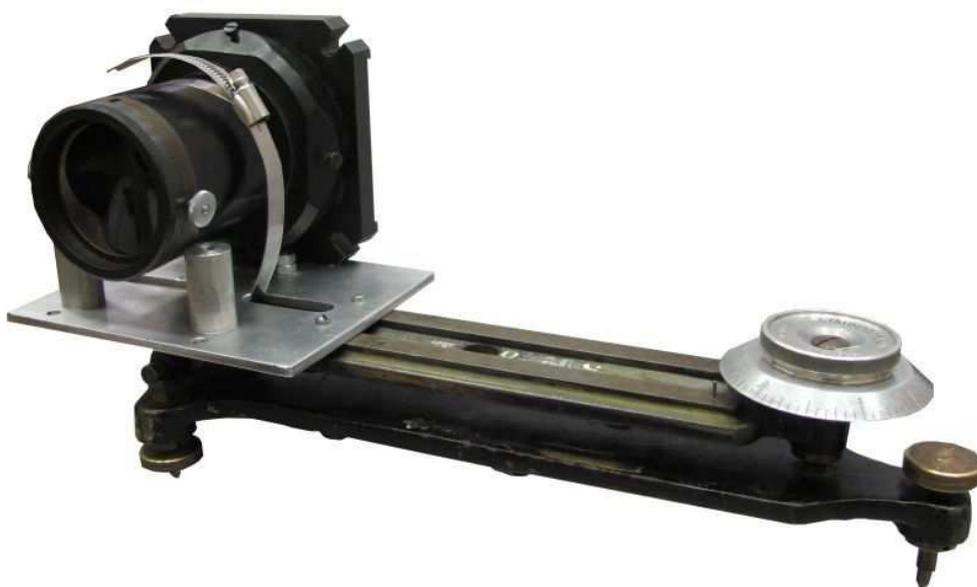


Рисунок 4.12 – Поворотный столик с установленным на него контрольным элементом

Описание и конструктивное исполнение других элементов стенда представлено в подразделе 4.1.



Рисунок 4.13 – Шкала поворотного столика

4.3 Стенд для исследования трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора

На рисунке 4.14 представлена схема стенда исследования трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора для измерения как коллимационных углов, так и угла скручивания. Диапазон измерения по каждому углу не менее $20'$.

Состав данного учебного стенда (рисунок 4.14) отличается от стенда для измерения угла скручивания (рисунок 4.10) тем, что КЭ установлен на поворотном столике с ручной регулировкой ($ПС_p$), который в свою очередь размещён на моторизованном поворотном столике ($ПС_m$). В результате поворотные столики позволяют задавать повороты относительно коллимационной оси OY и оси скручивания OZ .

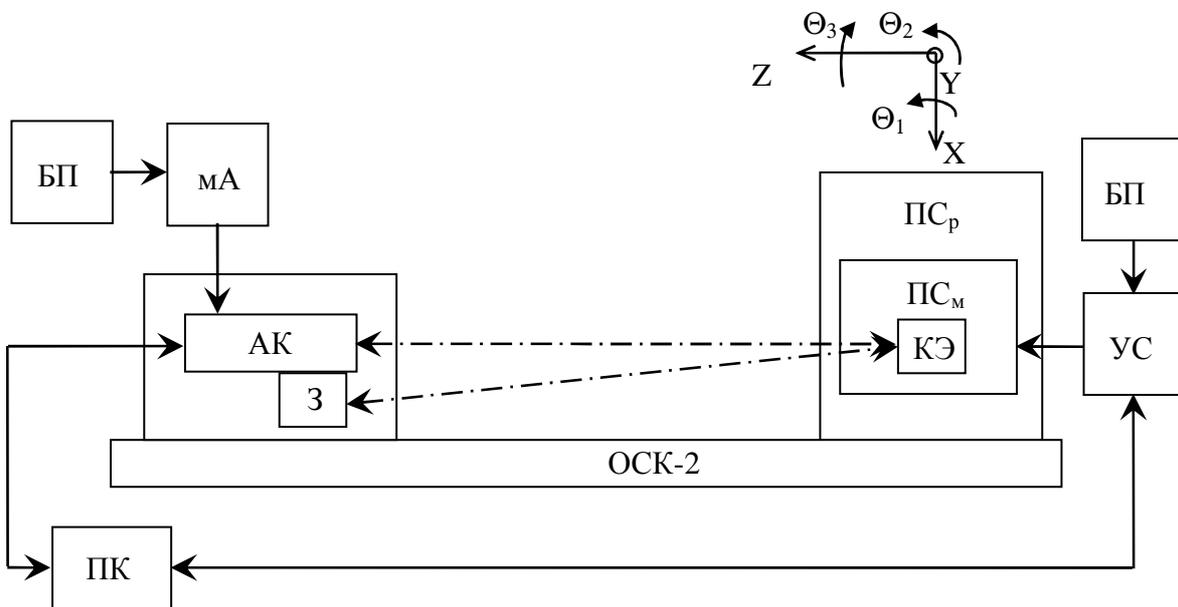


Рисунок 4.14 – Схема стенда для исследования трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора в режиме измерения как коллимационных углов, так и угла скручивания

Описание и конструктивное исполнение основных элементов стенда представлено в подразделах 4.1, 4.2.

5 Описание программного обеспечения экспериментальных исследований оптико-электронного автоколлиматора

Программы управления стендом создаются в программной среде LabVIEW [18]. При запуске оболочки LabVIEW отображаемая на экране рабочая область содержит два окна: окно лицевой панели (front panel) с комбинацией средств управления программой и элементами стенда и индикаторов, и окно панели диаграмм (block diagram), где помещается алгоритм работы программы.

Лицевая панель включает строку меню, панель инструментов, окно справки, окно описания (рисунок 5.1), окна настройки (рисунок 5.2), окно измерений (рисунок 5.3), и кнопку завершения работы программы управления «stop».

В окне описания (рисунок 5.1) представлено краткое изложение порядка выполнения лабораторной работы.

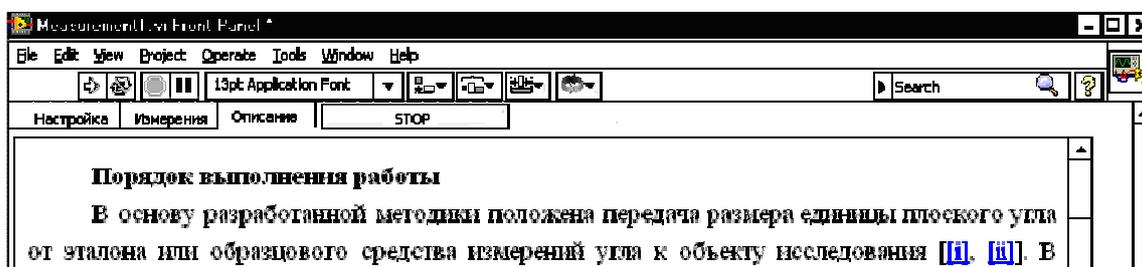


Рисунок 5.1 – Окно описания на лицевой панели

Настройка программы сводится к выбору источника цифрового видеосигнала и основных его параметров (рисунок 5.2), таких как: разрешение передаваемого изображения и режима снятия информации. Окно настройки также содержит область вывода видеосигнала и графики распределения облученности изображения марки-диафрагмы ПИД в выделенной области вывода видеосигнала. В окне настройки осуществляется управление питанием моторизованной подвижки и текущим положением КЭ по коллимационному углу.

Окно измерений (рисунок 5.3) содержит области ввода значений количества измерений и углового положения КЭ в полях для коллимационных углов и угла скручивания: серий измерений, измерений в серии, «начальное значение в минутах», «шаг в минутах». Поля «текущая позиция», «следующая позиция», «осталось измерений» заполняются программно и служат для индикации этапа измерений. Результаты измерений выводятся на экран в виде таблицы «Результат измерений». Для сохранения результатов измерений в файл формата txt имеется кнопка «сохранить результат». Установка КЭ в следующее угловое положение для коллимационных углов осуществляется программно нажатием кнопки «следующая позиция», а для угла скручивания – в ручном режиме, при котором кнопка «следующая позиция» используется для индикации установленного углового положения КЭ.

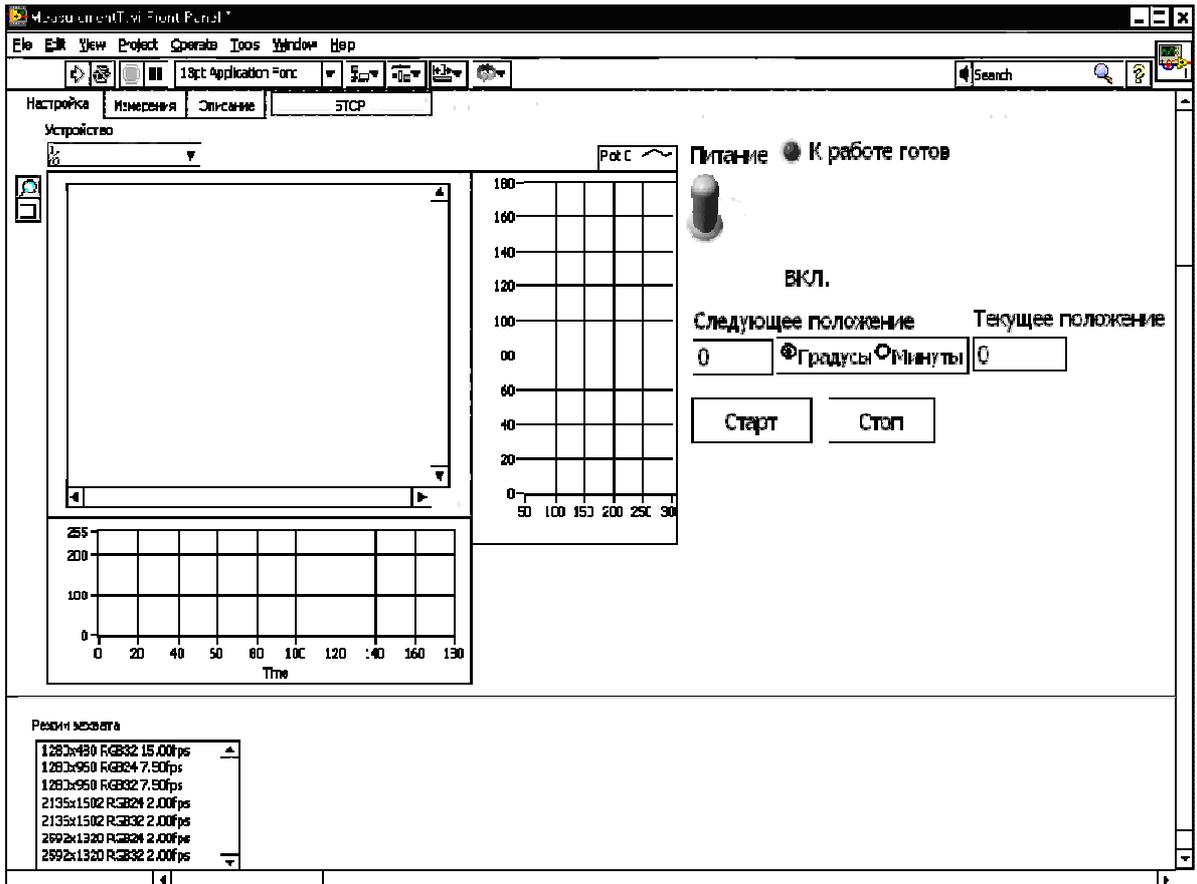
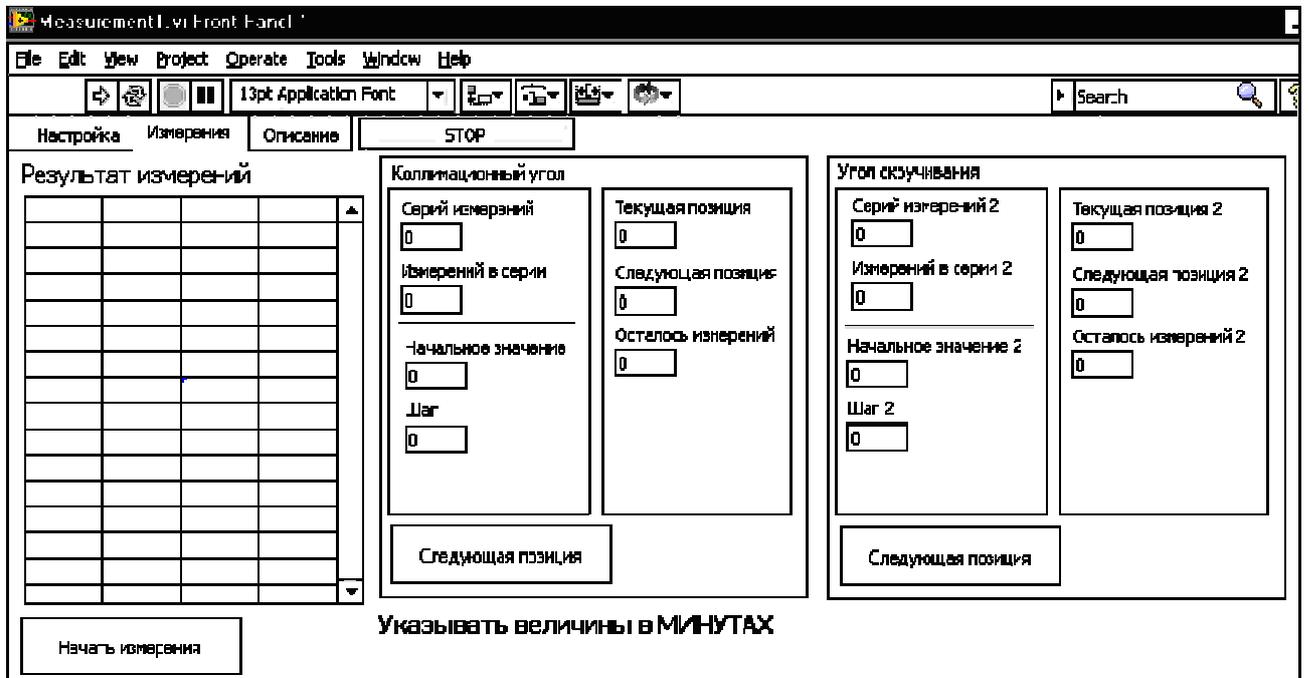


Рисунок 5.2 – Окно настройки лицевой панели



Указывать величины в МИНУТАХ

Рисунок 5.3 – Окно измерений на лицевой панели

Все средства управления и индикации лицевой панели связаны с алгоритмом работы программы, отображаемым на панели диаграмм (рисунок 5.4).

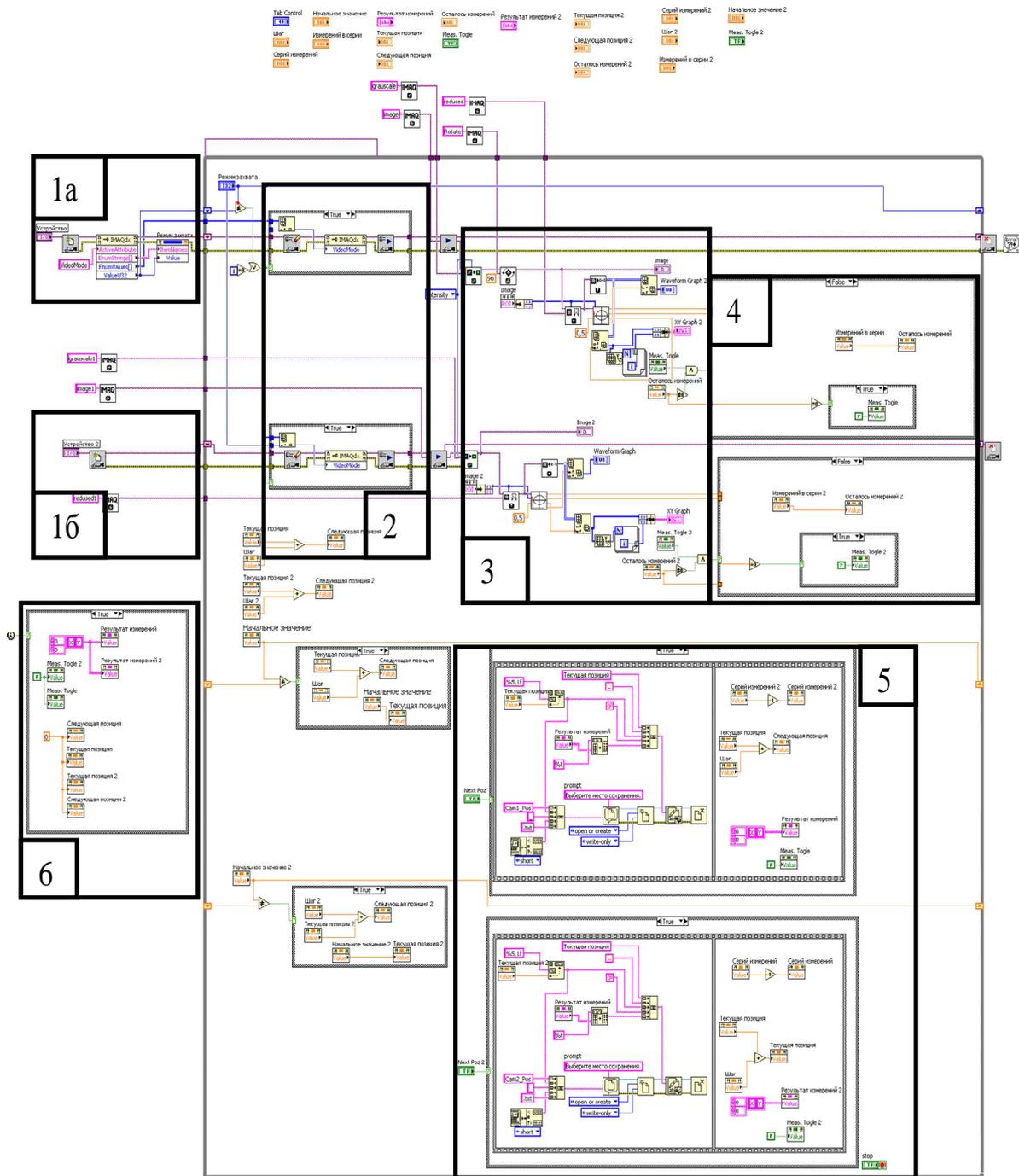


Рисунок 5.4 – Общий вид блок-диаграммы программы управления: 1 – модуль видео захвата, 2 – модуль предварительной обработки, 3 – модуль обработки изображения, 4 – модуль записи в таблицу измеренных значений, 5 – модуль сохранения измеренных значений, 6 – модуль сброса установок в исходное положение

Приведенную блок-схему (рисунок 5.4) можно разбить на несколько структурно-логических модулей. Модуль видеозахвата 1а и 1б получает видеоизображение с подключенных камер в виде видеопотока - строки. Затем в модуле предварительной обработки 2 видеопоток - строка видеоинформации преобразуется в изображение (разбивается на строки и столбцы, согласно настройкам пользователя), полученное изображение передается в модуль обработки изображения 3, в котором осуществляется вырезание из полного изображения области интересов, заданной пользователем.

К уменьшенному изображению применяется пороговый фильтр, срезающий сигнал по уровню 50%. Данная процедура осуществляется для уменьшения шумовых оставляющих на результат вычисления центра изображения. Центр пятна вычисляется с помощью алгоритма взвешенного суммирования [19]. Вычисленные значения записываются в таблицу измеренных значений в модуле 4. В модуле 5 осуществляется сохранение полученных значений в файл документа формата txt. Для сброса установок в исходное положение служит модуль 6.

Контрольные вопросы по разделам 4 и 5

1. Кратко изложите цели и задачи экспериментального исследования автоколлиматора как информационно-измерительного прибора.
2. Из каких основных компонентов состоит стенд для исследования автоколлиматора при измерении коллимационных углов ?
3. Чему равны коэффициенты Δ , описывающие чувствительность измерения коллимационных углов и угла скручивания, соответственно? Какими параметрами контрольного элемента определяется их величина для используемого в стенде тетраэдрического отражателя?
3. Какие компоненты дополнительно присутствуют в стенде для исследования автоколлиматора при измерении угла скручивания?
4. Какие компоненты дополнительно присутствуют в стенде для исследования автоколлиматора в режиме измерения всех трёх угловых координат по сравнению с конфигурацией для измерения коллимационных углов?
5. Какие окна присутствуют на лицевой панели после запуска программы управления экспериментом?
6. Кратко изложите назначение каждого окна, присутствующего на лицевой панели программы управления экспериментом.
7. Из каких основных блоков состоит блок-диаграмма программы управления экспериментом?
8. Каково назначение основных блоков программы управления экспериментом?
9. По какому алгоритму определяется координата центра изображения марки на КМОП матрице?

6 Методика проведения экспериментальных исследований при выполнении лабораторных работ

В основу разработанной методики положена передача размера единицы плоского угла от эталона или образцового средства измерений угла к объекту исследования [20, 21]. В соответствии с разработанной методикой, при экспериментах определяется группа статических характеристик объекта исследования, которую можно рассматривать как семейство отдельных реализаций зависимости непосредственно измеряемой автоколлиматором величины от задаваемого угла поворота КЭ.

КЭ устанавливается на дистанции 1000 мм от автоколлиматора. Повороты КЭ вокруг координатных осей задаются поворотными столиками (моторизованным и с ручной регулировкой) в диапазоне до 20 угл. мин.

6.1 Последовательность выполнения лабораторной работы «Исследование опико-электронного автоколлиматора при измерении коллимационных углов»

Основные этапы выполнения лабораторной работы:

а) включение и подготовка к исследованию элементов стенда:

1) проверить соединение всех кабелей питания и управления в соответствии со схемой стенда (рисунок 4.1);

2) установить дистанцию измерений $L=1000$ мм (рисунок 4.1);

3) включить ПК, загрузить операционную систему;

4) включить БП для ПИД автоколлиматора;

5) установить значение напряжения БП $U_{II} = 4$ В, при этом показания миллиамперметра будут $I_{II} = 5$ мА;

б) включить БП моторизованного поворотного столика;

б) получение изображения на экране и последующая его обработка в среде LabVIEW:

1) запустить программу управления MEASUREMENT (ярлык на рабочем столе), выполненную в среде LabVIEW;

2) после запуска программы управления открывается лицевая панель (front panel). Лицевая панель включает строку меню, панель инструментов, окно справки и окна настройки (рисунок 5.2) и измерений (рисунок 5.3);

3) в окне настройки выбрать устройство передачи изображения с ТВ камеры автоколлиматора в ПК по интерфейсу USB 2.0 (рисунок 6.1);

4) подключить устройство с помощью кнопки на панели инструментов, изображенной на рисунке 6.2;

5) после подключения устройства в окне настройки в области

вывода видеосигнала получаем изображения марки-диафрагмы излучающего диода на приемном устройстве (КМОП - матрица) с установленным по умолчанию разрешением (2592×1320). Окно настройки программы будет выглядеть, как показано на рисунке 6.3.

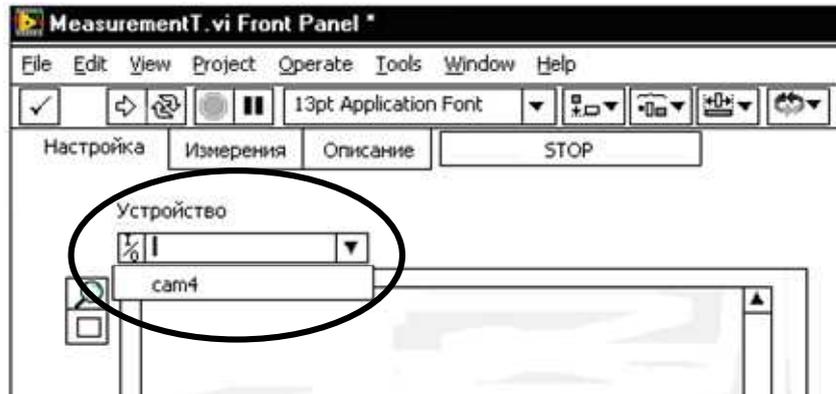


Рисунок 6.1 – Выбор устройства передачи изображения

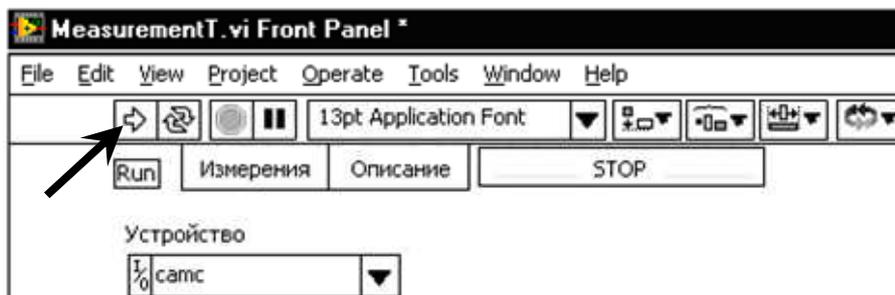


Рисунок 6.2 – Подключение устройства передачи изображения

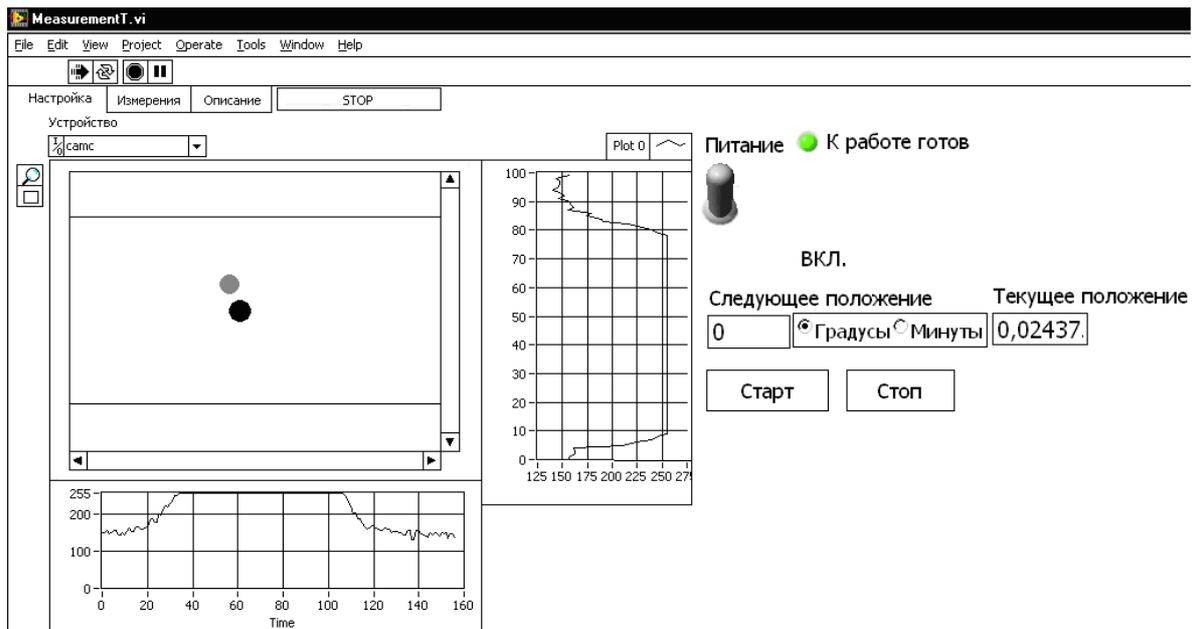


Рисунок 6.3 – Изображение ПИД с разрешением 2592×1320 (инверсное)

В области вывода видеосигнала получим два изображения марки-диафрагмы ПИД. Одно из изображений используется для измерения коллимационного угла, а другое – для угла скручивания.

Регулируя положение КЭ по углу скручивания, сместите (при необходимости) изображение, по которому выполняется измерение угла скручивания, в положение «ниже справа» относительно изображения для измерения коллимационных углов. Если этого не сделать, при измерении коллимационного угла два изображения могут переналожиться.

Графики в дополнительных полях показывают распределение облученности в изображении марки-диафрагмы ПИД в установленных по умолчанию строке и столбце (для установленного по умолчанию разрешения КМОП-матрицы 2592×1320 установлены 1296 столбец и 660 строка).

б) установить тумблер управления питанием моторизованной подвижки в положение «вкл» (рисунок 6.4);

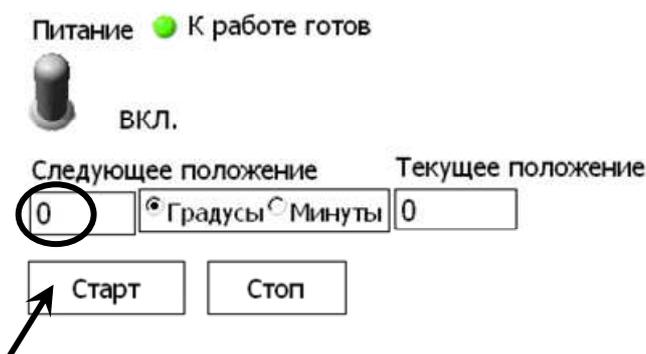


Рисунок 6.4 – Установке нулевого углового положения КЭ по коллимационному углу

7) выставить текущее положение КЭ по коллимационному углу в нулевое положение. Для установки КЭ в нулевое положение необходимо в поле следующее положение выставить «0» и нажать кнопку «старт», при этом в поле «текущее положение», определяющее положение КЭ по углу скручивания в текущий момент, будет отражено нулевое значение (рисунок 6.4);

8) выставить нулевое положение КЭ по углу скручивания по шкале поворотного столика с ручной регулировкой, используемого для задания углов скручивания (рисунки 4.12, 4.13)

9) выбрать в окне «настройка» режим захвата видеокadra соответствующий разрешению 1280×960 (рисунок 6.5);

10) в области вывода видеосигнала выделить области вокруг изображений марки ПИД инструментом выделения □ (рисунок 6.6). При необходимости можно увеличить выделенную область изображения инструментом приближения 🔍. Для снятия увеличения

выбрать команду «zoom to fit» в меню, вызываемом правой кнопкой мыши.



Рисунок 6.5 – Выбор режима захвата видеокадра с разрешением 1280x960

На графиках отображается распределение облученности двух изображений марки-диафрагмы ПИД в центральной строке и столбце выделенных областей изображений (рисунок 6.6). Из графиков видно, что полученные изображения марки, одно из которых используется для измерения коллимационного угла, а другое для угла скручивания, имеют разные максимальные значения облученности. Изображение для измерения коллимационного угла обладает меньшим максимальным значением облученности вследствие малого коэффициента отражения (около 5%) от передней грани КЭ автоколлиматора. Изображение для измерения угла скручивания имеет большую величину облученности.

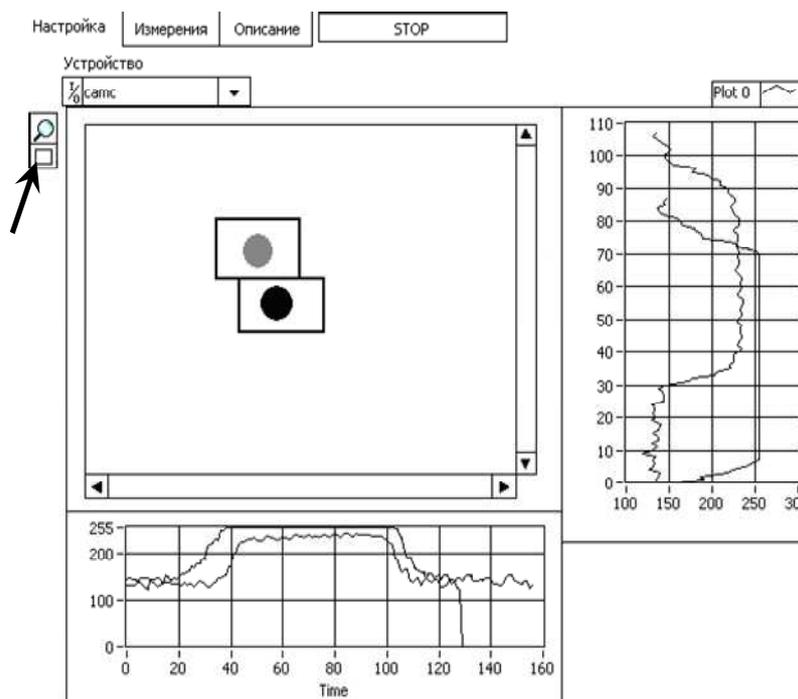


Рисунок 6.6 – Выделение области изображения

11) выделить область вокруг изображения марки-диафрагмы ПИД, используемого для измерения коллимационного угла (рисунок 6.7). На графиках отображается распределение облученности изображения марки ПИД в центральной строке и столбце выделенной области изображения.

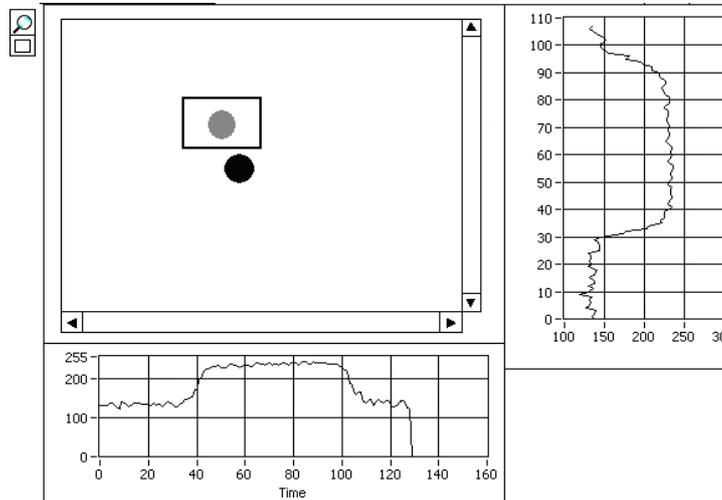


Рисунок 6.7 –Изображение марки-диафрагмы ПИД, получаемое для измерения коллимационного угла (инверсное)

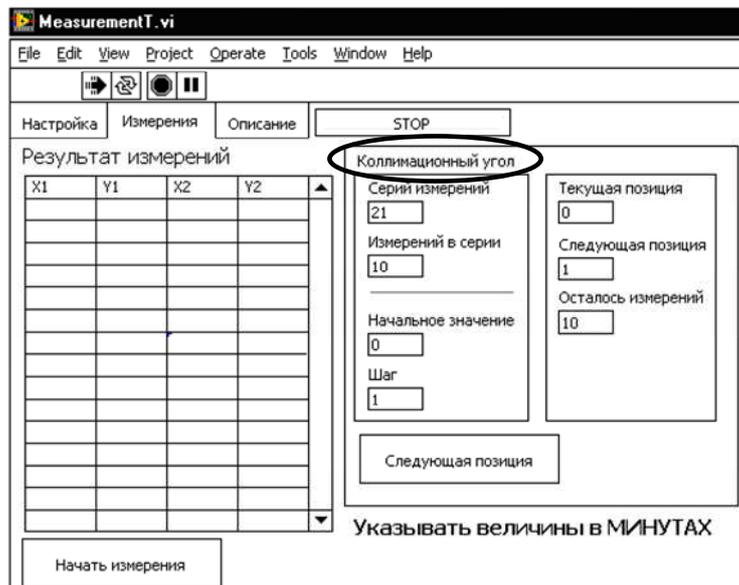


Рисунок 6.8 – Ввод значений количества измерений и углового положения моторизованного столика ПС_м

12) в окне измерений ввести значения количества измерений и углового положения КЭ в полях для коллимационных углов: серий измерений – 21 (соответствует диапазону измерений 0 – 20 минут), измерений в серии – 10, начальное значение – 0 минут, шаг – 1 минута (рисунок 6.8). Поля «текущая позиция», «следующее

позиция», «осталось измерений» заполняются автоматически программой и служат для индикации текущего этапа измерений;

13) запустить измерения нажатием кнопки «начать измерения» (рисунок 6.9). Измеряются координаты энергетического центра изображения ПИД с помощью алгоритма взвешенного суммирования. Результаты выводятся на экран в виде таблицы «Результат измерений»;

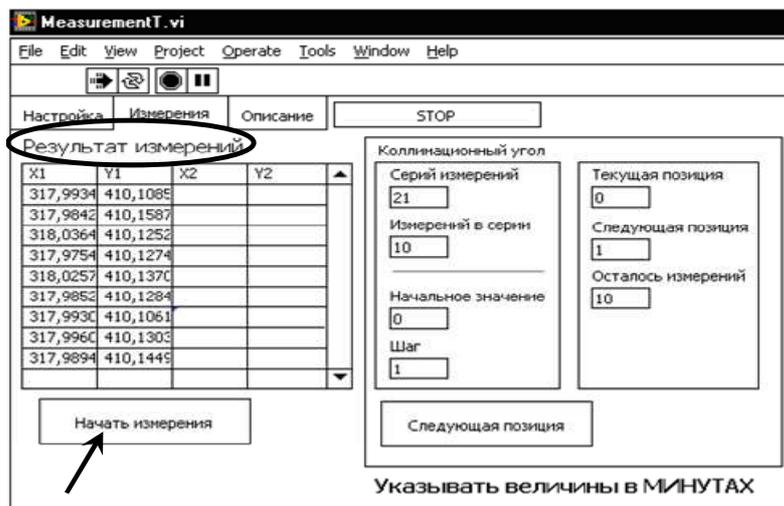


Рисунок 6.9 – Запуск измерений координат энергетического центра изображения марки-диафрагмы ПИД

14) для сохранения результатов измерений в файле формата txt и установки следующей позиции нажать кнопку «следующая позиция» (рисунок 6.10).

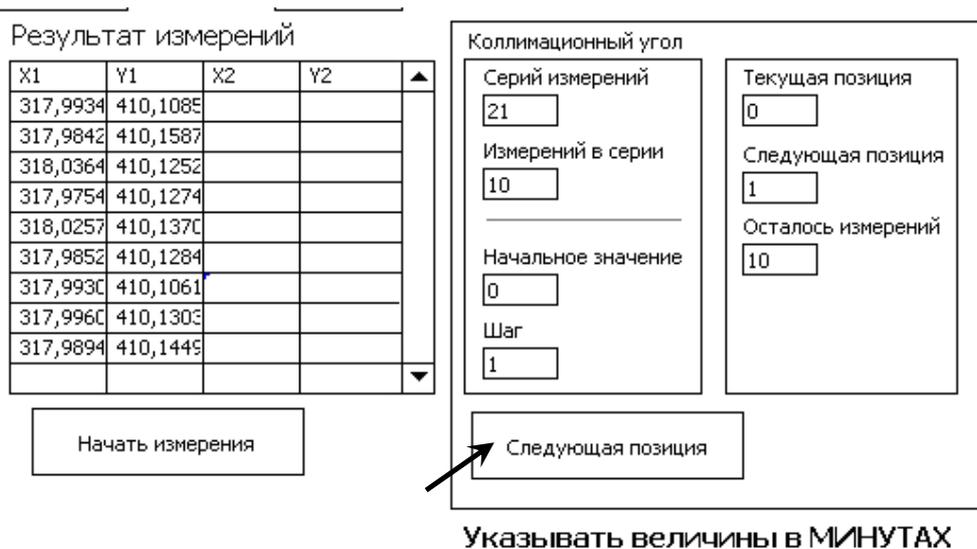


Рисунок 6.10 – Сохранение результатов измерений и установка следующей позиции

При установке следующей позиции происходит автоматический разворот КЭ в следующее контролируемое положение, осуществляемый поворотом моторизованного столика ПС_м вокруг коллимационной оси ОУ на заданный угол Θ_2 , соответствующий шагу измерений. После установки происходит изменение на одну позицию значений в полях текущей и следующей позиции, а также уменьшение значения числа оставшихся серий измерений (рисунок 6.11).

При нажатии кнопки «следующая позиция» также открывается окно выбора места сохранения результатов измерений (рисунок 6.11).

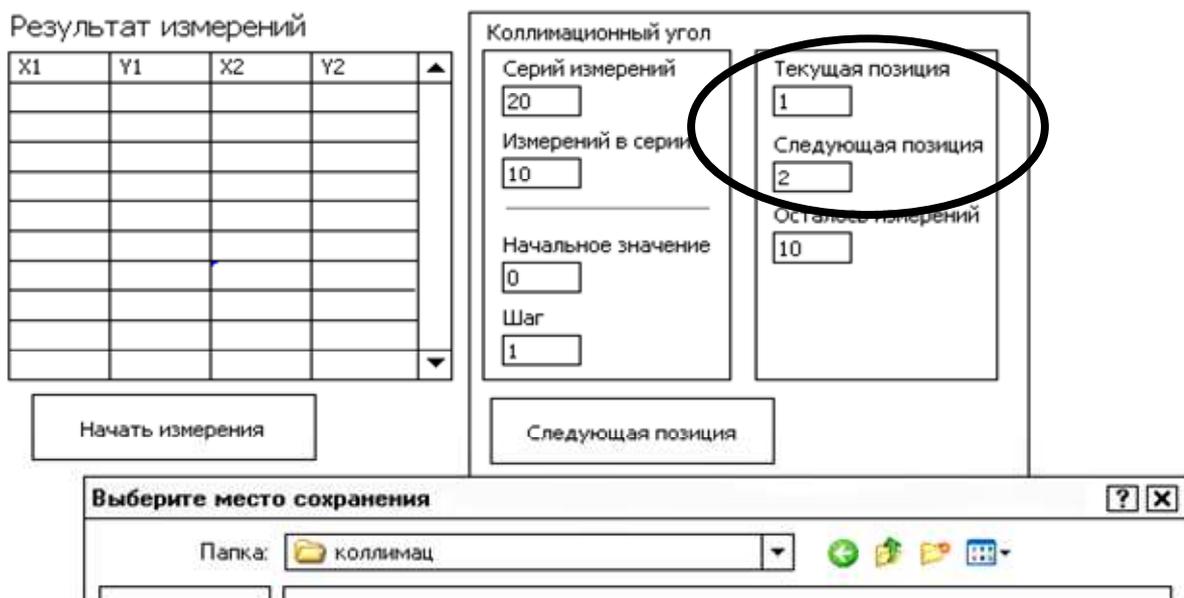


Рисунок 6.11 – Изменение значений позиций и открытие окна выбора места сохранения результатов измерений

15) в окне выбора места сохранения выбрать папку сохранения результатов измерений: рабочий стол/autocollimator/КОЛЛИМАЦ (рисунок 6.12);

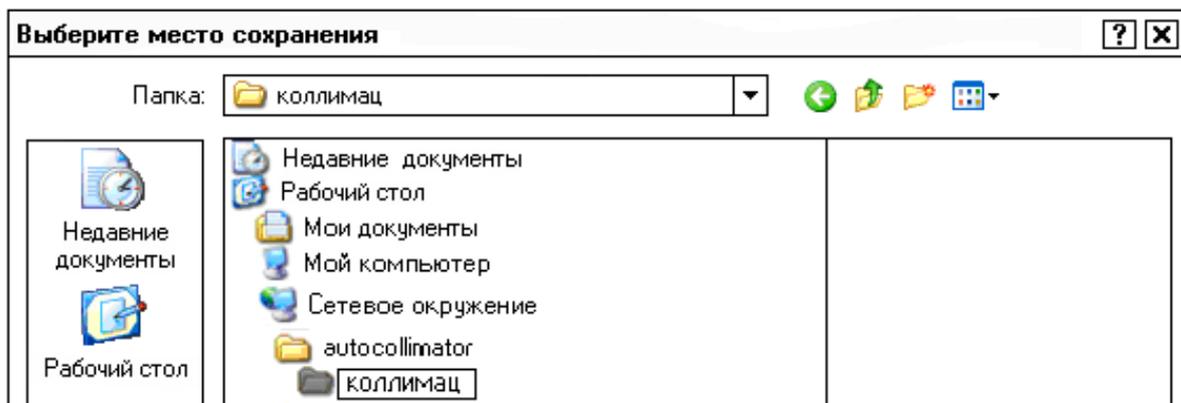


Рисунок 6.12 – Выбор места сохранения файла результатов измерений

16) указать имя сохраняемого файла (по умолчанию имя файла

Pos текущая позиция по коллимационному углу_ текущая позиция по углу скручивания_дата.txt). Формат сохраняемого файла – txt (рисунок 6.13). Для сохранения нажать ОК;

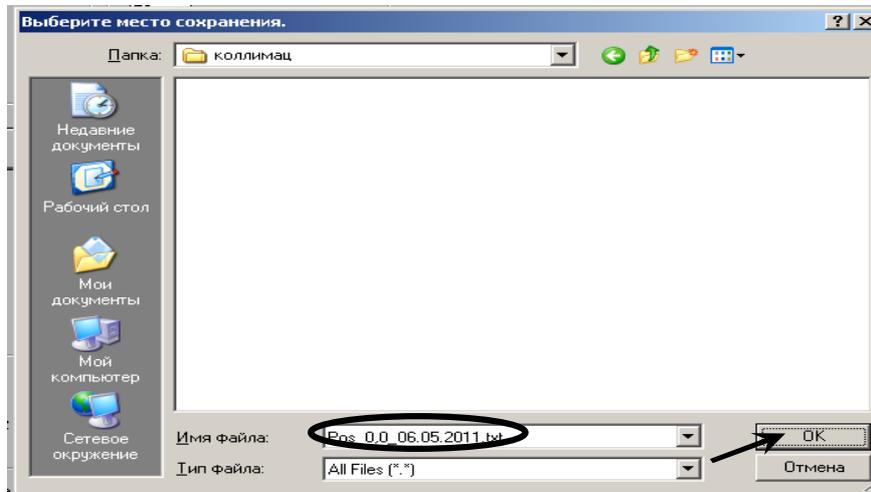


Рисунок 6.13 – Имя сохраняемого файла

17) поворот КЭ приводит к смещению коллимационного изображения ПИД на матрице АК (рисунок 6.14), поэтому для данной серии измерений необходимо в окне настройки в области вывода видеосигнала выделить область вокруг смещенного изображения ПИД аналогично пункту б.10;

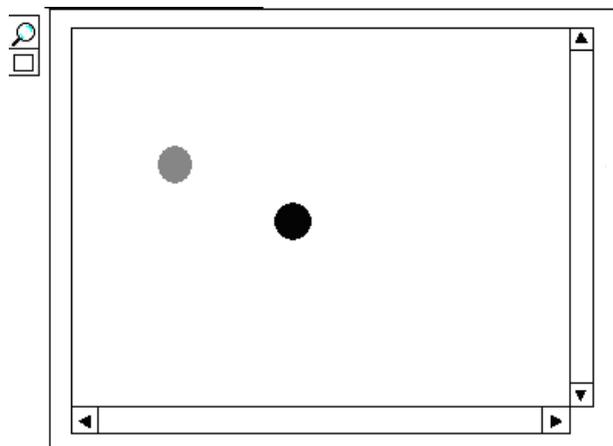


Рисунок 6.14 – Смещение изображения ПИД вызванного поворотом КЭ

18) повторить пункты б.13 – б.17 для оставшихся серий измерений;

19) после проведения всех серий измерений установить текущее положение КЭ по коллимационному углу в нулевое значение (рисунок 6.4)

20) после окончания измерений нажать кнопку «stop» в окне «настройка» для отключения программы управления (рисунок 6.15);

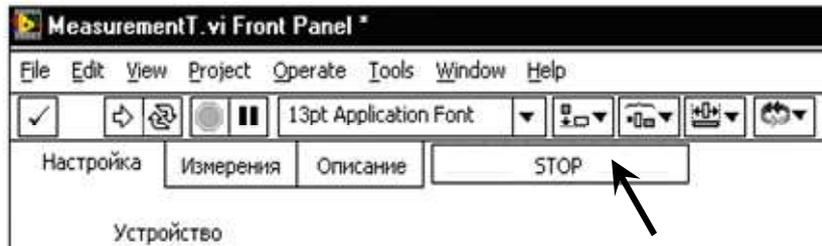


Рисунок 6.15 – Отключение программы управления

в) завершение работы с элементами стенда:

- 1) закрыть программу управления;
- 2) установить значение напряжения БП $U_{II} = 0$ В, при этом показания миллиамперметра будут $I_{II} = 0$ мА;
- 3) выключить БП ПИД и БП ПС_м;
- 4) при необходимости отсоединить кабели питания и управления;

г) определение статической характеристики опико-электронного автоколлиматора для измерения коллимационных углов:

- 1) в результате выполнения пунктов а, б методики проведены измерения, состоящие из 21 серии по 10 отсчетов в каждой. В ходе измерений накапливался массив значений координат X и Y энергетического центра изображения ПИД автоколлиматора. Результаты занести в таблицу 6.1;

Таблица 6.1 – Показания по координате X

№ серии	Поворот КЭ Θ, мин	Координата X, пиксели									
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
1	0										
2	1										
...	...										
21	20										

- 2) показания по координате Y занести в таблицу, имеющую аналогичный вид.

6.2 Последовательность выполнения лабораторной работы «Исследование опико-электронного автоколлиматора при измерении угла скручивания»

Методика экспериментальных исследований опико-электронного автоколлиматора для измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью практически соответствует представленной в подразделе 6.1 методике.

Структура лабораторного стенда соответствует рисунку 4.10.

Проводится 21 серия измерений по 10 отсчетов в каждой в диапазоне

измерений до 20° . Дистанция измерений $L = 1000$ мм.

В области вывода видеосигнала выделяется область вокруг изображения марки-диафрагмы ПИД, используемого для измерения углов скручивания. Это изображение имеет большую облучённостью по сравнению с изображением, используемым при измерениях коллимационных углов – рисунок 6.16..

Значения количества измерений и углового положения КЭ вводятся в полях для угла скручивания (рисунок 6.17).

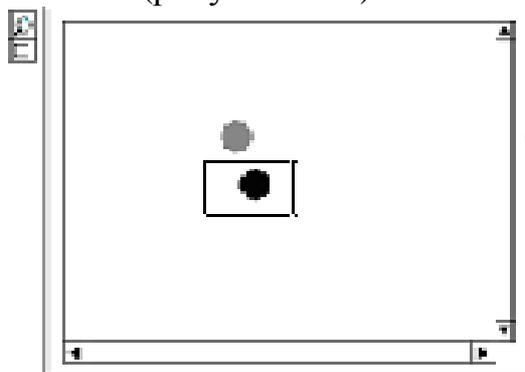


Рисунок 6.16 – Выделение изображения для измерения угла скручивания

При установке следующей позиции происходит изменение на одну позицию значений в полях текущей и следующей позиции, а также уменьшение значения числа оставшихся серий измерений. Разворот КЭ в следующее контролируемое положение, осуществляемый поворотом ПС в ручном режиме вокруг оси скручивания OZ на заданный угол Θ_3 по шкале столика (рисунок 4.13), соответствует шагу измерений.

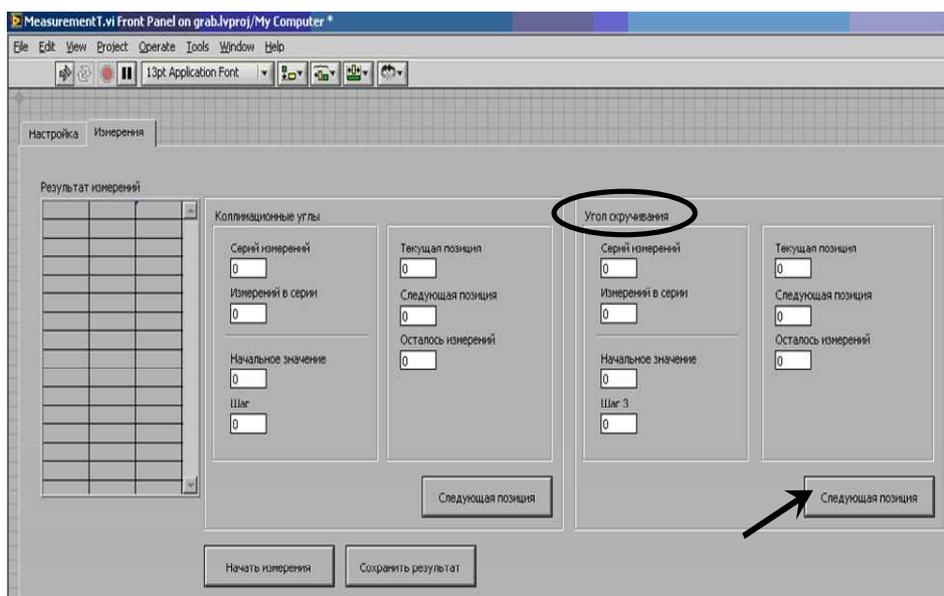


Рисунок 6.17 – Поля количества измерений и углового положения КЭ для углов скручивания

По окончании измерений выставить по шкале поворотного столика

нулевое значение положения КЭ по углу скручивания.

6.3 Методика выполнения лабораторной работы «Исследование трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора»

Методика экспериментальных исследований трехкоординатного автоколлиматора соответствует методике, представленной в подразделах 6.1, 6.2.

Структура лабораторного стенда соответствует рисунку 4.14.

Последовательность выполнения этапов работы.

1. Выполняются исследования автоколлиматора в режиме измерения коллимационных углов по методике, изложенной в подразделе 6.1.

2. Выполняются исследования автоколлиматора в режиме измерения коллимационных углов по методике, изложенной в подразделе 6.2

3. Исследуется работа автоколлиматора при измерении как угла скручивания, так и коллимационных углов.

Проводится 2 группы измерений по 21 серии в каждом. В каждой серии по 10 отсчетов.

В первой группе измерений проводятся измерения угла скручивания по методике, изложенной в подразделе 6.2. Диапазон измерения угла скручивания $20'$ при установке значения коллимационных углов $10'$.

Во второй группе измерений также выполняются измерения угла скручивания в диапазоне $20'$ при установке коллимационного угла Θ_2 равного $20'$.

Измерение угла скручивания при трёх фиксированных значениях угла поворота на коллимационный угол Θ_2 (0, 10 угл. мин, 20 угл.мин.) позволяет исследовать влияние поворотов КЭ на коллимационные углы на измерение угла скручивания. Дистанция измерений $L = 1000$ мм.

Контрольные вопросы

1. Какой фактор позволяет при выборе анализируемого изображения марки-диафрагмы отличить изображение, по которому выполняется измерение коллимационных углов, от изображения для измерения угла скручивания?

2. В чем различие способов задания углов поворота КЭ при исследовании автоколлиматора в режиме измерения коллимационных углов и измерения угла скручивания?

3. Как используются графики, формируемые в дополнительных полях окна вывода изображений на КМОП-матрице (расположены справа и снизу окна вывода изображений)?

4. Последовательностью каких действий выбираются параметры захвата видеокadra с КМОП-матрицы?

5. Перед началом эксперимента два изображения на КМОП-матрице должны быть расположены определённым образом друг относительно друга. Каким образом и почему именно таким?

7 Обработка экспериментальных данных. Анализ результатов эксперимента и оформление отчёта

Определение статической характеристики опико-электронного автоколлиматора для измерения коллимационных углов:

а) в результате выполнения пунктов методики исследования проведены измерения, состоящие из 21 серии по 10 отсчетов в каждой. В ходе измерений накапливался массив значений координат X и Y энергетического центра изображения ПИД автоколлиматора. Показания по координате Y занесены в таблицу 6.1. Таблица для показаний по координате Y имеет аналогичный вид.

б) для каждой серии измерений найти математическое ожидание (средние значения) \bar{X} и \bar{Y} измеренных координат по формулам [21]:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (7.1)$$

где n – число отсчетов в каждой серии измерений, $n=10$; X_i, Y_i – измеренные координаты изображения в серии. Результаты расчётов занести в таблицу 7.1, где значения поворота КЭ записаны в радианах.

Таблица 7.1 – Результаты расчетов по координате X

№ серии	Поворот КЭ, Θ рад	Значения расчетов по координате X				
		\bar{X}	$\bar{\theta}_x$, рад	θ_x , рад	$\Delta_{\Theta x}$, рад	σ_x , рад
1	...					
2	...					
...	...					
21	...					

Результаты расчетов по координате Y занести в аналогичную таблицу.

в) пересчитать линейное перемещение изображения на приемнике, выраженное математическим ожиданием координат энергетического центра, в угловое отклонение отраженного КЭ пучка в радианах по формулам:

$$\bar{\theta}_x = \arctg\left(\frac{\bar{X} \cdot p}{f}\right), \quad \bar{\theta}_y = \arctg\left(\frac{\bar{Y} \cdot p}{f}\right), \quad (7.2)$$

где p – размер пикселя приемника автоколлиматора, f – фокусное расстояние объектива автоколлиматора (263 мм). Результаты расчётов занести в таблицу 7.1;

г) найти параметры статической характеристики автоколлиматора K_{Θ} и a_0 , где K_{Θ} – коэффициент преобразования, который определяется как тангенс угла наклона функции $\bar{\theta}(\Theta)$ (таблица 7.1), a_0 – значения функции

$\bar{\theta}(\Theta)$ при $\Theta = 0$;

д) найти значения статической характеристики K_{Θ} и a_0 автоколлиматора (таблица 7.1) и построить ее график: $\theta(\Theta) = K_{\Theta} \cdot \Theta + a_0$;

$$(7.3)$$

е) найти распределение погрешности измеренного угла поворота:

$$\Delta_{\Theta} = \bar{\theta}(\Theta) - \theta(\Theta); \quad (7.4)$$

ж) определить среднее квадратическое значение погрешности измеренного угла поворота по формулам:

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta_{\Theta xj} - \bar{\Delta}_{\Theta x})^2}}{\sqrt{2N-1}}, \quad (7.5)$$

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (\Delta_{\Theta yj} - \bar{\Delta}_{\Theta y})^2}}{\sqrt{2N-1}}, \quad (7.6)$$

где N – число серий измерений, $N = 21$; $\Delta_{\Theta xj}$ и $\Delta_{\Theta yj}$ – j -я реализация погрешностей (выражение 7.1); $j = 1, \dots, N$; $\bar{\Delta}_{\Theta x}$, $\bar{\Delta}_{\Theta y}$ – среднее значение погрешности в радианах

$$\bar{\Delta}_{\Theta x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta_{\Theta xj}, \quad \bar{\Delta}_{\Theta y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta_{\Theta yj}; \quad (7.7)$$

з) пересчитать СКЗ в угловые секунды;

Обработанные данные экспериментов и выводы по результатам исследований оформляются в виде отчёта по лабораторной работе, включающего следующие разделы (Пример выполнения отчёта приведен далее):

- 1) Цели работы и поставленные задачи исследования
- 2) Схема и описание структуры и параметров лабораторной установки
- 3) Таблицы с результатами измерений и вычислений
- 4) Полученные изображения диафрагмы-марки на матричном фотоприёмнике анализатора автоколлиматора
- 5) Рассчитанные значения коэффициента передачи контрольного элемента и СКЗ погрешности измерения по измеренным углам поворота
- 6) Графики статической характеристики автоколлиматора и случайной погрешности измерения координат по измеренным углам поворота
- 7) Выводы по результатам исследований

Заключение

В пособии общие принципы построения автоколлимационных систем, аналитические модели их функционирования, методики определения метрологических параметров по результатам экспериментов экспериментального исследования рассматриваются в трёх лабораторных работах:

В частности, оптико-электронные системы являются основными компонентами измерительных комплексов, решающих следующие задачи.

- Обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений посредством мониторинга деформаций элементов несущих конструкций, крыш и фундаментов;

- Высокоточная разметка баз при монтаже конструкций, задание системы баз, центровка и согласование осей оборудования, монтажных корабельных и самолётных стапелей, обеспечение выставления элементов собираемых конструкций в номинальное положение;

- Сопровождение процессов изготовления деталей и сборки конструкций;

- Определение главных габаритных измерений кораблей, калибровка наливных танков, геометрическая аттестация гребных винтов;

- Размерная аттестация изготовленных конструкций сложной формы на соответствие проектной документации.

Разделы, относящиеся к методам анализа отражательных систем, методам экспериментального исследования многопараметрических объектов, могут быть рекомендованы аспирантам, занимающимся исследованиями автоколлимационных систем различного назначения.

Пример выполнения отчета по лабораторной работе

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Факультет Прикладной оптики

Отчет по лабораторной работе

Исследование трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания

Выполнил студент: Копылова Т.В.

Группа: В5305

Преподаватель: Коняхин И.А.

1 Цель работы и поставленные задачи исследования

Цель работы: изучить принцип действия трехкоординатного оптико-электронного автоколлиматора (ТОЭА) как системы типовых функциональных звеньев, практически освоить методику определения основных метрологических характеристик автоколлиматора.

Задачи исследования:

- проверка возможности измерения углов скручивания в диапазоне $\pm 25'$ и коллимационных углов в диапазоне до $10'$ на дистанции 1 м;
- снятие статической характеристики автоколлиматора;
- определение погрешности измерения углов скручивания и коллимационных углов,
- определение коэффициента передачи КЭ по измеренным углам.

2 Схема лабораторной установки

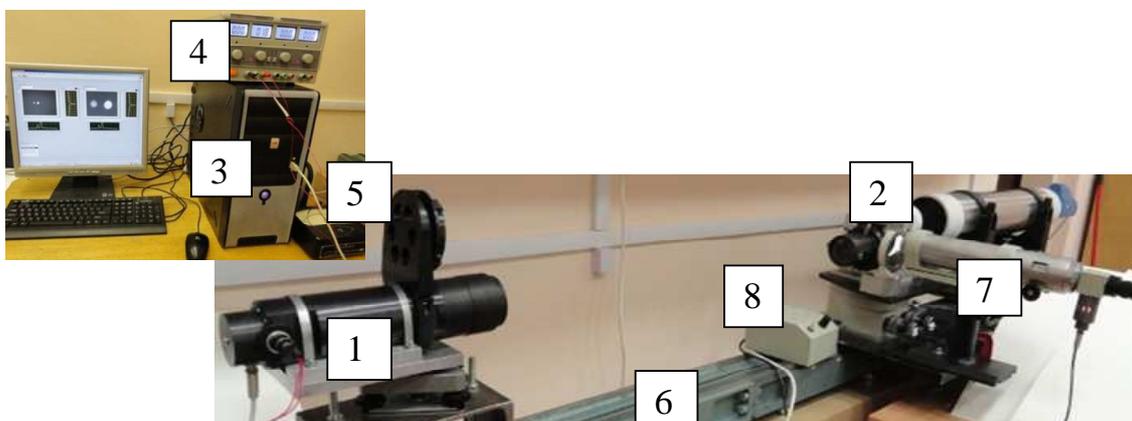


Рисунок 1– Стенд для испытания ТОЭА

В состав представленного стенда входят (рисунок 1):

- автоколлиматор поз.1;
- КЭ в виде тетраэдрического отражателя, установленный на поворотный столик (ПС) поз. 2. ПС позволяет задавать повороты относительно коллимационных осей ОХ, ОУ на углы Θ_1 , Θ_2 и оси скручивания ОZ на угол Θ_3 ;
- персональный компьютер (ПК) поз. 3;
- блок питания источника излучения автоколлиматора поз. 4;
- миллиамперметр поз. 5;
- оптическая скамья ОСК-2 поз. 6;
- визуальный автоколлиматор АКТ-15 с отражателем в виде плоского зеркала поз. 7 для контроля углового положения ПС;
- блок питания источника излучения поз.8 автоколлиматора АКТ-15.

Принцип работы исследуемой системы основан на автоколлимации пучка лучей. Излучение от ПИД, размещенного в фокальной плоскости объектива, распространяется до объекта, где отражается в трипельпризмы

для измерения угла скручивания. После реализации переотражения с помощью плоского зеркала ТОЭА объектив формирует изображения ПИД на матричном фотоприемнике, при этом регистрируемое смещение изображения пропорционально угловому повороту. Для измерения коллимационных углов используется изображение ПИД, полученное отражением от передней грани трипельпризмы. Далее на фотоприемнике происходит преобразование световых сигналов в электрические. Электрические сигналы поступают в ПК, где происходит программная обработка данных.

3 Измерение угла скручивания, погрешность измерений, определение коэффициента преобразования КЭ по скручиванию

Для получения изображения на экране использовалась программа, разработанная в среде LabVIEW. На экране ПК в области вывода видеосигнала получали два изображения марки ПИД (рисунок 2). Для измерений угла скручивания использовали изображение с большей величиной облученности.

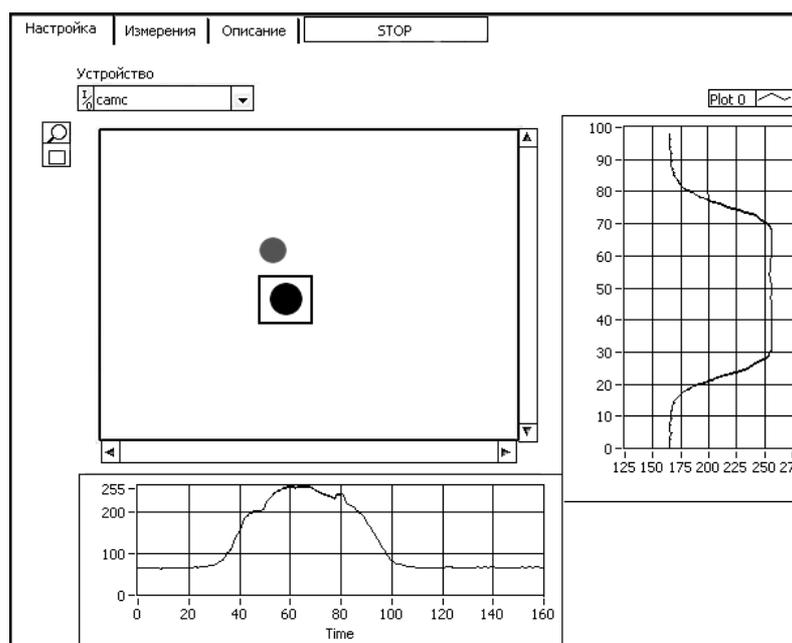


Рисунок 2 – Изображение на КМОП-матрице (инверсное)

Для определения статической характеристики опико-электронного автоколлиматора по углу скручивания измерялись координаты энергетического центра изображения, получаемого в количестве элементов матрицы. Для этого были найдены координаты центра изображения по положению максимального элемента. Далее происходило снятие серии отсчетов и вычисление координат максимального элемента для каждого кадра изображения. В ходе измерений накапливался массив значений координат X и Y энергетического центра изображения ПИД автоколлиматора. Измеренные значения записывались в таблицы 1, 2.

Таблица 1 – Показания по координате X

№ серии	Поворот КЭ на Θ_3 , мин	Координата X, пиксели				
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	-25	393.2485	393.2269	393.2361	393.2646	393.2528
2	-20	407.0488	407.0384	407.0262	407.0323	406.9957
3	-15	420.5403	420.5520	420.5738	420.5514	420.5802
4	-10	434.0667	434.0780	434.1101	434.0725	434.1311
5	-5	447.9850	448.0012	448.0139	448.0006	447.9874
6	0	460.0479	460.0713	460.0739	460.0910	460.1275
7	5	473.1303	473.1309	473.1268	473.1312	473.1245
8	10	486.2032	486.2204	486.2138	486.2169	486.2147
9	15	500.7786	500.7687	500.7812	500.7685	500.7495
10	20	513.4440	513.4982	513.5054	513.4919	513.4967
11	25	527.4047	527.4235	527.4053	527.4490	527.4105

Таблица 2 – Показания по координате Y

№ серии	Поворот КЭ на Θ_3 , мин	Координата Y, пиксели				
		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅
1	-25	475.1644	475.1757	475.1377	475.0966	475.0841
2	-20	475.0200	475.0014	474.9703	474.9218	474.9177
3	-15	474.0465	474.0215	474.0189	474.0330	474.0213
4	-10	473.6667	473.6383	473.6531	473.6635	473.6326
5	-5	473.1862	473.1477	473.1730	473.1444	473.0987
6	0	472.3922	472.4441	472.4527	472.4835	472.4889
7	5	471.8670	471.9021	471.8885	471.8857	471.8783
8	10	471.3030	471.3093	471.3389	471.3099	471.3410
9	15	470.9562	470.9461	470.9831	470.9869	470.9754
10	20	470.2565	470.2399	470.2410	470.2426	470.2698
11	25	470.1864	470.2441	470.2467	470.2262	470.2190

Обработка экспериментальных данных и получение требуемых характеристик для угла скручивания проведены по методике, рассмотренной в разделе 7 учебного пособия. Результаты обработки экспериментальных данных для угла скручивания представлены в таблице 3, где под средним значением измеренной координаты \bar{X} понимается значение, найденное в соответствии с алгоритмом измерения, рассмотренным в подразделе 2.4.

Полученные в ходе выполнения исследований значения коэффициента передачи и среднее квадратическое значение (СКЗ) погрешности измерения угла скручивания представлены в таблице 4.

Таблица 3– Результаты обработки экспериментальных данных

№ сер.	Поворот КЭ на Θ_3 , рад	Среднее значение измеренной координаты \bar{X} , пиксели	$\bar{\theta}_3$, рад	θ_3 , рад	Δ_{Θ_3} , рад	σ_{Θ_3} , рад
1	$-7.2722 \cdot 10^{-3}$	393.2154	$9.0392 \cdot 10^{-3}$	$9.0497 \cdot 10^{-3}$	$-1.0552 \cdot 10^{-5}$	1.072 · 10 ⁻⁵
2	$-5.8178 \cdot 10^{-3}$	407.0319	$9.3568 \cdot 10^{-3}$	$9.3563 \cdot 10^{-3}$	$4.6565 \cdot 10^{-7}$	
3	$-4.3633 \cdot 10^{-3}$	420.5879	$9.6684 \cdot 10^{-3}$	$9.6629 \cdot 10^{-3}$	$5.4939 \cdot 10^{-6}$	
4	$-2.9089 \cdot 10^{-3}$	434.0763	$9.9784 \cdot 10^{-3}$	$9.9695 \cdot 10^{-3}$	$8.9641 \cdot 10^{-6}$	
5	$-1.4544 \cdot 10^{-3}$	447.8631	0.0103	0.0103	$1.9292 \cdot 10^{-5}$	
6	0	460.0836	0.0106	0.0106	$-6.3836 \cdot 10^{-6}$	
7	$1.4544 \cdot 10^{-3}$	473.1564	0.0109	0.0109	$-1.2471 \cdot 10^{-5}$	
8	$2.9089 \cdot 10^{-3}$	486.2554	0.0112	0.0112	$-1.7959 \cdot 10^{-5}$	
9	$4.3633 \cdot 10^{-3}$	500.7667	0.0115	0.0115	$9.0145 \cdot 10^{-6}$	
10	$5.8178 \cdot 10^{-3}$	513.5610	0.0118	0.0118	$-3.48 \cdot 10^{-6}$	
11	$7.2722 \cdot 10^{-3}$	527.3817	0.0121	0.0121	$7.6143 \cdot 10^{-6}$	

Таблица 4 – Результаты измерений

Параметр, единицы измерения	Значение
Диапазон измерений, угл. мин.	± 25
Значение теоретического коэффициента передачи КЭ по скручиванию $K_{\text{теор}}$	0,2
Значение экспериментального коэффициента передачи зеркала K_{Θ_3}	0,211
Среднее квадратическое значение погрешности измеренного угла скручивания σ_{Θ_3} , угл. сек.	2,2

Полученные статические характеристики автоколлиматора и распределение случайной погрешности измерения координат по углу скручивания представлены на рисунках 3 – 5, где $\theta_{sr_3} = \bar{\theta}_3$, $X_{sr} = \bar{X}$.

Приведенные результаты исследования позволяют сделать вывод об эффективности исследуемого оптико-электронного коллиматора для измерения углов скручивания поворота объекта в диапазоне $\pm 25'$, СКЗ погрешности измерения угла скручивания составляет 2,2".

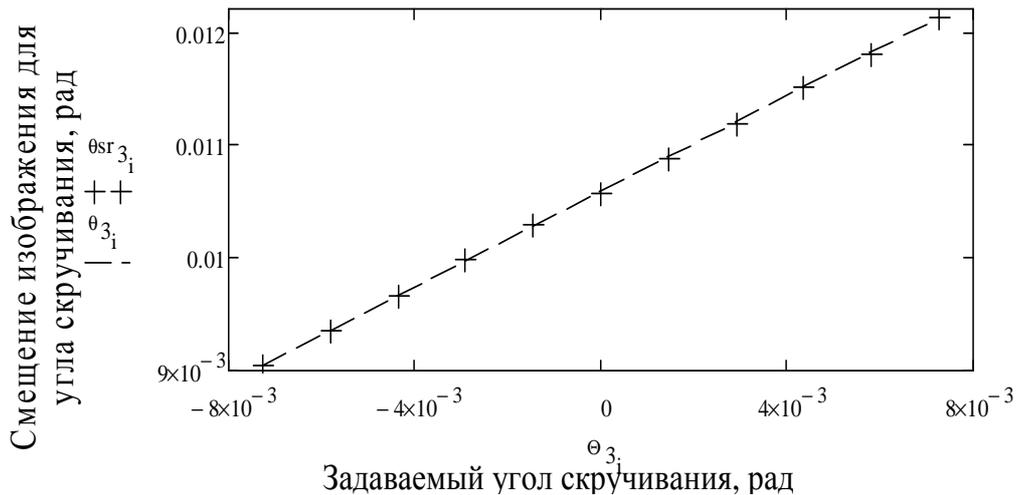


Рисунок 5 – Статическая характеристика ОЭТСКУ по углу скручивания Θ_3

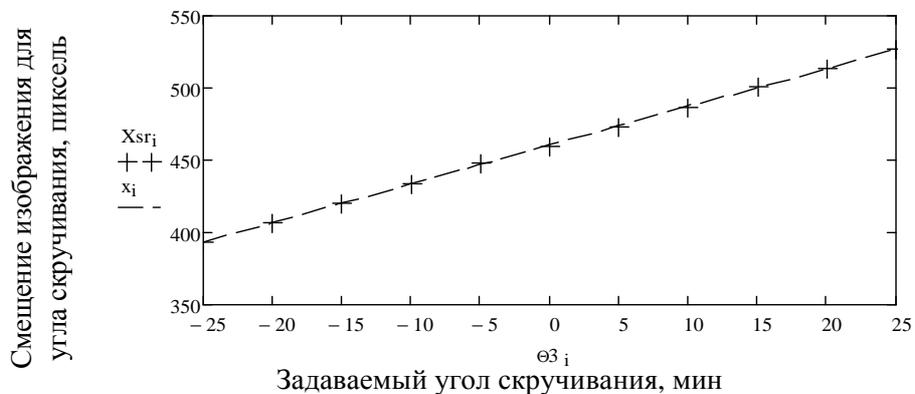


Рисунок 5 – Статическая характеристика ОЭТСКУ по углу скручивания Θ_3

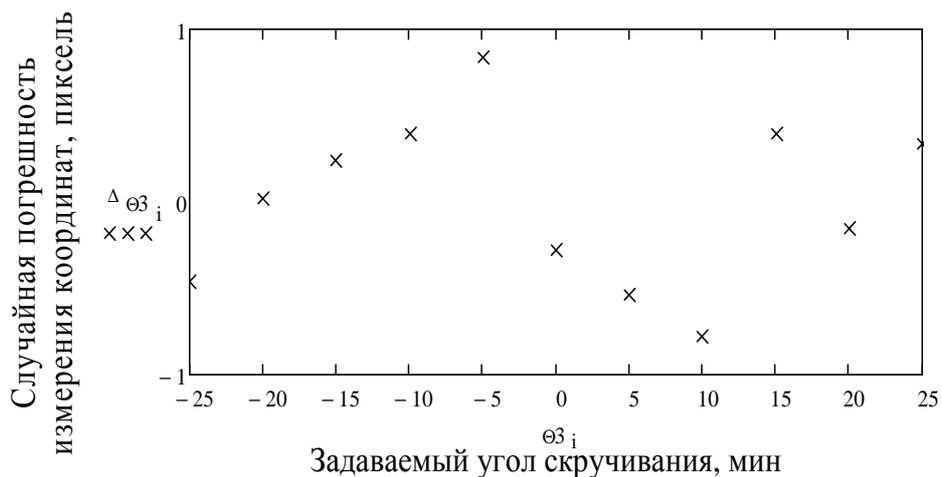


Рисунок 6 – Случайная погрешность измерения координат по углу скручивания Θ_3

4 Измерение коллимационных углов, погрешность измерений

Измерения проводились по части пучка, отраженной от фронтальной

границы ТО как от автоколлимационного зеркала. Измерялись значения для коллимационного угла Θ_2 .

На экране в среде LabVIEW в области вывода видеосигнала получали два изображения марки ПИД (рисунок 7). Для измерения значений коллимационного угла Θ_2 использовалось изображение марки ПИД с меньшей величиной облученности.

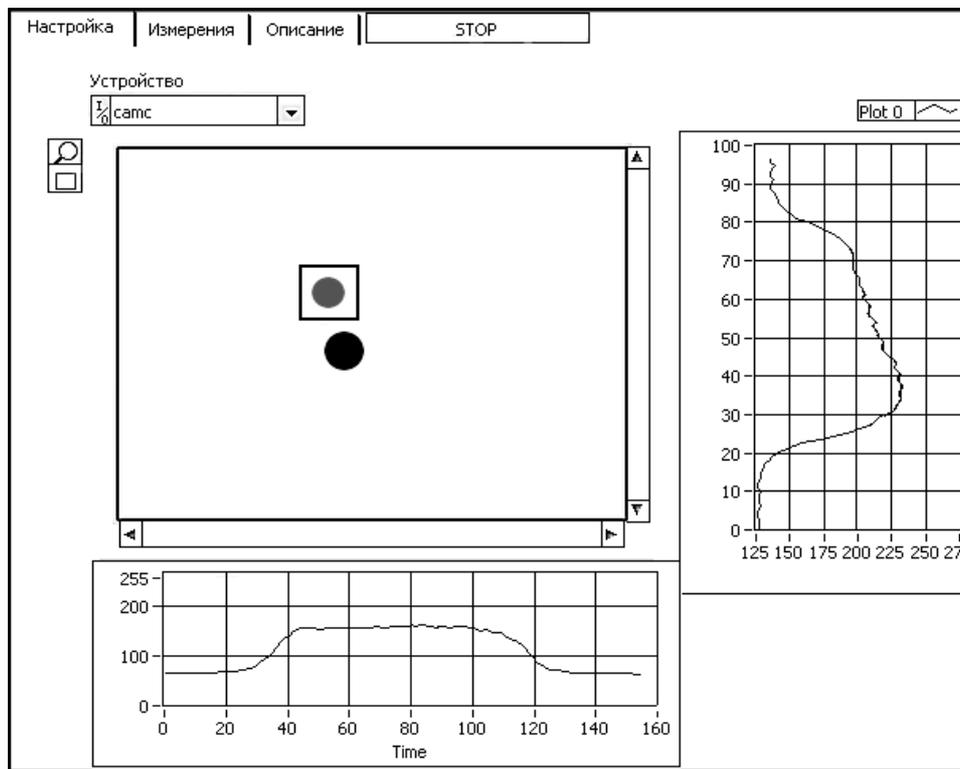


Рисунок 7– Изображение поля зрения (инверсное)

При экспериментальных исследованиях по определению статической характеристики опико-электронного автоколлиматора по коллимационным углам также измерялись координаты энергетического центра соответствующего изображения в количестве элементов матрицы. Для этого были найдены координаты центра изображения по положению максимального элемента. Аналогично измерениям по углу скручивания происходило снятие серии отсчетов и вычисление координат максимального элемента для каждого кадра изображения. В ходе измерений накапливался массив значений координат X и Y энергетического центра изображения ПИД автоколлиматора для коллимационных углов. Измеренные значения записывались в таблицы 5, 6.

Таблица 5 – Показания по координате X

№ серии	Поворот КЭ на Θ_2 , сек	Координата X, пиксели				
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	-60	641.1895	641.1692	641.1727	641.1825	641.1916
2	-110	617.8663	617.8765	617.8577	617.8756	617.8604
3	-158	594.8582	594.8527	594.8472	594.8581	594.8328
4	-206	572.4155	572.4257	572.4069	572.4127	572.4224
5	-256	549.1662	549.1832	549.1514	549.1602	549.1681
6	-306	527.1758	527.1530	527.1631	527.1789	527.1610
7	-358	504.3243	504.3481	504.3298	504.3325	504.3371
8	-406	481.6185	481.6142	481.6200	481.6022	481.6174
9	-456	458.4461	458.4530	458.4732	458.4567	458.4616
10	-505	435.1500	435.1382	435.1221	435.1600	435.1300
11	-555	412.4345	412.4333	412.4385	412.4259	412.4361
12	-604	389.4521	389.4743	389.4598	389.4610	389.4678

Таблица 6 – Показания по координате Y

№ серии	Поворот КЭ на Θ_2 , сек	Координата Y, пиксели				
		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅
1	-60	470.5572	470.5649	470.5361	470.5581	470.5600
2	-110	469.2016	469.2361	469.1996	469.2003	469.2153
3	-158	467.8948	467.9287	467.9019	467.8894	467.9399
4	-206	466.5707	466.5385	466.5940	466.5825	466.5657
5	-256	465.3458	465.3780	465.3718	465.3409	465.3738
6	-306	464.1134	464.0707	464.0441	464.1038	464.0852
7	-358	462.5841	462.5956	462.6107	462.6042	462.6078
8	-406	460.7002	460.7208	460.7380	460.6975	460.7203
9	-456	458.6621	458.6166	458.6166	458.6568	458.6377
10	-505	456.2786	456.2840	456.2482	456.2666	456.2955
11	-555	454.0590	454.0970	454.0650	454.0544	454.0810
12	-604	451.8675	451.9272	451.9176	451.8802	451.9352

Обработка экспериментальных данных и получение требуемых характеристик для угла Θ_2 проводились по методике, рассмотренной в разделе 7 пособия. Результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице 7, где под средним значением измеренной координаты \bar{X} понимается значение, найденное в соответствии с алгоритмом измерения, рассмотренным в подразделах 2.3, 2.4

Таблица 7– Результаты обработки экспериментальных данных

№ сер.	Поворот КЭ на Θ_2 , рад	Среднее значение измеренной координаты \bar{X} , пиксели	$\bar{\theta}_2$, рад	θ_2 , рад	Δ_{Θ_2} , рад	σ_{Θ_2} , рад
1	$-2.9089 \cdot 10^{-4}$	641.1802	0.0147	0.0147	$1.4399 \cdot 10^{-5}$	1,4225·10 ⁻⁵
2	$-5.333 \cdot 10^{-4}$	617.8767	0.0142	0.0141	$8.4706 \cdot 10^{-6}$	
3	$-7.6601 \cdot 10^{-4}$	594.8518	0.0137	0.0136	$-1.2251 \cdot 10^{-5}$	
4	$-9.9872 \cdot 10^{-4}$	572.4149	0.0132	0.0131	$-1.9464 \cdot 10^{-5}$	
5	$-1.2411 \cdot 10^{-3}$	549.1680	0.0126	0.0126	$-2.4114 \cdot 10^{-5}$	
6	$-1.4835 \cdot 10^{-3}$	527.1784	0.0121	0.0121	$1.2524 \cdot 10^{-7}$	
7	$-1.7356 \cdot 10^{-3}$	504.3366	0.0116	0.0115	$2.5959 \cdot 10^{-5}$	
8	$-1.9683 \cdot 10^{-3}$	481.6173	0.0111	0.0110	$1.2227 \cdot 10^{-5}$	
9	$-2.2108 \cdot 10^{-3}$	458.4641	0.0105	0.0105	$9.7045 \cdot 10^{-6}$	
10	$-2.4483 \cdot 10^{-3}$	435.1439	0.01	0.01	$-7.2590 \cdot 10^{-6}$	
11	$-2.6907 \cdot 10^{-3}$	412.4371	$9.481 \cdot 10^{-3}$	$9.4805 \cdot 10^{-3}$	$4.6706 \cdot 10^{-7}$	
12	$-2.9283 \cdot 10^{-3}$	389.4754	$8.9532 \cdot 10^{-3}$	$8.9614 \cdot 10^{-3}$	$-8.2647 \cdot 10^{-6}$	

В ходе выполнения исследований получили значение коэффициента передачи и СКЗ погрешности измеренного угла, представленные в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты измерений

Параметр, единицы измерения	Значение
Диапазон измерений, угл. мин.	10
Значение теоретического коэффициента передачи зеркала $K_{\text{теор}}$	2
Значение экспериментального коэффициента передачи зеркала K_{Θ_2}	2,125
Среднее квадратическое значение погрешности измеренного коллимационного угла σ_{Θ_2} , угл. сек.	3

Также построены графики статической характеристики автоколлиматора (рисунок 8, 9) и распределения случайной погрешности измерения координат по углу Θ_2 (рисунок 10), где $\theta_{sr_2} = \bar{\theta}_2$, $X_{sr} = \bar{X}$.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод об эффективности испытуемого автоколлиматора для измерения коллимационных углов поворота объекта в диапазоне до 10', СКЗ погрешности измерения составляет 3".

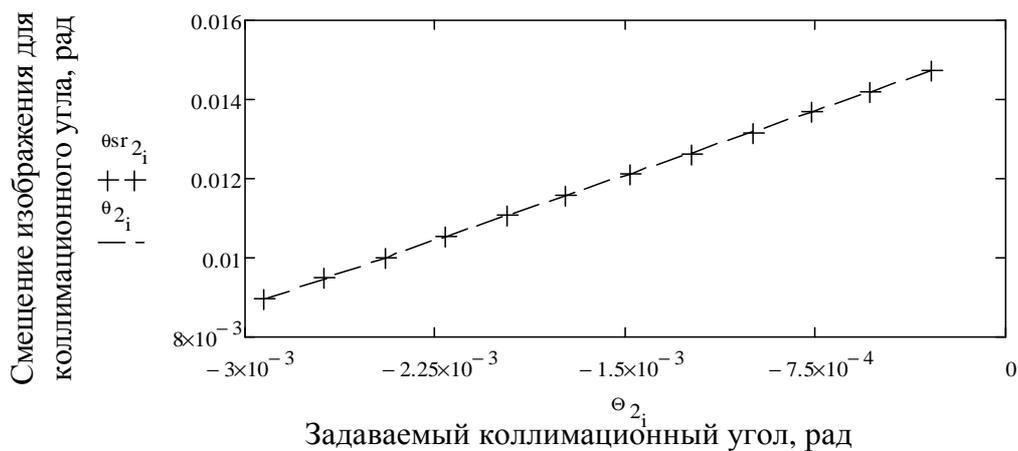


Рисунок 8 – Статическая характеристика ОЭТСКУ по углу Θ_2

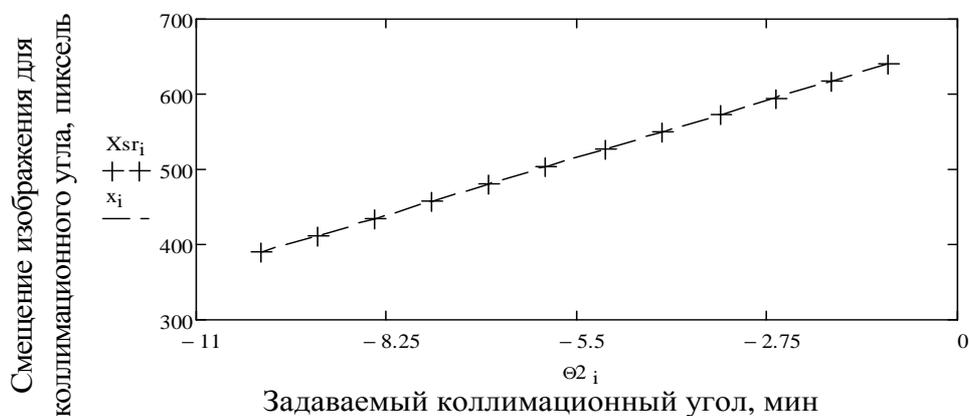


Рисунок 9 – Статическая характеристика ОЭТСКУ по углу Θ_2

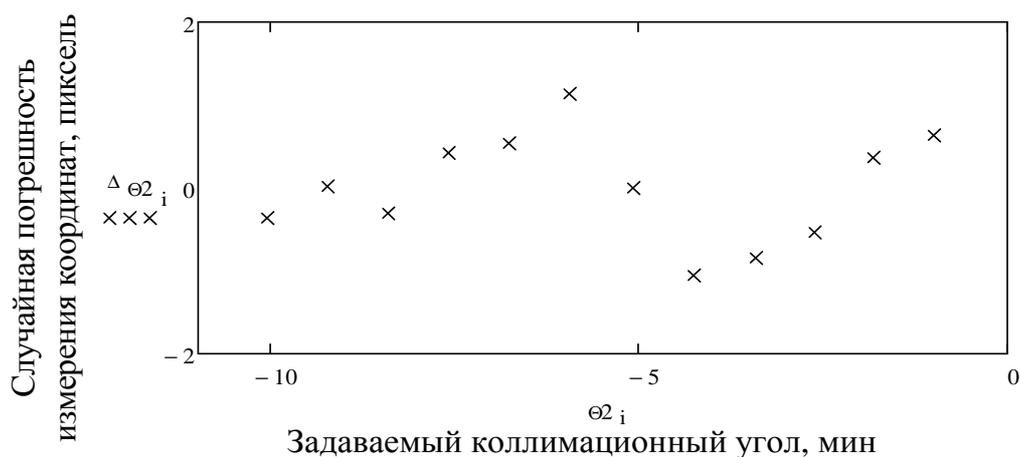


Рисунок 10 – Случайная погрешность измерения координат по углу Θ_2

Аналогичные измерения были проведены по измерению коллимационного угла Θ_1 . Были получены те же значения погрешностей и коэффициента преобразования ТО.

5 Выводы по работе

Исследуемый трехкоординатный автоколлиматор обеспечивает:

- измерение параметров углового пространственного положения объектов с помощью КЭ в виде тетраэдрического отражателя с коэффициентами передачи $K=2$ и $K=0,2$ между углом поворота КЭ соответственно на коллимационные углы и угол скручивания и отклонением отраженного пучка от первоначального направления;
- измерения трех угловых координат контролируемого объекта;
- измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность испытуемого ТОЭА в проведении независимых измерениях угла скручивания в диапазоне $\pm 25'$ с погрешностью $2,2''$, а также измерениях коллимационных углов в диапазоне до $10'$ с погрешность $3''$.

Исследуемая система может облегчить решение современных проблем, стоящих перед приборостроением в области создания высокоточных систем контроля углового пространственного положения исследуемого объекта.

Результаты проводимых исследований могут быть использованы в следующих областях приборостроения:

- измерения угловых деформаций образцов и моделей при испытаниях новых материалов и изделий, при выполнении производственных операций по обработке крупногабаритных деталей;
- измерение угловых деформаций оснований, опорных плит, несущих элементов и направляющих крупногабаритных производственных установок для уменьшения погрешностей их функционирования;
- контроль точности сопряжения и взаимного расположения частей и блоков в процессе монтажа и при работе оборудования в строительстве, энергетике, промышленных производствах, машиностроении и приборостроении;
- оперативный контроль деформаций и прогибов нагруженных элементов промышленных сооружений и энергетических установок.

Список использованной литературы

- 1 TriAngle® electronic autocollimator [Электронный ресурс] // TRIOPTICS [Официальный сайт]. URL: <http://www.trioptics.com/triangle/description.php> (дата обращения: 24.12.2015).
- 2 Цифровой двухкоординатный автоколлиматор с разрешением 0.001 угловой секунды [Электронный ресурс] // Оптротех: оптические цифровые измерительные системы [Официальный сайт]. URL: <http://www.optrotech.ru/issl3.php> (дата обращения: 24.12.2015).
- 3 Electronische autokollimatoren [Электронный ресурс] // Möller-Wedel Optical International [Официальный сайт]. URL: <http://www.moeller-wedel-optical.com/produkte/elektronische-autokollimatoren> (дата обращения: 24.12.2015).
- 4 Автоколлиматор Ultra [Электронный ресурс] // Taylor Hobson Ltd [Официальный сайт]. URL: <http://taylor-hobson.ru/katalog-produktsii/avtokollimator-ultra.html> (дата обращения: 24.12.2015).
- 5 Коняхин И.А., Панков Э.Д. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник, - М.:Недра, 1991.-224 с
- 6 А.Н. Джабиев, И.А. Коняхин, Э.Д. Панков. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. – СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2000 – 197 с
- 7 Баран П.И. Геодезические работы при монтаже и эксплуатации оборудования. – М.:Недра, 1990. – 233 с.:ил.
- 8 Granino A. Korn and Theresa M. Korn, [Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review], Dover Publications, New York, 1152, 2000.
- 9 Коняхин И. А., Панков Э. Д. Трехкоординатный автоколлиматор — ОМП, 1980, № 3, с. 19.
- 10 Коняхин И.А., Тургалиева Т.В. Трехкоординатный цифровой автоколлиматор //Оптический журнал, том.80, №12, 2013. с 74-81
- 11 Коняхин И.А., Копылова Т.В. Оптико-электронная автоколлимационная система инвариантного измерения угла скручивания //Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, 2011. 5 (75). – С. 11-13.
- 12 Коняхин И. А., Панков Э. Д. Трехкоординатный автоколлиматор повышенной точности — ОМП, 1982, № 8, с. 41.
- 13 Коняхин И.А., Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью автоколлиматор для измерения угла скручивания // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, 2010. 6 (70). – С. 9-11
- 14 Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 237 с.

15 Спецификация мегапиксельных ТВ камеры USB 2.0 фирмы ООО «ЭВС» [Электронный документ]. – Режим доступа http://www.evs.ru/d_sheet/VEA-VEI-535.pdf

16 Большой моторизованный поворотный столик 8MR190-90-4247 фирмы Standa [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=325&prod=motorized_rotation_stage

17 Микрошаговый контроллер (USB интерфейс) 8SMC1-USBhF-B1-1 фирмы Standa [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=175&prod=microstep_driver_usb_interface

18 Васильев А.С., Лашманов О.Ю. Основы программирования в среде . СРБЖ: Университет ИТМО, 2015 – 82 с..

19 Жуков Д.В., Коняхин И.А., Усик А.А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптический журнал, том.76, №1, 2009, с 43-45.

20 Высокоточные угловые измерения/Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин, Э.Д. Панков. Под ред. Ю.Г. Якушенкова, М.: Машиностроение, 1987 - 480 с.

21 ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений, М.: Стандартинформ, 2019

Список рекомендуемой литературы

1. Гончаров Н.А., "Обзор современной углоизмерительной техники," // Научно-технический журнал Фотоника, Т. 1, № 43, 2014. С. 64-72.

2. Бондаренко И.Д. Принцип построения апоэлектрических автоколлиматоров. Мн.: изд-во "Университетское", 1984. 190 с

3. Королев А.Н., Гарцуев А.И., Полищук Г.С., and Трегуб В.П., "Цифровой автоколлиматор," // Оптический журнал, Vol. 76, No. 10, 2009. pp. 42 – 47

4. Погарев Г.В., Киселев Н.Г. Оптические юстировочные задачи: Справочник- 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1989. 260 с.

5. Процко С.В., Хапалюк А.П., "Отражатели в форме зеркально-симметричных углов," // Изв. вузов. Приборостроение, Т. 27, № 12, 1984. С. 53—57.

Коняхин Игорь Алексеевич, Тургалиева Татьяна Валерьевна

**Экспериментальное исследование информационно-
измерительных оптико-электронных систем
(углоизмерительные автоколлиматоры)**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49