

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»



На правах рукописи

Потанин Юрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ
НА БАЗЕ МЕХАНИЗМА С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ
С ЦЕЛЮ ОБЪЕДИНЕНИЯ ФУНКЦИЙ КОММУТАЦИИ И
АВТОЮСТИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические
системы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Кобзев Александр Архипович

Владимир – 2015

Оглавление

	Стр.
Введение.....	4
Глава 1. Анализ устройств управления положением оптической оси.....	13
1.1. Обзор приводов оптических систем и систем управления положением оптической оси.....	13
1.2. Обзор механизмов с параллельной кинематикой.....	28
1.3. Требования к разрабатываемому оптическому коммутатору.....	32
1.4. Результаты, выводы и постановка задачи.....	40
Глава 2. Разработка исполнительного механизма оптического коммутатора с параллельной кинематикой.....	41
2.1. Обоснование и выбор кинематической структуры исполнительного механизма оптического коммутатора.....	41
2.2. Кинематика исполнительного механизма оптического коммутатора.....	47
2.3. Динамика исполнительного механизма оптического коммутатора....	55
2.4. Моделирование исполнительного механизма оптического коммутатора.....	65
2.5. Результаты и выводы.....	70
Глава 3. Структура системы и алгоритмы управления оптическим коммутатором.....	71
3.1. Структура системы оптического коммутатора.....	71
3.2. Алгоритмы управления оптическим коммутатором.....	76
3.2.1. Система главной обратной связи.....	76
3.2.2. Алгоритм вычисления массовых центров световых пятен.....	81
3.2.3. Алгоритм автоюстировки излучения.....	83
3.2.4. Моделирование алгоритма автоюстировки излучения.....	93
3.2.5. Оценка точности системы обратной связи.....	95
3.3. Система приводов оптического коммутатора и программное обеспечение контроллера.....	98

3.4. Программная реализация алгоритмов управления оптическим коммутатором.....	103
3.5. Результаты и выводы.....	114
Глава 4. Экспериментальные исследования оптического коммутатора.....	115
4.1. Описание экспериментального стенда.....	115
4.2. Результаты экспериментальных исследований.....	120
4.2.1 Исследование режима автоюстировки.....	120
4.2.2 Исследование повышения эффективности оптической системы с оптическим коммутатором.....	128
4.2.3 Эксперименты по поднятию частоты коммутации излучения.....	132
4.3. Результаты и выводы.....	135
Заключение.....	136
Список литературы.....	138
Приложение А. Исходный текст программы PreLoad.m.....	147
Приложение Б. Исходный текст программы AutoAlign.m.....	150
Приложение В. Программа пользователя контроллера системы приводов MCC_test_main.mcc.....	154
Приложение Г. Методика испытаний оптического коммутатора.....	162
Приложение Д. Световые пятна, наблюдавшиеся IP-камерой на диффузном экране.....	170
Приложение Е. Акт о внедрении результатов диссертационной работы.....	179
Приложение Ж. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	181

Введение

Актуальность работы

В области юстировки оптических элементов в частности, и сфере управления положением оптической оси в целом, можно выделить примечательную тенденцию: оснащение оптики приводами и автоматизация управления её положением. Зачастую, серийные устройства позиционирования оптических элементов (устройства управления пространственным положением светового луча) реализуют только угловое либо линейное позиционирование, и вся оптическая система строится на базе комбинации таких элементов. Показателем спроса на данное решение является объем предложения, представленный такими фирмами-производителями моторизованной оптомеханики, как Standa и PI-Micos.

Наряду с подходом, описанным выше, вызывает интерес разработка мехатронной системы [46] - устройства, способного заменить собой целый ряд приводных элементов оптомеханики, и являющегося универсальным устройством управления пространственным положением оси оптического излучения.

Обладая значительными перемещениями по определенным степеням подвижности и высокой скоростью, такое устройство может найти применение в специфических оптических системах. Например, в системах, обладающих набором излучателей, разрабатываемое устройство может служить оптическим коммутатором, осуществляющим переключение между излучателями для дальнейшего попадания их излучения на объект воздействия. Данный эффект достигается позиционированием оптического элемента, например призмы, поочередно коммутирующей излучатели на общую оптическую ось. Существующие образцы оптических коммутаторов являются, зачастую, одноосевыми приводами оптического элемента.

Научно-техническими проблемами создания устройств коммутации активно занимались НПО «Астрофизика» и холдинг «Швабе» в целом, ФКП «ГЛП «Радуга», МГТУ им. Н. Э. Баумана, ОАО «НПП Геофизика-Космос», ОАО «СКБ Приборостроения и Автоматики».

Одним из основных условий корректного функционирования описанных выше оптических систем является пролегание оптических осей всех излучателей через целевую точку, в которой располагается объект воздействия излучения. Поскольку излучатели могут быть подвержены влиянию различных негативных факторов, их оптические оси могут претерпевать разъюстировки – угловые смещения относительно эталонного положения. Основными факторами, вызывающими разъюстировку, являются:

1. Динамика климатических условий - приводит к тепловому расширению оптических элементов излучателя.
2. Вибрация - приводит к деформациям конструкции излучателя.
3. Интенсивный процесс работы - приводит к нагреву оптических элементов излучателя и их тепловому расширению.

Разъюстировки излучателей приводят к тому, что их оптические оси перестают пролегать через единую целевую точку и излучение не попадает на объект воздействия или попадает не полностью.

Существует подход к компенсации разъюстировок – введение в каждый излучатель дополнительных юстирующих элементов, например оптических клиньев, для возможности компенсации угловых смещений оптических осей. Структура такой оптической системы имеет вид, приведенный на рисунке 1.

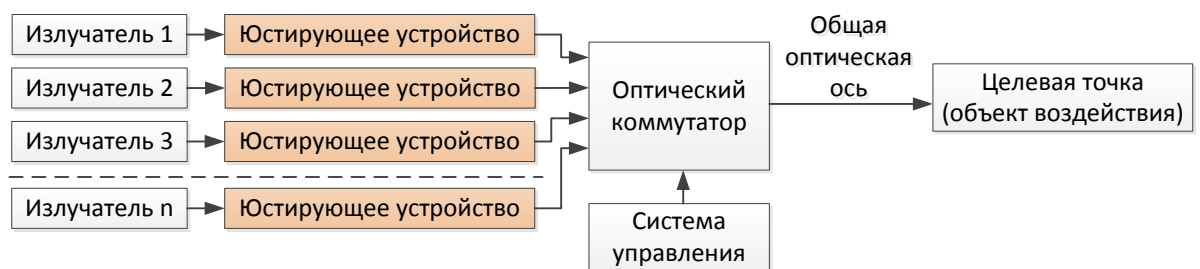


Рисунок 1 – Структура оптической системы с набором излучателей

Недостатками изображенной на рисунке 1 системы является:

1. Снижение эффективности излучения вследствие рассеяния его части на юстирующем устройстве (например, на гранях оптических клиньев). Опыт работ

ФКП «ГЛП «Радуга» (г. Радужный) показывает, что на юстирующем устройстве, состоящем из двух оптических клиньев, может рассеяться до 5-20% энергии.

2. Усложнение и удорожание системы пропорционально количеству излучателей вследствие наличия юстирующих устройств на каждом из них.

3. Значительные затраты времени на индивидуальную юстировку излучателей.

Актуальной научно-технической задачей является перенос функции юстировки в оптический коммутатор. Данное решение позволит удалить из оптической системы излишние юстирующие устройства, исключить потери излучения в них и повысить общую эффективность оптической системы, заключающуюся в повышении интенсивности излучения при том же уровне мощности излучателей.

Кроме того вызывает интерес реализация режима автоюстировки, позволяющего оптическому коммутатору определять степень отклонения оси излучения от необходимого направления и автоматически компенсировать его. Данная цель может быть достигнута введением визуальной главной обратной по положению оптической оси в пространстве, базирующейся на видеосистеме.

Наличие набора излучателей в системе и потенциальная вероятность разъюстировки каждого из них на случайный угол в произвольной плоскости диктует необходимость базирования коммутатора на многоосевой системе, поскольку для компенсации широкого спектра разъюстировок необходимо перемещение и ориентирование призмы сразу по нескольким степеням подвижности. Исходя из требований к количеству степеней подвижности оптического коммутатора, а также точности и скорости позиционирования призмы, было принято решение о базировании оптического коммутатора на механизме с параллельной кинематикой, причем на его подвижной платформе располагается обособленный привод призмы.

Структура разрабатываемой мехатронной системы - оптического коммутатора приведена на рисунке 2.

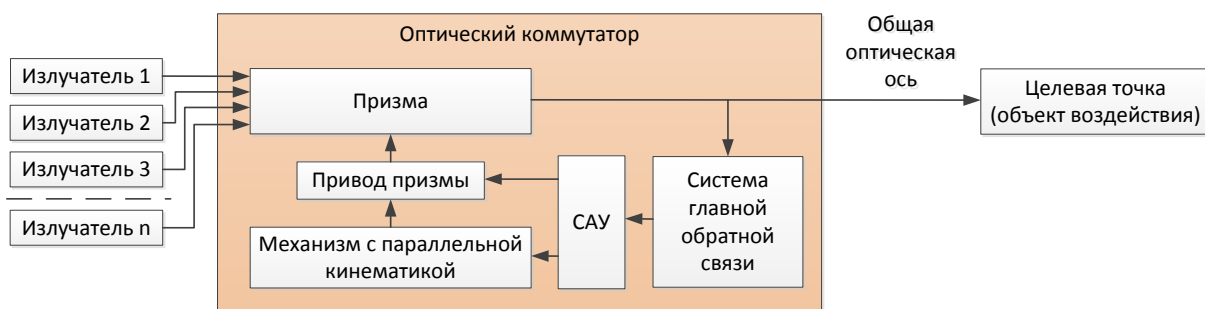


Рисунок 2 – Структура разрабатываемого оптического коммутатора
в составе оптической системы

Функции коммутации и автоюстировки оптического излучения представляют интерес в части их синергетического объединения в одну операцию. Так, при мультиплексировании излучения набора излучателей, коммутатор одновременно осуществляет два действия:

1. Позиционирует призму с помощью отдельного привода с целью коммутации источников излучения на общую оптическую ось.
2. Позиционирует и ориентирует призму с помощью механизма с параллельной кинематикой таким образом, чтобы компенсировать разъюстировки излучателя и направить излучение в необходимую целевую точку.

Приведенные выше действия позволят компенсировать отклонения осей излучателей, возникающие под действием вибрации, климатических факторов и т.д. и сделать оптическую систему, в целом, более устойчивой к их влиянию.

Областью применения оптического коммутатора могут являться многопостовые стенды, например технологические комплексы, использующие единый источник излучения и несколько рабочих постов, оптически соединенных с источником [7]. В таких комплексах оптический коммутатор соединен своим «входом» с единым для всего стенда источником излучения, а «выходами» - с отдельными постами на которых излучение применяется узкоспециально. В этом случае оптический коммутатор представляет собой «демультиплексор» оптического излучения. Переключение излучения между постами происходит достаточно быстро. В случае промышленного характера стенда, применение многопостового принципа на базе коммутатора способно свести к минимуму

затраты времени на смену изделий и технологические переходы, свойственные единому универсальному стенду. При этом система управления коммутатором обязана обеспечивать диспетчерские функции, а также распределять ресурсы источника излучения по запросам технологических постов [32].

Коммутатор также может выступать в роли «мультиплексора» оптического излучения. Примером может служить универсальный технологический стенд, способный производить широкий спектр операций металлообработки посредством переключения между двумя источниками когерентного оптического излучения, с высокой и низкой плотностью мощности, рассчитанными на проведение операций гравировки и сварки соответственно [7]. Сходное применение оптического коммутатора будет в универсальном стенде для обработки различных материалов (металл, пластик) с использованием нескольких источников излучения: с длиной волны 1,06 мкм для обработки металла и 10,6 мкм для обработки многих видов пластика [59]. Высокая скорость мультиплексирования источников излучения коммутатором позволит писать единые программы обработки, включающие в себя несколько технологических операций, а также позволит обрабатывать детали с комбинацией материалов в своем составе без переналадки заготовки на другие станки.

Синергетическое объединение коммутации и автоюстировки излучения в разрабатываемой мехатронной системе [62] позволит исключить из оптических установок излишние юстировочные устройства, т.е. повысить их эффективность, поэтому задача разработки такой мехатронной системы – оптического коммутатора имеет научное и практическое значение и является актуальной.

Цель работы

Повышение эффективности оптических систем с набором излучателей и исключение из них излишних юстирующих элементов посредством разработки мехатронной системы – оптического коммутатора на базе механизма с параллельной кинематикой, объединяющего в себе функции коммутации и автоюстировки излучения.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбор кинематической структуры оптического коммутатора и анализ кинематики его механизма.
2. Разработка алгоритма автоюстировки излучения и системы главной обратной связи по положению оси излучения.
3. Разработка компьютерной программы управления коммутатором и программы контроллера системы приводов.
4. Моделирование алгоритма автоюстировки излучения и механизма с параллельной кинематикой.
5. Проведение экспериментальных исследований оптического коммутатора.

Объект исследования

Оптический коммутатор на базе механизма с параллельной кинематикой.

Научная новизна результатов проведенного исследования

Научная новизна состоит в следующем:

1. Предложено синергетическое объединение функций коммутации и автоюстировки излучения в едином устройстве – оптическом коммутаторе на базе механизма с параллельной кинематикой.
2. Введена визуальная главная обратная связь в мехатронной системе автоюстировки излучения установок с набором излучателей, построенная на скоростной видеосистеме.
3. Предложен алгоритм автоюстировки излучения, основанный на законах геометрической оптики, позволяющий оптическому коммутатору реализовать компенсацию угловых разъюстировок излучателей оптических систем.

Практическая значимость результатов диссертации

Применение коммутатора в качестве мультиплексора излучения в универсальных технологических и исследовательских установках, позволит производить высокоскоростную коммутацию источников излучения с их одновременной автоюстировкой, компенсирующей негативное воздействие климатических, вибрационных и прочих факторов. В таких установках

коммутатор может заменить собой ряд юстировочных оптических элементов, вносящих неизбежное затухание излучения. Результатом явится повышение КПД оптического тракта и упрощение конструкции оптической системы.

Разработанные в рамках диссертации компьютерные модели и программы могут использоваться инжиниринговыми организациями на стадии разработки и моделирования мехатронных систем [16] с параллельной кинематикой.

Материалы диссертации могут быть полезны работникам отраслей науки и производства, относящихся к области мехатроники в целом и сферы управления перемещением оптических элементов в частности.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Объединение функций коммутации и юстировки излучения в оптическом коммутаторе, созданном на базе многоосевого механизма с параллельной кинематикой.
2. Построение системы главной обратной связи по положению оптической оси излучения на основе скоростной видеосистемы.
3. Алгоритм автоюстировки излучения, действующий на основе главной обратной связи по положению оси излучения.
4. Компьютерная программа управления оптическим коммутатором и программа пользователя контроллера системы приводов.
5. Результаты моделирования элементов оптического коммутатора и результаты его экспериментальных исследований в составе оптической системы.

Методы исследования

Для математического описания работы механизма коммутатора применялся аппарат дифференциальных уравнений и матричное описание перемещений манипуляторов.

Компьютерное моделирование элементов оптического коммутатора проводилось в среде Simulink пакета MATLAB, в частности – с применением библиотеки simMechanics. Для визуальной оценки моделируемого процесса использовались методы 3D-визуализации пространственного перемещения тел.

Разработка компьютерной программы управления велась в среде разработки Borland Delphi 7. Разработка программ контроллера системы приводов, а также анализ параметров и характеристик приводов проводился в пакете Simotion Scout.

Экспериментальные исследования оптического коммутатора велись на базе оптической системы с набором излучателей с применением видеофиксации результатов, в том числе высокоскоростной видеосъемки.

Реализация и внедрение результатов работы

Экспериментальный стенд, включающий в себя образец разработанного оптического коммутатора, создан в Федеральном казенном предприятии «Государственный лазерный полигон «Радуга» в г. Радужный.

Результаты диссертационной работы внедрены в практику научно-технической деятельности ФКП «ГЛП «Радуга» и в процесс обучения бакалавров и магистров по направлению «Мехатроника и робототехника» во Владимирском Государственном Университете им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Оптический коммутатор экспонировался на выставке лидирующих компаний Владимирского региона, развернутой в составе II Экономического форума «Владимирская область – территория динамичного развития», прошедшего 30-31 мая 2014 года в городе Владимир.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Белорусско-Российский университет, Республика Беларусь, г. Могилев, 30-31 октября, 2012 год);

- VII Всероссийская отраслевая научно-техническая конференция «Проблемы создания лазерных систем» (г. Радужный, 11-13 сентября, 2013 год);

- III Всероссийская научно-техническая конференция «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники» (г. Владимир, 14-16 ноября, 2013 год);

- V Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь, техника, космос» (БГТУ «ВОЕНМЕХ», г. Санкт-Петербург, 20-22 марта, 2013 год);

- Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Белорусско-Российский университет, Республика Беларусь, г. Могилев, 16-17 октября, 2014 год);

- научно-технические семинары кафедр «Автоматические и мехатронные системы» и «Мехатроника и электронные системы автомобилей» Владимирского Государственного Университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (г. Владимир, 2012-2014 годы);

- научный семинар кафедры СМ-7 Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2015 год).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, включая 3 статьи в журналах, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов» и рекомендуемых ВАК для опубликования научных результатов.

Благодарность

Автор выражает благодарность научному руководителю – доктору технических наук, профессору Кобзеву Александру Архиповичу, а также доктору технических наук, профессору Егорову Игорю Николаевичу и доктору технических наук, профессору Ющенко Аркадию Семеновичу за неоценимый вклад в виде советов и консультаций по теме диссертации.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Объем работы составляет 181 страницу, включая 137 страниц основного текста, список использованной литературы из 83 наименований, 76 рисунков, 2 таблицы и 7 приложений.

Глава 1. Анализ устройств управления положением оптической оси

В задачах проектирования приводных систем в сфере оптики необходим анализ существующих решений в этой области, отражающий ключевые особенности в каждом классе устройств, а также важны теоретические знания о специфике их работы в целом.

1.1. Обзор приводов оптических систем и систем управления положением оптической оси

Системы, использующие оптическое излучение разных видов [20], широко распространены в современной технике. К ним относятся информационные системы связи, производственные системы обработки материалов, измерительное оборудование, научно-исследовательские стенды для изучения взаимодействия излучения со средами и т. д. В процессе создания оптических установок стремятся получить систему с параметрами, насколько возможно близкими к расчетным [54], и результат зависит от всех этапов – от предварительных теоретических расчетов до завершающей юстировки готовой системы.

Юстировка в области оптических систем имеет важнейшее значение – именно эта завершающая, или финишная, операция определяет качество выпускаемых оптических приборов и установок. Удельная трудоемкость финишных операций быстро растет: если десятилетия назад она составляла четвертую часть общей трудоемкости изготовления оптических приборов, то теперь её доля возросла разы и продолжает увеличиваться. Эта тенденция связана как с усложнением схем и конструкций оптических и оптико-электронных приборов при стремлении повысить точность, информативность, надежность, быстродействие их работы, так и со спецификой финишных операций.

Постоянное усложнение оптических устройств и установок объясняется, в частности, перспективностью использования оптического излучения в различных областях, от утилитарного применения до лабораторных исследований и испытаний. Разнообразие видов оптического излучения, а также широта спектра операций по изменению его свойств и характеристик позволяет строить

оптические системы с широчайшими возможностями. В частности, перспективно использование оптического излучения в экспериментальных исследованиях взаимодействия с материальными средами [3]. Возможности фокусировки оптического излучения и применение на расстоянии вкупе с высокой точностью позиционирования оси излучения открывают оптическим системам многие сферы применения [27]. Однако возрастающая сложность и универсальность оптических систем требует поиска оптимальных решений в сфере их архитектуры в целом.

Построение приводов в оптических системах является широкой задачей, включающей в себя различные направления и методики. Выполняемые функции разрабатываемого оптического коммутатора, по сути, относят его к устройствам управления отклонением оптического луча. Поскольку разрабатываемое устройство должно обладать функциями коммутации и юстировки в пространстве, его построение будет базироваться на многоосевой приводной системе с компьютерным управлением.

Стоит отметить, что, в силу разнородности приводов систем отклонения светового излучения, недостаточна их классификация по одному признаку. Наиболее адекватной здесь будет древовидная классификация на основе совокупности нескольких признаков.

Основой приведенной ниже классификации являются следующие признаки: выполняемые функции, тип исполнительных органов, структура исполнительных органов, тип и задача управления, характер движения.

Структура описанной выше классификации приводов в оптических системах представлена на рисунке 3.

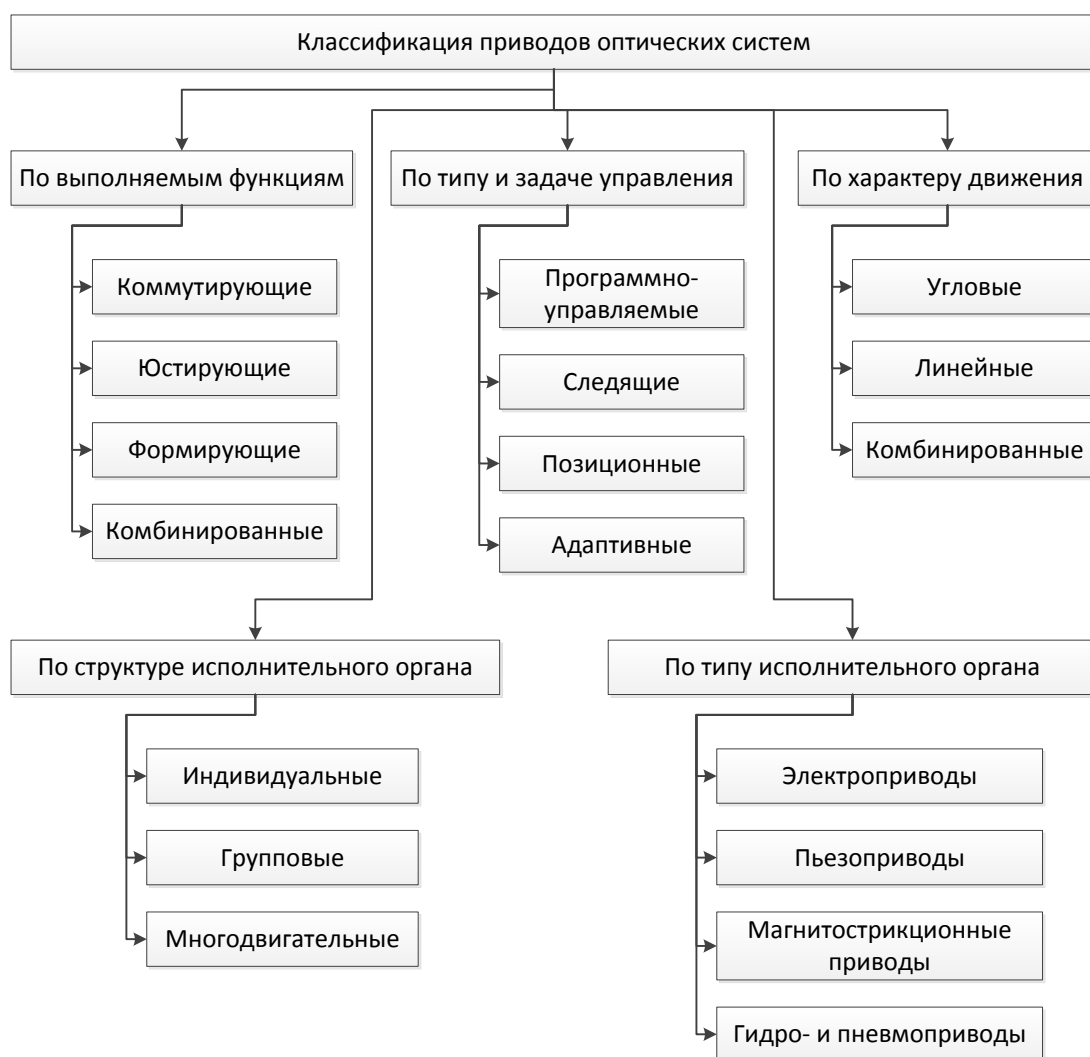


Рисунок 3 – Классификация приводов оптических систем

По выполняемым функциям приводы оптических систем подразделяются на:

- коммутирующие – осуществляющие коммутацию оптических излучателей. Здесь возможны варианты мультиплексирования излучения нескольких источников установки или демультиплексирование излучения одного источника на разные оптические тракты. Примерами могут являться привода коммутаторов в многопостовых стендах и установках с набором источников излучения;

- формирующие – управляющие формой и направлением светового пучка. Примером являются привода линз и зеркал в формирующих телескопах. Условно к этой категории также можно отнести привода опорно-поворотных устройств оптических систем;

- юстирующие – осуществляющие тонкую подстройку параметров оптического тракта. Примером здесь является спектр приводов, предназначенных для моторизации элементов юстирующей оптомеханики, например держателей оптических клиньев и плоскопараллельных пластин, используемых для юстировки направления оптических осей;

- комбинированные – включающие функции двух и более видов приводов перечисленных выше. К данному классу относится многоосевой привод разрабатываемого оптического коммутатора.

По типу исполнительных органов выделяются следующие группы:

- электроприводы – преобразователи электроэнергии в движение объекта управления на основе электромагнитных принципов. В силу удобства использования, широких возможностей и богатого опыта использования, получили широкое применение практически во всех областях оптики, за исключением систем нанопозиционирования оптики, где лидирующие позиции удерживаются пьезопроводом. Однако, при соответствующей измерительной системе и температурных условиях, электроприводы могут выполнять позиционирование с нанометрической точностью [23];

- пьезопроводы – устройства, использующие обратный пьезоэлектрический эффект в кристаллах и пленках, для преобразования электроэнергии в микроперемещения. Вследствие высочайшей динамики, малых перемещений и высокой разрешающей способности нашли применение в адаптивной оптике, в приводах зеркал модуляторов добротности, корректорах волнового фронта и т.д.;

- магнитострикционные приводы – используют принцип магнитострикции, заключающийся в изменении геометрических параметров тела при изменении его намагниченности. В силу схожести динамических и точностных характеристик магнитострикционных и пьезопроводов, сферы применения их сходны;

- гидро- и пневмоприводы – осуществляющие преобразование потенциальной энергии давления жидкостей и газов в движение исполнительного органа. Как правило, находят применение в крупногабаритных опорно-поворотных устройствах больших телескопов. Пневмоприводы, в силу

сжимаемости газов, практически не находят применения в точных приводах малоразмерных оптических систем;

- комбинированные – привода, использующие в своем составе разнородные двигатели. Примером здесь может являться привод линзы коллиматора оптического прибора, в котором грубое и высокоскоростное позиционирование осуществляет линейный электропривод, а точное микропозиционирование осуществляет пьезопривод.

По структуре исполнительных органов приводы оптических систем подразделяются на следующие классы:

- индивидуальные – в них рабочий орган приводится в движение одним двигателем. Стандартным примером является индивидуальный привод призмы или поворотного зеркала оптического коммутатора [36] без функции автоюстировки положения оси в пространстве;

- групповые – приводы, имеющие в своем составе двигатель, приводящий в движение группу рабочих органов. Примером являются привода массивов оптических элементов, например матриц зеркал;

- многодвигательные – приводы, в которых 2 и более двигателей обеспечат работу сложного механизма, приводящего в движение рабочий орган. Привод юстировки разрабатываемого оптического коммутатора на основе механизма с параллельной кинематикой – пример многодвигательного привода.

По типу и задачам управления приводы оптических систем подразделяются на следующие группы:

- программно-управляемые – функционирующие под управлением специализированной вычислительной машины в соответствии с заранее заданной программой перемещения;

- следящие – автоматически обрабатывающие перемещение рабочего органа с заданной точностью в соответствии с изменяющимся сигналом управления;

- позиционные – автоматически позиционирующие исполнительный орган в заданные положения. Примером являются коммутирующие приводы многоканальных оптических систем;

- адаптивные – автоматически изменяющие структуру и параметры устройства управления с целью установления оптимального режима работы.

По типу движения приводы в оптических системах подразделяются на:

- угловые – приводы вращательного перемещения оптических элементов.

Примером здесь являются приводы вращения призм, зеркал и поляризаторов;

- линейные – имеющие поступательный характер движения рабочего органа, например приводы линз и зеркал в составе телескопов и коллиматоров;

- комбинированные – многоосевые приводы, или приводы снабженные передачами со специфической кинематикой, способные отрабатывать сложные траектории (в том числе пространственные).

В целях разработки общей структуры оптического коммутатора и выбора возможных исполнительных устройств были проанализированы системы управления пространственным положением светового пучка, называемые дефлекторами. В настоящий момент есть несколько принципиально различных видов дефлекторов и сейчас можно выделить несколько групп: акустооптические, электрооптические, оптикомеханические.

По характеру взаимодействия оптического луча со средой оптического элемента дефлектора они разделяются на следующие классы: преломляющие, отражающие, дифракционные. По характеру отклонения луча они подразделяются на непрерывные и дискретные.

Акусто- и электрооптические дефлекторы отличаются высоким быстродействием [15, 25], но, в то же время, имеют сравнительно небольшой угол отклонения излучения и требуют специфических источников питания.

Акустооптические дефлекторы базируются на эффекте взаимодействия или дифракция света на акустических волнах в среде дефлектора. Акустооптические устройства позволяют управлять направлением, амплитудой, частотой, поляризацией и спектральным составом светового луча [25]. Направление оси излучения в таком дефлекторе может изменяться под действием изменяющегося по объему коэффициента преломления среды. Поскольку акустооптические дефлекторы обеспечивают небольшой угол отклонения излучения и требуют

специфических источников питания, их применение для решения поставленной в работе задачи нецелесообразно, поскольку для коммутации излучения могут требоваться значительные изменения направления оптической оси.

Электрооптические дефлекторы основаны на принципе возникновения оптической анизотропии (неравномерности) в веществе под воздействием внешнего электрического поля, в результате чего изменяется показатель преломления вещества. Появление оптической анизотропии - следствие изменения диэлектрической проницаемости вещества под действием электрического поля [14].

В отличие от акусто- и электрооптических дефлекторов, оптикомеханический дефлектор изменяет положение оптики в пространстве. Ротор дефлектора помещен в переменное магнитное поле. С ротором жестко связана пружина, создающая вращательный момент. Известные колебательные дефлекторы обеспечивают угол отклонения до 30° при частоте колебаний в несколько сотен герц.

Поскольку в разрабатываемом коммутаторе важен дискретный режим позиционирования оптического элемента, принцип колебательного дефлектора не может быть взят за основу при решении поставленной в работе задачи. Однако механические дефлекторы наиболее предпочтительны, по сравнению с электро- и акустооптическими, вследствие значительных пределов изменения направления оптической оси.

Вторым видом оптико-механических дефлекторов являются дефлекторы на базе пьезопривода. В таком дефлекторе зеркало, смонтированное в платформу, закрепляется на гибком подвесе и приводится в движение линейным пьезоприводом. Для такого дефлектора свойствен малый предельный угол отклонения оси излучения и высокая дискретность задания перемещения. Описанная конструкция отличается небольшим размером, в то же время она потенциально нестабильна при изменении температуры, так как подвес и пьезоактуатор могут иметь разные коэффициенты теплового расширения.

Большую устойчивость к температурным воздействиям имеет конструкция с дифференциальным пьезоп приводом. В таком дефлекторе зеркало перемещается при параллельной работе двух и более пьезоп приводов и исключается гибкий подвес. Приводы подключаются по мостовой схеме к системе управления. Такая конструкция обладает малым трением, позволяет получать высокую точность угловых перемещений, и более устойчива к тепловым колебаниям.

Температурные изменения в дефлекторе с дифференциальным пьезоп приводом приводят только к тепловому расширению самих приводов, а значит, температурное влияние ограничивается лишь линейными перемещениями зеркала и практически не влияют на его угловое положение (платформа опирается на два пьезоэлемента с одинаковыми коэффициентами температурного расширения). Сравнительным недостатком дефлектора с дифференциальным приводом является его высокая стоимость. Общей характеристикой для дефлекторов такого вида является высокая точность позиционирования, сопровождающаяся небольшими предельными углами отклонения оси излучения и малыми апертурами зеркал.

Неотъемлемой частью обоснования принимаемых решений, связанных с созданием, производством, совершенствованием и использованием объекта разработки является анализ существующих решений в этой области, исследование технического уровня и тенденций развития объектов, их конкурентоспособности (эффективности использования по назначению) на основе различной информации. По сути, такого вида исследования относятся к прикладным научно-исследовательским работам [13]. В данной работе объектом исследования являются устройства потенциально способные выполнять задачу разрабатываемого оптического коммутатора. Цель исследования – определение технического уровня, анализ технических решений и выявление тенденций развития в области разработки систем изменения направления оси излучения оптической системы.

Среди отечественных разработок известно устройство для пространственного отклонения луча защищенное патентом RU 2205439 [33]. Данное устройство приведено на рисунке 4.

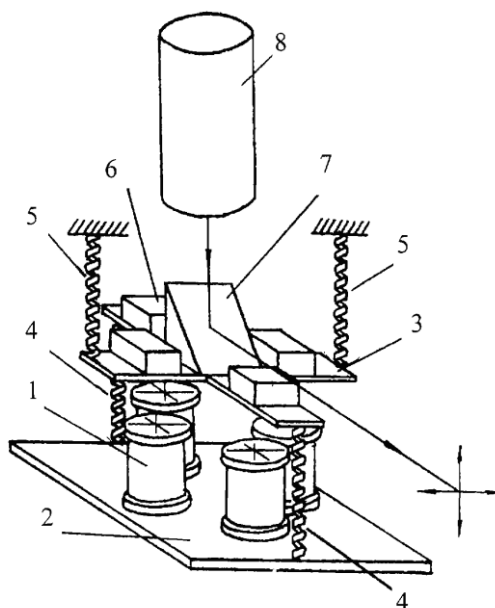


Рисунок 4 – Устройство, защищенное патентом RU 2205439:

1 – электромагнит; 2 – основание; 3 – подпружиненная пластина;
4,5 – пружины; 6 – постоянный магнит; 7 – зеркало; 8 – источник излучения

Устройство для пространственного отклонения луча имеет электромагнитную систему управления лучом по двум координатам, состоящую из четырех электромагнитов, закрепленных на основании и расположенных попарно напротив друг друга. Каждая пара электромагнитов осуществляет управление по одной из двух взаимно перпендикулярных координат. Над электромагнитами находится немагнитная подпружиненная пластина. Пластина подвешена на четырех пружинах, прикрепленных на ее противоположных концах и на корпусе устройства. Пары пружин расположены на противоположных сторонах от плоскости, проходящей через пластину. На пластине закреплены четыре постоянных магнита так, что каждый находится на осевой линии одного из электромагнитов. Магнитное поле каждого постоянного магнита может взаимодействовать с полем одного из соответствующих электромагнитов. В центре пластины расположено зеркало. При установке зеркала под углом 45° к

плоскости пластины источник излучения располагается на оси всего устройства, что существенно упрощает конструкцию корпуса устройства, а выход луча осуществляется из боковой поверхности корпуса.

Основным недостатком данного устройства является невозможность реализовать круговое вращение призмы для опроса излучателей системы и нехватка двух переносных степеней подвижности.

Решение этой задачи выполняется также сканирующим устройством [31], содержащим источник света и два плоских зеркала, независимо качающихся на заданные углы вокруг взаимно перпендикулярных осей.

Известно лазерное сканирующее устройство защищенное патентом (RU) 2369887 [34], схема которого приведена на рисунке 5.

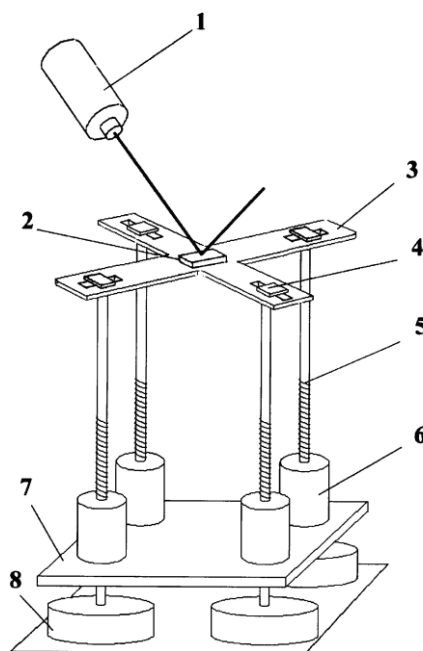


Рисунок 5 – Устройство, защищенное патентом (RU) 2369887:

- 1 – источник направленного излучения; 2 – зеркало; 3 – крестовина;
 4 – шарнирный элемент; 5 – стержень; 6 – неподвижная резьбовая втулка;
 7 – основание; 8 – шаговый электродвигатель

Устройство работает следующим образом. В исходном положении крестовина опирается на четыре направляющих стержня через шарнирные элементы и располагается параллельно основанию. При подаче питания каждая

пара накрест лежащих шаговых электродвигателей включается и работает только совместно, причем при вращении их валов один из направляющих стержней перемещается по направлению вверх, а другой - вниз на одинаковые расстояния. Вторая пара накрест лежащих шарнирных элементов в этом случае является осью, вокруг которой качается крестовина. Аналогичным образом осуществляется качание крестовины и по другой оси. Для компенсации изменяющегося расстояния от оси качания крестовины до каждого из шарнирных элементов корпуса шарнирных элементов установлены в пазах на оконечностях крестовины, образующих направляющие, по которым корпус может скользить в радиальном направлении.

Недостатком данного устройства также является нехватка двух переносных степеней подвижности и отсутствие вращения оптического элемента в горизонтальной плоскости.

Известна система для отклонения светового пучка, защищенная патентом на полезную модель (RU) 62254 [38]. Данная система приведена на рисунке 6.

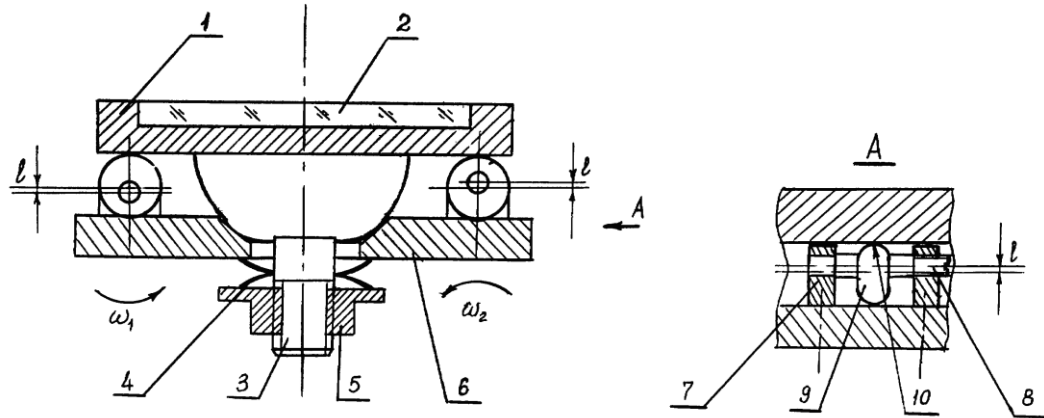


Рисунок 6 – Система, защищенная патентом (RU) 62254: 1 – оправа;
2 – отклоняющий элемент; 3 – хвостовик; 4 – упругий элемент;
5 – гайка; 6 – основание; 7 – выступ; 8 – стержень;
9 – цилиндрическое утолщение; 10 – сферическая поверхность

Система для отклонения светового пучка работает следующим образом. При вращении регулировочных стержней в разные стороны вместе с закрепленными на них цилиндрическими утолщениями за счет эксцентricности

осуществляется поворот оправы с отклоняющим элементом относительно основания. При этом упругий элемент находится в расслабленном состоянии, и сферический выступ оправы перемещается по конической поверхности, предусмотренной в отверстии основания. После окончания установки отклоняющего устройства в требуемом положении гайка заворачивается, подпружинивая оправу с отклоняющим элементом к основанию.

Основным недостатком данного устройства являются малые пределы перемещения оптического элемента и нехватка его степеней подвижности.

Помимо приведенных выше устройств, использующих в своем составе оптические элементы-рефлекторы, известны устройства, базирующиеся на элементах-рефракторах, такие, как устройство для отклонения светового пучка защищенное патентом на полезную модель (RU) 52201 [35]. Принцип действия устройства поясняется рисунком 7.

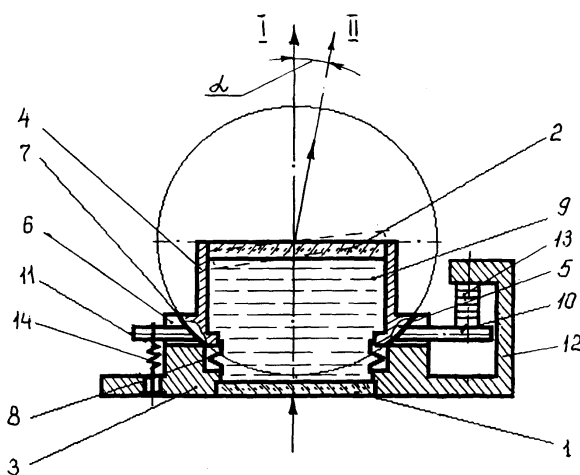


Рисунок 7 – Устройство для отклонения светового пучка, защищенное патентом на полезную модель (RU) 52201: 1,2 – пластины; 3 – корпус; 4 – оправа; 5 – сферическая поверхность; 6 – выступ; 7 – фаска; 8 – упругий элемент; 9 – прозрачная среда; 10 – выступ; 11 – штырь; 12 – Г-образная стойка; 13 – механизм наклона; 14 – цилиндрическая пружина

Работа предлагаемого устройства осуществляется следующим образом. При подаче светового пучка нормально к поверхности нижней пластины (при условии параллельности обеих пластин) пучок без преломления выйдет из верхней

платины в направлении-I. При необходимости изменения направления выходного пучка, с блока управления (в графических материалах условно не показан) на механизмы наклона подается управляющий сигнал соответствующего знака и величины для разворота верхней пластины (показано пунктиром). После разворота пластины, световой пучок, преломляясь, отклонится в направлении-II.

По аналогии с предыдущим устройством, основным недостатком данного устройства являются малые пределы перемещения оптического элемента и нехватка его степеней подвижности.

В области иностранных разработок наблюдается сходная ситуация. Компании Carl Zeiss Smt Gmbh принадлежит патент (US) 8179621 B2 [43] на устройство перемещения оптического элемента. Данное устройство предназначено для манипулирования оптическим элементом по шести степеням подвижности относительно неподвижного объекта, связанного с основанием устройства, с помощью, по меньшей мере, трех приводных устройств. Приводные устройства имеют, по меньшей мере, два исполнительных устройства (линейный привод), каждое из которых прилагает силу в точке соединения с оптическим элементом, которая соединена компенсатором силы тяжести с основанием. Прилагаемые силы вызывают перемещение оптического элемента. Конструкция устройства показана на рисунке 8.

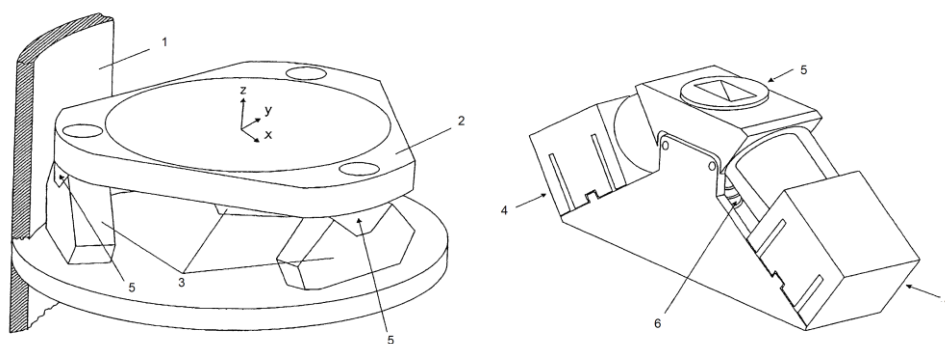


Рисунок 8 – Устройство, защищенное патентом (US) 8179621 B2:

- 1 – неподвижный объект, связанный с основанием; 2 – оптический элемент;
- 3 – приводное устройство; 4 – линейный привод; 5 – точка соединения;
- 6 – компенсатор силы тяжести

Недостатком данного устройства является невозможность коммутации излучателей в горизонтальной плоскости.

Помимо описанного устройства, за рубежом имеется ряд разработок, включающих в себя механизмы с параллельной кинематикой для позиционирования оптических элементов. Так в патенте US 20130182344 A1 [41] описано применение гексапода для ориентации источника излучения в микролитографии, которая применяется при изготовлении полупроводниковых приборов. В патенте US 20070284502 A1 [40] указан способ применения гексапода для позиционирования как минимум одного оптического элемента в установке для фотолитографии в глубоком ультрафиолете (Extreme ultraviolet lithography, EUVL), на долю которой приходится более половины производственных затрат при изготовлении изделий микроэлектроники. Перемещение оптики с помощью гексапода высокую скорость, чрезвычайно высокую точность и повторяемость, что является преимуществом для использования в системе EUVL.

Точное позиционирование компонентов востребовано не только при изготовлении полупроводниковых приборов. Например, оптические системы связи требуют, чтобы концы оптических волокон были максимально точно выровнены при спайке, чтобы обеспечить минимальные потери при передаче. Применение манипулятора на базе параллельной кинематики для ориентации оптических волокон упомянуто в патенте US 20030106230 A1 [39].

Помимо устройств, относящихся к классу систем управления положением оптических элементов в целом, известны разработки систем, специально ориентированных на коммутацию оптического излучения. В этой сфере известен оптический коммутатор, защищенный патентом на полезную модель (RU) 56076 [36], чьим обладателем является ФГУП «НПО Астрофизика». Схема данного устройства приведена на рисунке 9.

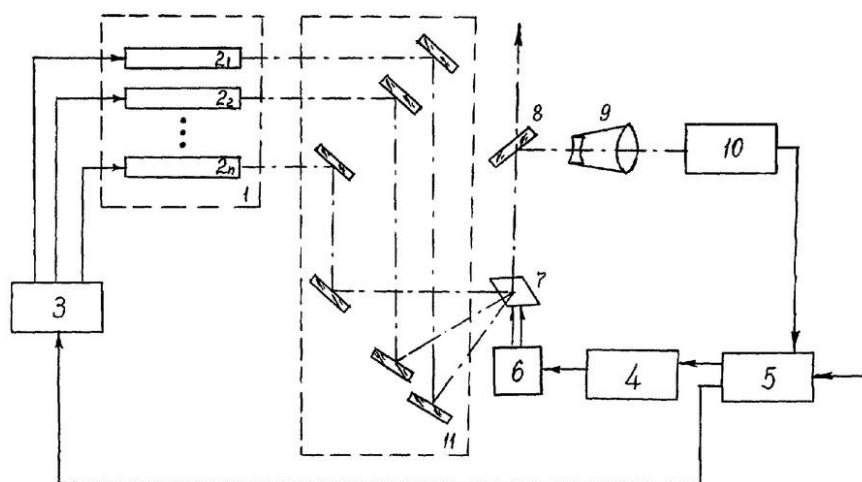


Рисунок 9 – Устройство, защищенное патентом (RU) 56076:

- 1 – лазерный модуль; 2 – излучатели; 3 – система энергопитания;
 4 – усилительный блок привода; 5 – задатчик программы сканирования;
 6 – двигатель; 7 – зеркало поворотное; 8 – светоделительной пластиной;
 9 – телескопическая система; 10 – фотоприемник; 11 – матрица сведения

Оптический коммутатор работает следующим образом. В задатчике программы сканирования устанавливается требуемый режим работы оптического коммутатора. По команде с задатчика программы сканирования система энергопитания осуществляет генерацию соответствующего излучателя лазерного модуля, а усилительно-преобразовательный блок привода включает двигатель и устанавливает поворотное зеркало в положение, соответствующее выводу излучения требуемого лазерного излучателя через его оптический канал матрицы сведения на общую оптическую ось в направлении объекта. Часть этого излучения с помощью светоделительной пластины отводится через телескопическую систему в фотоприемник, где осуществляется контроль установки оптической оси коммутатора.

Недостатком данного коммутатора является отсутствие возможности компенсации разъюстировок излучателей (т.е. наличие лишь функции коммутации излучателей).

Очевидно, сфера позиционирования оптических элементов и управления оптической осью вызывает интерес разработчиков и включает в себя множество

решений, что еще раз подтверждается приведенной выше информацией. Однако спектр имеющихся разработок по отношению к тематике данной работы является неудовлетворительным. Следует подчеркнуть тенденцию их деления на два обособленных типа:

- юстирующие устройства, характеризующиеся наличием нескольких степеней подвижности, но не обладающих большим пределом перемещений и скоростью, необходимым для функции коммутации;

- устройства, пригодные для задач коммутации, со значительными пределами перемещения оптических элементов, но не обладающие набором степеней подвижности и не пригодные для задач юстировки.

Кроме того, в оптомеханике было выявлено широкое применение механизмов с параллельной кинематикой, т.к. задача ориентирования оптических элементов успешно решается данными механизмами.

1.2. Обзор механизмов с параллельной кинематикой

Традиционно для решения многих задач используются манипуляторы, представляющие собой последовательное соединение звеньев, не использующих механизмы с параллельной кинематикой [47]. Такие манипуляторы имеют низкий показатель грузоподъемности, низкую точность позиционирования рабочего органа, относительно низкую жесткость [73]. Низкая нагрузочная способность и невысокая точность обусловлена структурой существующих манипуляторов. Каждое из них несет на себе вес последующего сегмента в дополнение к полезной нагрузке, поэтому на них действуют большие изгибающие моменты, что повышает требования к жесткости и, следовательно, ведет к увеличению массы. Очевидно, что точность позиционирования зависит от изгибных деформаций, не измеряемых внутренними датчиками робота. Наличие двигателей и редукторов с люфтами также ведет к уменьшению точности [8].

В свете приведенных выше причин были предприняты разнообразные попытки снижения негативного влияния последовательно кинематики, в том числе методы статической разгрузки [63, 26], не являвшиеся, тем не менее, «панацеей». В настоящий момент одним из перспективных направлений развития

современного оборудования является использование манипуляторов с параллельной кинематикой [2] как метод преодоления указанных выше недостатков последовательной кинематики. Можно выделить следующие основные преимущества таких манипуляторов: лучшая грузоподъемность, высокая точность позиционирования рабочего органа, более высокая жесткость системы, высокие скорости и ускорения рабочего органа, высокая степень унификации мехатронных узлов [47]. Однако такие манипуляторы обладают и рядом недостатков: меньшее рабочее пространство, более сложная конструкция механизма, сложное математическое описание, возможность потери управляемости в некоторых конфигурациях манипулятора, возможность соприкосновения кинематических цепей манипулятора, сложность задания движений манипулятора в обобщенных координатах [10].

В настоящее время машины на базе механизмов параллельной кинематики широко применяются в качестве позиционирующих устройств, манипуляторов и микроманипуляторов, вибрационных стендов, тренажеров, измерительных комплексов и т.д. [9]. Решение проблемы позиционирования и ориентирования объекта управления с помощью механизмов с параллельной кинематикой является весьма успешным, что подтверждает обзор, приведенный ниже.

Наработки в области параллельной кинематики были реализованы в 1955 г. Эриком Гафом, построившим манипулятор для тестирования автомобильных колес [70]. В нем подвижная платформа соединялась шарнирами с поступательными приводами, которые в свою очередь, соединялись шарнирами с неподвижным основанием. Позиционирование платформы осуществлялось посредством контролируемого изменения длины приводов. Данное устройство позволяло позиционировать платформу (а значит и колесо) под любыми углами к поверхности и имитировать силовое воздействие на шину.

В 1965 г. инженером Стюартом [80] было предложено использовать в качестве базы для симулятора механизм, в котором подвижная платформа соединялась со сферическими шарнирами с двумя опорами, расположенными треугольником. Один из концов этих опор соединен с помощью вращательного

шарнира с вертикальной стойкой и может вращаться вокруг ее оси. Другой конец одной из опор присоединен с помощью сферического шарнира к подвижной платформе, а другой конец второй опоры соединен с телом первой опоры с помощью призматического шарнира.

Понятие «платформа Гафа-Стюарта», появившееся в последствие, представляет собой механизм с подвижной платформой и неподвижным основанием, шарнирно соединенными шестью поступательными кинематическими парами [73]. При изменении длины пар происходит пространственное перемещение верхней пластины.

Сфера применения механизмов с параллельной кинематикой весьма широка. Манипуляторы с параллельной кинематикой нашли широкое применение в станкостроении. Так компанией ЗАО «Лапик» (в настоящее время – ООО «Лапик», г. Саратов) с 1982 года велись разработки станков такого класса и в 1992 году были выпущены измерительные системы КИМ-500 и КИМ-1000, а в 1995 году обрабатывающие системы ТМ-1000. Технологические модули этой фирмы выполняются в качестве обрабатывающего станка и координатно-измерительной машины. Выпущен ряд модификаций данного оборудования для выполнения операций механической обработки, разметки и измерения деталей [50, 51].

Среди манипуляторов с параллельной структурой следует выделить серию роботов IRB компании ABB, ориентированных на применение в промышленности [66]. Так, манипулятор IRB 360 IRC5 имеет 4 степени свободы, грузоподъемность – 3 кг, максимальную высоту подъема – 1130 мм, точность позиционирования – $\pm 0,1$ мм.

Также в сфере технологического оборудования известен станок 6X Неха фирмы Mikromat [74], 5-ти координатный станок Гексамех-1 ОАО «НИАТ» [4, 5] и широкоуниверсальный обрабатывающий центр V100 фирмы INDEX-Werke [81].

Помимо технологических процессов, также примечательно применение параллельной кинематики в медицине. Так в университете Флиндерс (Аделаида, Австралия) было внедрено устройство, призванное изменить способ изучения работы нормальных и больных суставов [69]. Гексапод, легший в основу

устройства, имитирует движение костей, изгиб, скручивание и растяжение с точностью до долей миллиметра, что позволяет исследователям рассчитать силу, прилагаемую к суставам в процессе повторяющихся повседневных движений.

В области медицинских приложений также известен многосекционный манипулятор - рука ISELLA [83] с мускулами DOHELIX института Фраунгофера (Германия), параллельнокинематический робот Crigos [68] для ортопедических хирургических операций, роботы для эндоскопии [82], робот-штатив для микроскопа SurgiScope [77] фирмы ISIS Robotics и прочие.

Предпринимались попытки использования механизмов с параллельной кинематикой в аэрокосмической сфере. Было разработано устройство для изучения роботизированной сборки в открытом космосе [76]. В миссии шаттла STS-63 в феврале 1995 г. для доставки экипажа использовалась подвесная подвижная платформа Charlotte [42] разработки компании McDonnell Douglas.

Исторически первая сфера применения параллельной кинематики - симуляторы и имитаторы – сейчас насчитывает целый ряд разработок, например авиасимуляторы [72], симулятор самолета Airbus A340, симулятор для подготовки операторов космической техники NADS, велосипедный симулятор компании KAIST в Корее и прочие.

Как показывает анализ, механизмы с параллельной кинематикой распространены во многих сферах науки и технике (в частности – в оптомеханике) за счет присущих им преимуществ:

- высокая точность позиционирования рабочего органа;
- высокая жесткость системы;
- высокие скорости и ускорения рабочего органа;
- лучшая грузоподъемность;
- сравнительная компактность [47].

Однако такие механизмы обладают и рядом недостатков:

- меньшее рабочее пространство;
- более сложная конструкция;
- сложное математическое описание;

- анизотропия и неоднородность динамических, упругих и скоростных свойств манипулятора;
- возможность потери управляемости в некоторых положениях манипулятора;
- возможность интерференции (соприкосновения) отдельных кинематических цепей манипулятора [47, 10, 19].

Несмотря на недостатки, перечисленные преимущества позволяют рассматривать механизмы с параллельной кинематикой в качестве базиса для разрабатываемого устройства в данной диссертационной работе.

1.3. Требования к разрабатываемому оптическому коммутатору

Основой для разрабатываемого устройства является идея объединения функций коммутации и юстировки излучения в одном устройстве и в одной операции. Данный подход говорит об исполнении всех функций коммутатором с помощью единого рабочего органа – оптического элемента (например, зеркала или призмы).

Зачастую многие оптические системы базируются на оптических столах, которые широко используются для исследовательских целей в научных институтах и центрах, а также во множестве измерительных лабораторий, в том числе на промышленных производствах, требующих точных оптических операций. Расположение элементов системы в единой плоскости стола (столов) в дальнейшем берется за основу и подразумевает расположение источников излучения также в одной плоскости. Учитывая, что рабочим органом коммутатора является призма, адекватным решением будет коммутация на общую оптическую ось, базирующаяся на вращении призмы, по аналогии с рассмотренным выше случаем [36] и расположении коммутируемых осей в одной плоскости со схождением их в точке излома оси в призме. Вращение призмы, очевидно, происходит вокруг общей оптической оси. Описанная схема расположения осей и призмы коммутатора показана на рисунке 10.

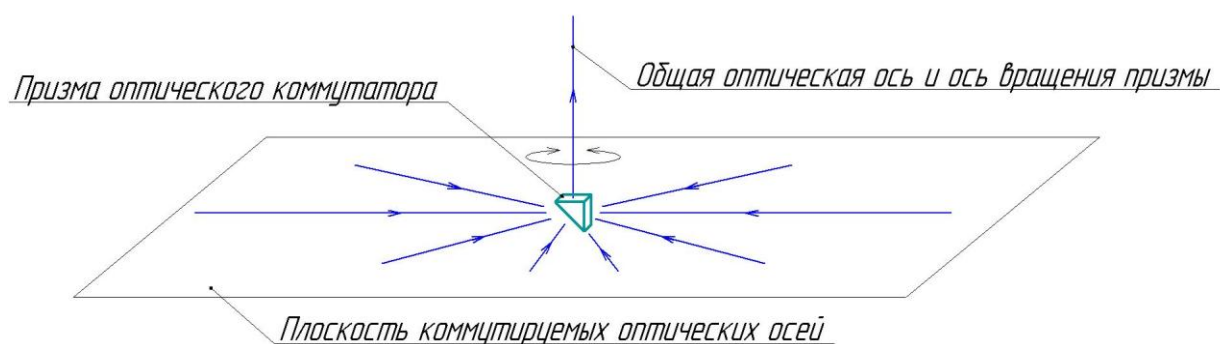


Рисунок 10 – Схема расположения оптических осей и призмы коммутатора

Показанное на схеме расположение коммутируемых осей в одной плоскости не всегда возможно поддерживать, поскольку могут происходить разъюстировки источников излучения с течением времени или под действием вибрационных и климатических факторов. Так у источников когерентного излучения наблюдаются разъюстировки зеркального резонатора при перепаде температур. Разъюстировка оптики происходит чаще всего при климатических воздействиях среды вследствие разности коэффициента температурного расширения и геометрических размеров элементов конструкции и крепежных деталей [37, 30]. Возникающие разъюстировки представляют собой угловые уводы оси излучения от эталонного положения, при которых линейное отклонение оси от эталона увеличивается с ростом расстояния от источника.

На рисунке 11 показано взаимное расположение эталонной и разъюстированной оси, а также угловые разъюстировки и линейное смещение.

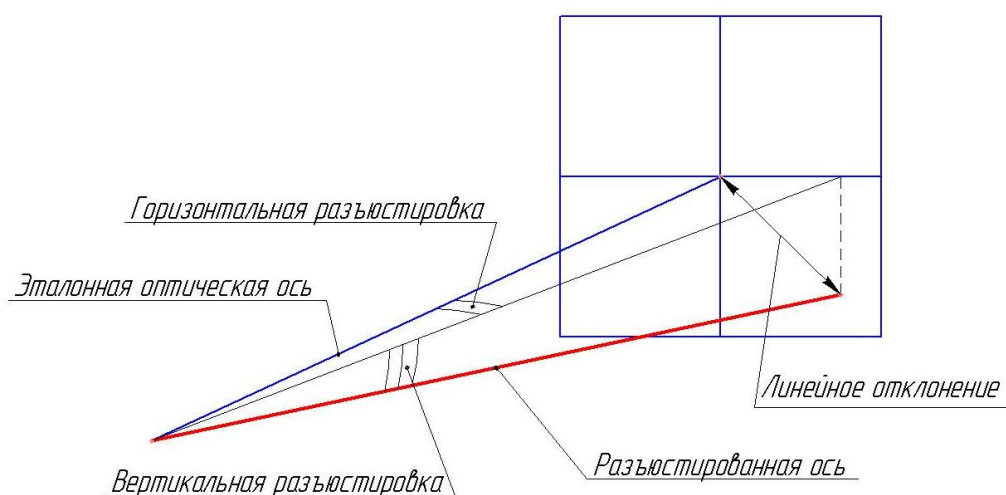


Рисунок 11 – Взаимное расположение эталонной и разъюстированной оси

Имея в оптической системе разъюстировки, показанные на рисунке 11, задачей юстировки является их компенсация. Целью юстировки будет пролегание отъюстированной оси через некоторую целевую точку, лежащую на эталонной оси. В реальной установке такой целевой точкой является объект, на который требуется воздействие оптического излучения. В описанном случае юстировка сводится к двум действиям:

- позиционирование призмы с таким расчетом, чтобы разъюстированная ось пролегла через стандартную точку излома оси призмы (центр отражающей грани);
- ориентация призмы в пространстве с целью пролегания отраженной разъюстированной оси через целевую точку.

Позиционирование призмы обеспечивается переносными степенями подвижности, перемещающими рабочий орган или объект манипулирования в заданное место рабочей зоны. Ориентация призмы обеспечивается ориентирующими степенями подвижности [6, 64].

Позиции призмы оптического коммутатора для случаев эталонной и разъюстированных оптических осей показаны на рисунке 12.

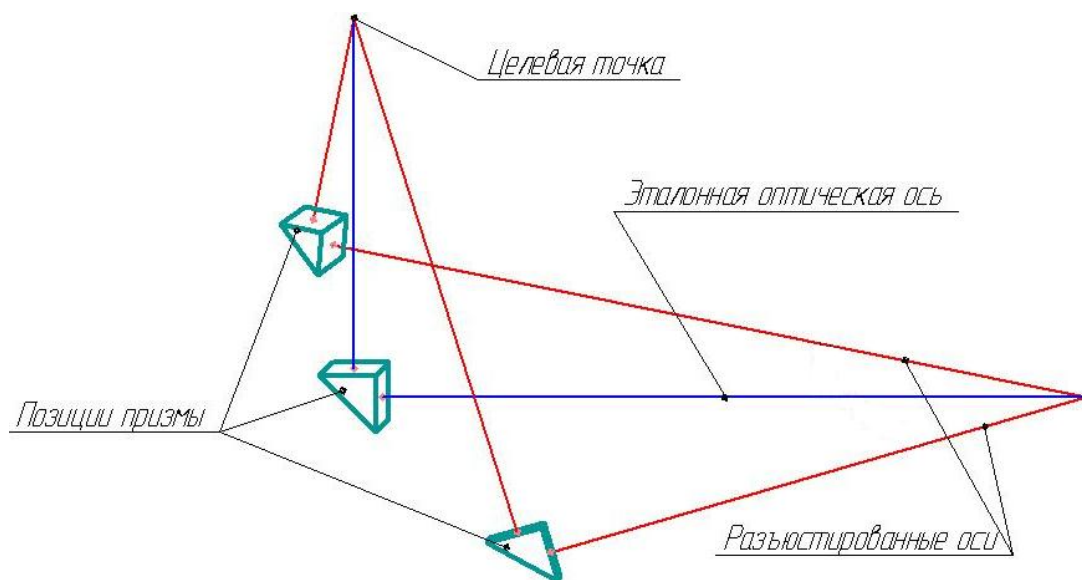


Рисунок 12 – Позиции призмы для эталонной и разъюстированных осей

На основе изображений на рисунках 10, 11 и 12 можно сделать вывод о том, что многообразие позиций призмы для разъюстированных осей вызывает

необходимость снабжения оптического коммутатора тремя переносными поступательными степенями подвижности и двумя ориентирующими степенями подвижности.

В части параметров коммутатора, обусловленных требованиями к нему, следует выделить следующие позиции:

- частота коммутации призмы;
- точность угловой юстировки оптической оси;
- предельные разъюстировки источников излучения.

Частота коммутации оптических осей определяется, в конечном счете, длительностью позиционирования и ориентирования призмы. В данном случае требованием является превышение частоты коммутации 20 Гц. Данное требование обусловлено задачей превысить частоту коммутации существующего комплексного лазерного стенда «Тандем» (ФКП «ГЛП «Радуга»)) находящуюся на уровне 20 Гц.

Точность угловой юстировки оптической оси определяется средним значением угла отклонения оси от эталона в результате ряда опытов по скоростной коммутации источников излучения. В стенде, построенном для испытаний коммутатора, используются источники излучения ЛМ-650-20DA2 производства ЗАО «Кантегир», с длиной волны 655 нм, мощностью 20 мВт и расходимостью излучения порядка $6 \cdot 10^{-4}$ рад [53]. Было принято решение о предельном значении угла отклонения оси после юстировки не более половины угла расходимости излучения, т.е. менее $3 \cdot 10^{-4}$ рад (1,03 угл.мин). Данное решение обосновано необходимостью нахождения, как минимум, половины светового пятна на целевой точке после юстировки оптической оси.

Предельная угловая разъюстировка оптической оси, которая может быть компенсирована коммутатором, задана на уровне 5 угловых минут отклонения от эталонной оси в любой плоскости. Данное требование обусловлено максимальным значением разъюстировки, наблюдавшимся на ФКП «ГЛП «Радуга» в процессе функционирования лазерного комплекса «Тандем».

Поскольку в комплексе «Тандем» юстировка каждого излучателя производилась вручную и занимала до 5 минут (при применении трёх излучателей, соответственно, затрачивается до 15 минут), к оптическому коммутатору предъявляется требование к автоматизации процесса юстировки и снижению затрачиваемого времени до величины менее 1 минуты.

Соответствие разрабатываемого устройства данным техническим требованиям позволит доказать его способность решать задачу компенсации разъюстировок в оптических системах с набором излучателей с их одновременной коммутацией.

Для решения задачи компенсации разъюстировок в оптических системах с набором излучателей и их коммутации в данной диссертационной работе предлагается разработка мехатронной системы [46] – оптического коммутатора, объединяющего в себе функции коммутации и автоюстировки.

Выше было указано, что оптический коммутатор должен обладать следующими степенями подвижности:

- три поступательных переносных степени подвижности для целей юстировки;
- две вращательных ориентирующих для целей юстировки;
- одна вращательная для целей коммутации оптических осей.

Данный набор степеней подвижности указывает на шестиосевую систему, которая должна базироваться на соответствующем механизме. На основе анализа механизмов с параллельной кинематикой в данной работе сделан вывод о возможности их применения в оптическом коммутаторе. Несмотря на заявленные недостатки, очевидно выгодно применение параллельнокинематического механизма из-за высокой динамики, точности и компактности по сравнению с механизмами с последовательной кинематикой. Учитывая применение такого манипулятора с целью юстировки в коммутаторе можно заранее сказать о следующих особенностях:

- конфигурации, в которых происходит потеря управляемости, вероятнее всего не достижимы, поскольку подразумевают значительные перемещения приводов, которые не будут являться необходимыми в задачах юстировки;

- интерференция кинематических цепей также мало вероятна, поскольку она провоцируется не предусмотренными конструкцией перемещениями.

Использование механизма с параллельной кинематикой позволит расположить на его перемещающейся платформе [61] привод рабочего органа коммутатора – оптической призмы. Таким образом, коммутирующие перемещения призмы оптических осей будет осуществляться приводом призмы, а юстирующие перемещения призмы будут выполняться подвижной платформой, приводимой в движение приводами подвижных штанг. В данном случае собственное вращение исключается из степеней подвижности параллельнокинематического механизма и осуществляется отдельным приводом.

Эскиз механики оптического коммутатора представлен на рисунке 13.

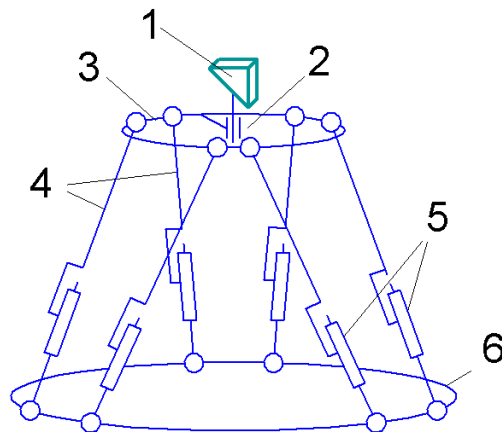


Рисунок 13 – Эскиз механики разрабатываемого оптического коммутатора:

1 – призма; 2 – привод призмы; 3 – подвижная платформа;

4 – подвижные штанги; 5 – приводы штанг; 6 – неподвижное основание

Одной из решаемых задач в работе будет обоснованный выбор кинематической структуры механизма коммутатора из спектра существующих.

В качестве системы приводов предпочтительно использование электропривода под управлением специального контроллера перемещений. Данное решение обладает следующими преимуществами: высокая динамика,

большие пределы перемещений, высокая точность при соответствующих условиях и системе измерений [23], большой мировой опыт использования данного решения из-за широкого диапазона применений во всех технологических сферах [17], доступность и широкий спектр предложения на рынке. Поэтому в одну из задач данной работы войдет разработка программного обеспечения системы приводов.

В качестве системы управления верхнего уровня должно быть выбрано устройство, выполняющее более широкий ряд функций, нежели задачу управления движением приводов, которая ставится в мехатронике в общем случае [47]. В данной работе в качестве системы управления верхнего уровня предлагается персональный компьютер с установленной средой разработки программных продуктов, а значит, одной из задач данной работы будет разработка программного обеспечения управления оптическим коммутатором.

В данную разработку закладывается задача автоюстировки на основе главной обратной связи по положению оптической оси. Очевидно, что в оптической системе, где объектом воздействия коммутатора являются оптически оси, данная обратная связь должна базироваться на фотоприемном устройстве и дальнейшей обработке информации, поступающей от него, по аналогии с работой [36]. В данной работе предлагается использовать в качестве фотоприемного устройства – скоростной видеокамеры. Данное предложение подразумевает разработку системы обратной связи в целом и её алгоритмов, в частности – алгоритма автоюстировки, что будет являться отдельной задачей работы.

Разработанные в диссертации алгоритмы должны пройти проверку на работоспособность до их внедрения в экспериментальный образец коммутатора, поэтому одной из важных задач данной работы является их компьютерное моделирование.

Образец разработанного оптического коммутатора должен соответствовать заявленным техническим характеристикам, поэтому завершающей задачей диссертационной работы будет являться проведение экспериментальных исследований. Концепция разрабатываемого устройства приведена на рисунке 14.

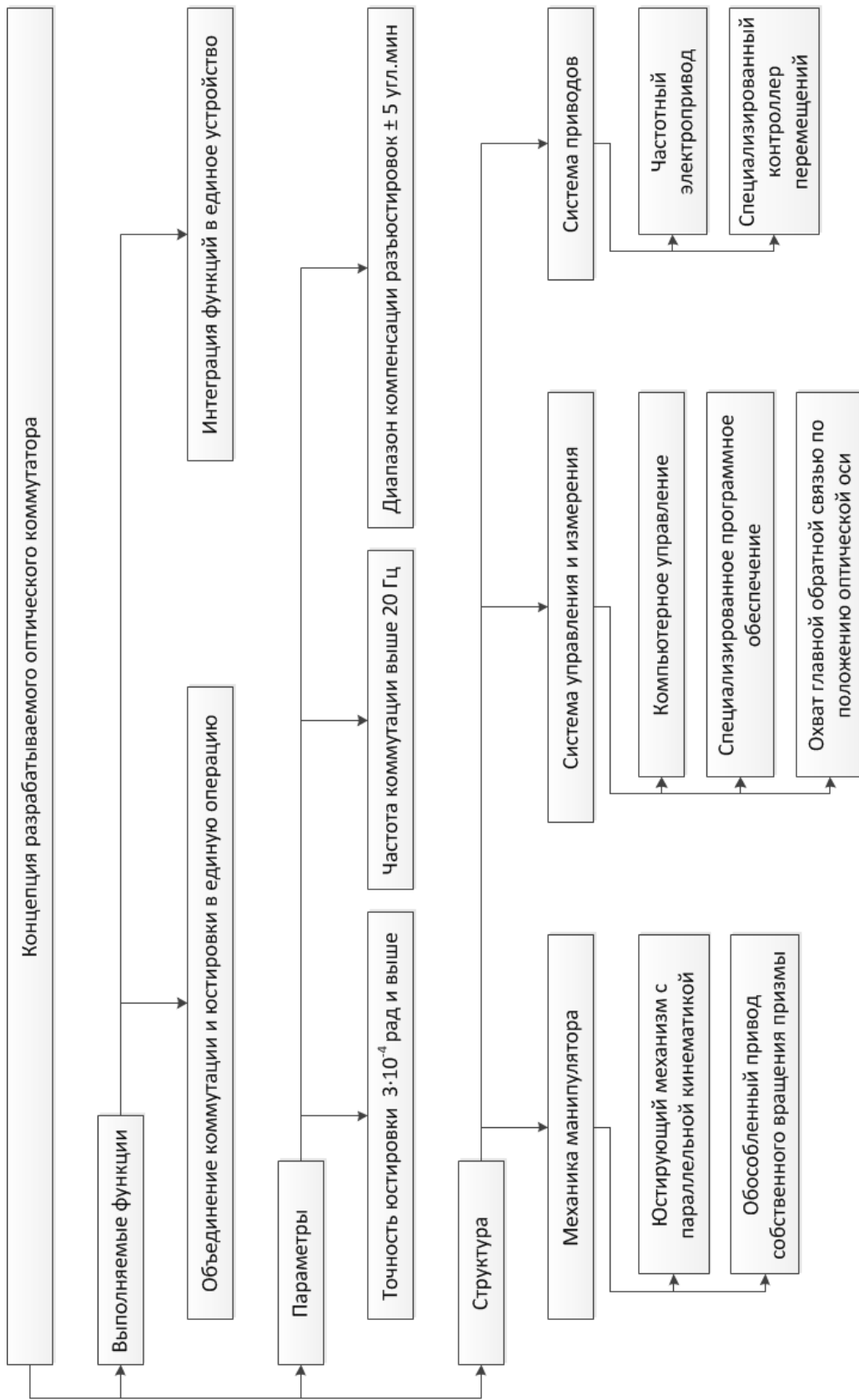


Рисунок 14 – Концепция разрабатываемого оптического коммутатора

1.4 Результаты, выводы и постановка задачи

По итогам первой главы диссертации, могут быть сделаны следующие выводы:

- показана нецелесообразность применения существующих устройств управления положением оптической оси для целей данной работы ввиду наличия одного и более недостатков: малые предельные углы отклонения излучения, малое количество степеней подвижности, низкое быстродействие, отсутствие дискретного режима позиционирования;

- на основе анализа существующих разработок показано широкое распространение механизмов с параллельной кинематикой в сфере управления положением оптической оси;

- предложен перенос функции юстировки в оптический коммутатор и её объединение с функцией коммутации в единую операцию;

- предложена общая концепция разрабатываемого оптического коммутатора, включающая в себя выполняемые им функции, технические требования и элементы его структуры.

Для достижения поставленной цели диссертации, а именно, повышения эффективности оптических систем с набором излучателей посредством разработки оптического коммутатора, необходимо решить следующие задачи:

1. Выбор кинематической структуры оптического коммутатора и анализ кинематики его механизма.

2. Разработка алгоритма автоюстировки излучения и системы главной обратной связи по положению оси излучения.

3. Разработка компьютерной программы управления коммутатором и программы контроллера системы приводов.

4. Моделирование алгоритма автоюстировки излучения и механизма с параллельной кинематикой.

5. Проведение экспериментальных исследований оптического коммутатора.

Глава 2. Разработка исполнительного механизма оптического коммутатора с параллельной кинематикой

В настоящий момент задача разработки многокоординатных приводов в различных сферах применения является весьма актуальной. Минимизация массогабаритных характеристик наряду с повышением требований к динамическим и точностным характеристикам приводит к необходимости применения манипуляторов неклассической структуры, в частности с параллельной кинематикой.

2.1. Обоснование и выбор кинематической структуры исполнительного механизма оптического коммутатора

Приведенный в первой главе обзор механизмов с параллельной кинематикой не может охватить весь спектр устройств данного класса, т.к. число возможных кинематических структур и областей применения весьма широко. Для рассмотрения всего семейства устройств, базирующихся на параллельной кинематике, вводятся различные классификации, упорядочивающие многообразие. Классификацию механизмов удобно проводить на основе анализа их кинематической структуры. Так в работе [10] вводится специфическая форма записи для обозначения механизма с параллельной структурой, где первая буква Р, означает параллельный механизм, а последующие цифры - число степеней свободы и число кинематических цепей. Следующие четыре цифры - количество цепей, налагающих одну, две, три и четыре связи на выходное звено соответственно.

В научной работе [19] для анализа количества степеней свободы W механизмов с параллельной кинематикой используется формула Сомова-Малышева.

Формула Сомова-Малышева имеет вид (1):

$$W = \lambda n - \sum_{i=1}^{\lambda-1} (\lambda - i) p_i, \quad (1)$$

где λ – число степеней свободы твердого тела в пространстве;

n – число подвижных звеньев механизма;

P_i – число кинематических пар, имеющих степень подвижности i .

Применение этой формулы возможно только в том случае, если на движения звеньев, которые входят в состав механизма, не наложено каких-либо общих дополнительных условий и ограничений.

Вариантом формулы (1) является формула (2):

$$W_{CH} = 6(n_{зв} - n_6 - 1) - 5(p_1 - p_{6.1}) - 4(p_2 - p_{6.2}) - 3(p_3 - p_{6.3}) - 2(p_4 - p_{6.4}) - (p_5 - p_{6.5}), \quad (2)$$

где W_{CH} – количество степеней неподвижности кинематической структуры;

n_6 – число ведущих звеньев кинематической цепи;

$p_{6,i}$ – число кинематических пар, имеющих степень подвижности $i \in [1:5]$.

Часто используются модифицированные формулы Сомова-Малышева. Так, например, в работе [9] предлагается определять число D связей, налагаемых на выходное звено механизма при присоединении данной кинематической цепи по формуле (3):

$$D = -6n_{зв} + 5p_1 + 4p_2 + 3p_3 + 2p_4 + p_5. \quad (3)$$

Здесь $D=0$ означает, что присоединяемая кинематическая цепь не налагает связей на движение выходного звена, $D<0$ – в присоединяемой цепи имеется подвижность, не связанная с перемещением выходного звена, $D>0$ – присоединение рассматриваемой цепи приводит к уменьшению числа степеней свободы выходного звена на величину, равную D .

Для механизмов, у которых величина D больше или равна нулю, формула подвижности (1) имеет вид (4):

$$W = 6 - \sum_{i=1}^k D_i = 6 + \sum_{i=1}^k (6n_i - 5p_{1,i} - 4p_{2,i} - 3p_{3,i} - 2p_{4,i} - p_{5,i}). \quad (4)$$

Формула (4) является основой определения степеней подвижности для классификации механизмов с параллельной кинематикой в работе [10].

Другим классификационным признаком для параллельных механизмов может служить количество приводов в каждой соединительной кинематической цепи. В работах [71, 75] используется иная модификация формулы Сомова-

Малышева, которая называется формулой Грюблера. Для пространственных механизмов формула имеет вид (5):

$$W = \lambda(k - p - 1) + \sum_{i=1}^p d_i, \quad (5)$$

где W – число подвижностей механизма (управляемых параметров);

$\lambda=6$ – число степеней свободы твердого тела в пространстве;

k – общее число твердых тел;

p – общее число соединений;

d_i – число степеней свободы соединения с номером i .

На основе формулы (5) в работе [75] предлагается отличная от рассмотренной выше классификация параллельных механизмов. Наряду с числом степеней свободы W параллельного механизма часто необходимо знать степень его неподвижности W' при условии, что все ведущие звенья неподвижны. Для пространственной кинематической структуры имеет место соотношение (6):

$$W' = 6(k - k' - 1) - 5(p_1 - p'_1) - 4(p_2 - p'_2) - \\ - 3(p_3 - p'_3) - 2(p_4 - p'_4) - (p_5 - p'_5), \quad (6)$$

где k' – число активных звеньев кинематической цепи;

p'_i – число активных кинематических пар с i степенями подвижности.

В соответствие со сделанными в первой главе выводами в основу разрабатываемого коммутатора кладется юстирующий механизм с параллельной кинематикой, позиционирующий призму с целью компенсации разъюстировок оптической оси, определенных обратной связью. Условием является наличие трёх поступательных и двух вращательных степеней подвижности.

Выбор структуры механизма юстировки будет проводиться на основе набора известных кинематических структур. В работе И.Н. Егорова [15] предлагается классификация механизмов с параллельной кинематикой, представленная на рисунке 15.



Рисунок 15 – Классификация механизмов с параллельной кинематикой

Топология кинематических связей параллельных манипуляторов зачастую описывается рядом букв, кодирующих тип и последовательность кинематических пар, начиная с неподвижной платформы (R – вращательная пара, P – поступательная пара, S – шаровая пара, U или RR – карданное соединение). Для того чтобы подчеркнуть, что данная кинематическая пара активная, ее буква подчеркивается. В области параллельных механизмов с шестью степенями свободы наиболее популярным является $6-UPS$ параллельный механизм с совмещенными шарнирами.

Помимо классической платформы Стюарта с совмещенными шарнирами, кинематическая схема которого приведена на рисунке 16(а), существует механизм отличающийся порядком присоединения приводных звеньев к платформе, получивший название Flagge Parallel Manipulator и показанный на рисунке 16(б).

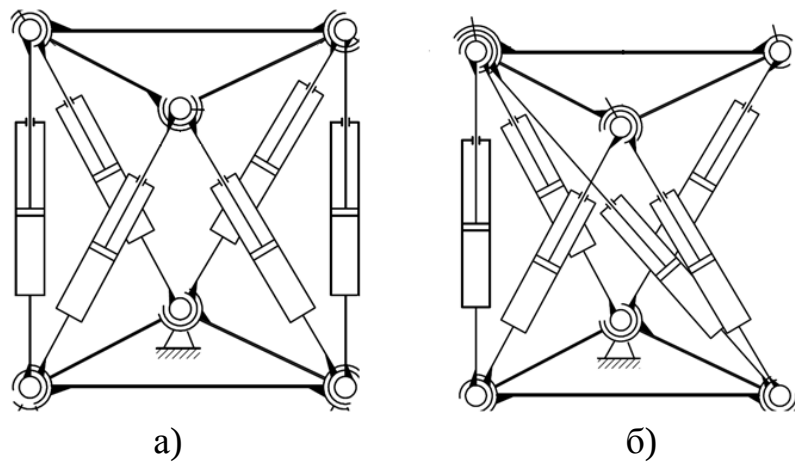


Рисунок 16 – Кинематическая схема платформы Стюарта: а – классическая платформа; б – платформа Flagge Parallel Manipulators

В отличие от схем, представленных на рисунке 16, существуют схемы с разнесенными шарнирами приводных звеньев. Таким образом, каждое звено соединено только с платформой и основанием. Такие манипуляторы имеют меньшую рабочую область, чем классический вариант платформы Стюарта, но при этом обладают рядом преимуществ: простота её реализации, относительно низкая стоимость, упрощенный процесс обхода особых положений [15]. Описанная кинематическая схема показана на рисунке 17.

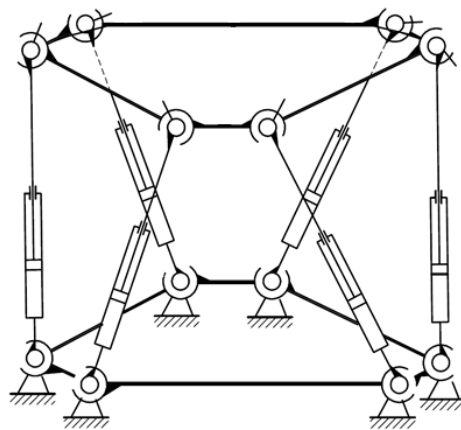


Рисунок 17 – Кинематическая схема механизма с разнесенными шарнирами

Существует класс схем с вращательными приводами. Валы шести вращательных двигателей, установленных на неподвижном основании, имеют

кривошип, перемещающие нижние концы рычагов, которые попарно соединены друг с другом шарнирами. Пример такой схемы показан на рисунке 18.

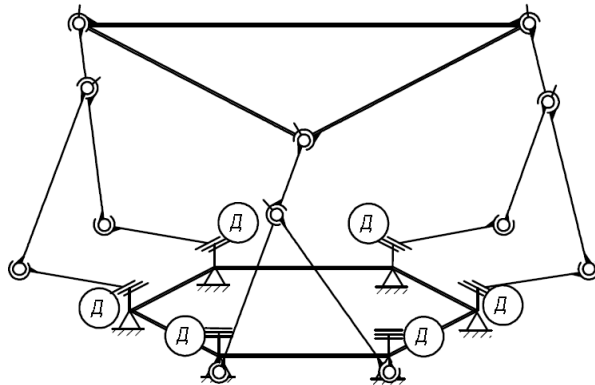


Рисунок 18 – Кинематическая схема механизма с вращательными приводами

Помимо описанных выше структур, в работе В.А. Глазунова [10] предложены параллельно-перекрестные и параллельно-переменные механизмы, представляющие собой гибридные (комбинированные) кинематические структуры. В механизмах параллельно-перекрестной структуры с шестью степенями свободы и шестью кинематическими цепями, три из них расположены параллельно и три перекрестно. Параллельно-переменная структура применяется в тех случаях, когда предписанные траектории манипулятора пересекают зону, где углы давления приобретают недопустимые значения [15].

Из описанных выше кинематических схем наиболее предпочтительным вариантом юстирующего механизма является гексапод с разнесенными шарнирами и линейными приводами штанг. Данная схема проста в изготовлении, позволяет применять стандартные карданные или сферические подвесы в качестве шарниров платформ, а также использовать распространенные линейные приводы в качестве перемещающихся штанг.

По формуле (1) для данной структуры имеем: $n = 13$, $p_1 = 6$ (линейные приводы); $p_2 = 6$ (карданные шарниры); $p_3 = 6$ (сферические шарниры). Таким образом, из формулы Сомова-Малышева следует, что $W=6$, т.е. рассматриваемый механизм имеет 6 степеней свободы (три вращательных и три поступательных).

Аналогично, по формуле (5) для того же механизма имеем: $k = 14$; $p = 20$; $d_1, d_2, \dots, d_6 = 1$ (линейные приводы); $d_7, d_9, \dots, d_{12} = 2$ (карданные шарниры); $d_{13}, d_{15}, \dots, d_{18} = 3$ (сферические шарниры). Получаем $W=6$.

Данный вариант является наиболее предпочтительным, поскольку юстирующий механизм должен иметь, минимум, пять степеней подвижности. Для механизма типа гексапод, в дальнейшем, собственное вращение платформы будет исключено и реализовано отдельным приводом.

2.2. Кинематика исполнительного механизма оптического коммутатора

Представляя собой конструктивно сложный манипулятор, оптический коммутатор обладает своей, специфической кинематикой. Каждая из штанг гексапода представляет собой линейный привод, состоящий из несущих конструкций, двигателя и шариковинтовой передачи (далее – ШВП), причем винт ШВП вращается двигателем, а гайка совершает поступательное движение. Штанга крепится к основанию и платформе карданными шарнирами. Применение карданов диктуется необходимостью исключить собственное вращение гайки, поскольку в ШВП взаимное вращение и перемещение винта и гайки зависимы.

Как и у ряда технологических устройств с параллельной кинематикой [28, 74, 4, 5, 81] рабочий орган коммутатора (в данном случае – призма) располагается на подвижной платформе, однако двигатель призмы не крепится к ней, т.к. виду высокой массы его расположение на платформе неизбежно снизит быстродействие операции юстировки. В связи с этим было принято решение расположить двигатель на неподвижном основании, а вращающий момент передавать на призму посредством гибкой безззорной передачи – сильфонной муфты.

На основе предложенных выше решений была выработана кинематическая схема коммутатора. Кинематическая схема с указанием составных частей одной из штанг гексапода представлена на рисунке 19.

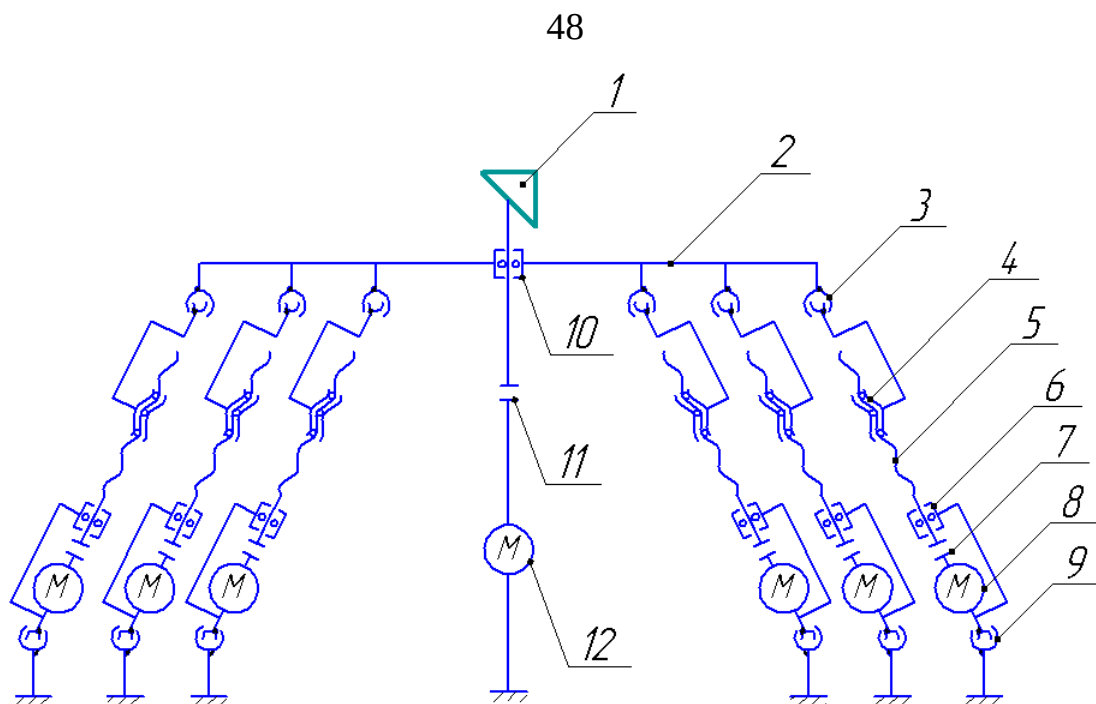


Рисунок 19 – Кинематическая схема оптического коммутатора: 1 – призма; 2 – подвижная платформа; 3 – карданный шарнир платформы; 4 – гайка; 5 – винт ШВП; 6 – подшипниковый узел ШВП; 7 – соединительная муфта; 8 – двигатель; 9 – карданный шарнир основания; 10 – подшипник; 11 – сильфонная муфта привода призмы; 12 – двигатель призмы

В целом, механическая система любого манипулятора описывается системой из уравнения кинематики и уравнения динамики [64]. Поскольку в процессе работы коммутатора требуемые положения призмы вычисляются на основе сигналов обратной связи, требуемые уравнения выводятся на основе решения обратной задачи кинематики для данного механизма.

Задачам кинематики и динамики параллельных механизмов посвящены работы Глазунова В.А., Егорова И.Н., Каганова Ю. Т., Мохаммеда Д., Даффи Д., Сугимото К., Диментберга Ф.М и др.

Для дальнейших расчетов будет использована схема, иллюстрирующая кинематику, степени подвижности и обобщенные координаты коммутатора, представленная на рисунке 20.

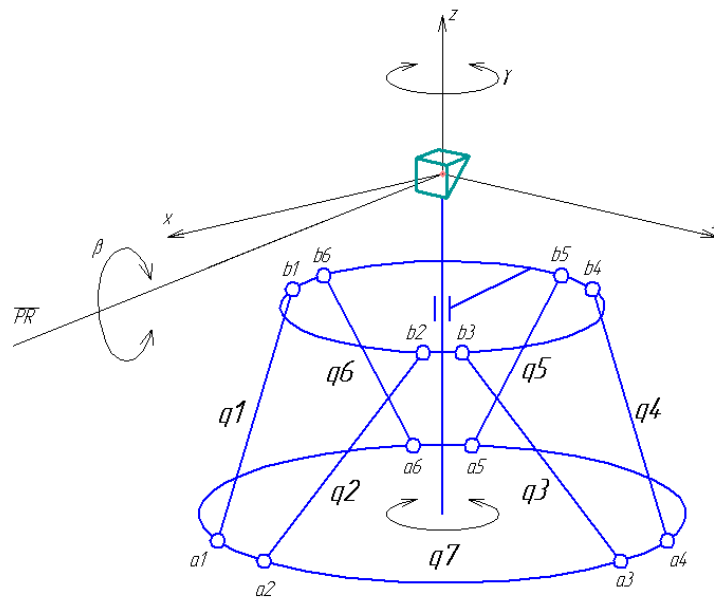


Рисунок 20 – Схематичное изображение оптического коммутатора:

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – шарниры основания;

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ – шарниры подвижной платформы;

$q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7$ – обобщенные координаты;

x, y, z, γ, β – степени подвижности коммутатора;

PR – вектор поворота платформы на угол β

В работах [19, 18] предложено описание кинематики гексаподов и триподов с представлением ориентирующих степеней подвижности в виде углов Эйлера – угла прецессии ψ , угла нутации ϑ и угла собственного вращения φ [24].

Ключевой особенностью данной диссертационной работы является использование иного подхода, включающего в себя ряд особенностей:

- угол собственного вращения φ исключен из степеней подвижности, и заменен углом вращения призмы γ , обеспечиваемым обособленным приводом;
- ориентирующие степени подвижности представлены не в виде углов прецессии ψ и нутации ϑ , а в виде угла наклона платформы β вокруг вектора PR с координатами (x_{pr}, y_{pr}, z_{pr}) . Данное решение связано с особенностями расчета требуемых положений платформы для позиционирования призмы при юстировке. Алгоритмы формирования требуемых позиций описаны в третьей главе данной работы (алгоритм автоюстировки излучения).

Обобщенными координатами $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7$ здесь являются длины штанг $a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3, a_4b_4, a_5b_5, a_6b_6$ и угол поворота привода призмы γ соответственно. Начало координат неподвижной декартовой системы $OXYZ$ находится в точке пространства, совпадающей с точкой излома эталонной оптической оси в призме. В этой системе координаты i -го шарнира основания x_{ai}, y_{ai}, z_{ai} , определяются конструкцией гексапода и, в общем случае, задаются системой (7):

$$\begin{cases} x_{ai} = r_a \cdot \cos((i-1) \cdot \frac{\pi}{3} - \frac{a_a}{2}), i \in [1,3,5]; \\ x_{ai} = r_a \cdot \cos((i-2) \cdot \frac{\pi}{3} + \frac{a_a}{2}), i \in [2,4,6]; \\ y_{ai} = r_a \cdot \sin((i-1) \cdot \frac{\pi}{3} - \frac{a_a}{2}), i \in [1,3,5]; \\ y_{ai} = r_a \cdot \sin((i-2) \cdot \frac{\pi}{3} + \frac{a_a}{2}), i \in [2,4,6]; \\ z_{ai} = -L_a, \end{cases} \quad (7)$$

где r_a – радиус окружности, на которой расположены шарниры основания;

a_a – угол между радиус-векторами шарниров станины, стоящих «в паре»;

L_a – начальное расстояние от точки излома оптической оси в призме до основания гексапода при «нулевом положении платформы».

По аналогии определяются начальные координаты i -го шарнира платформы $x_{0bi}, y_{0bi}, z_{0bi}$ при «нулевом положении» платформы. Они заданы системой (8):

$$\begin{cases} x_{0bi} = r_b \cdot \cos((i-1) \cdot \frac{\pi}{3} + \frac{a_b}{2} - \frac{\pi}{3}), i \in [1,3,5]; \\ x_{0bi} = r_b \cdot \cos((i-2) \cdot \frac{\pi}{3} - \frac{a_b}{2} + \frac{\pi}{3}), i \in [2,4,6]; \\ y_{0bi} = r_b \cdot \sin((i-1) \cdot \frac{\pi}{3} + \frac{a_b}{2} - \frac{\pi}{3}), i \in [1,3,5]; \\ y_{0bi} = r_b \cdot \sin((i-2) \cdot \frac{\pi}{3} - \frac{a_b}{2} + \frac{\pi}{3}), i \in [2,4,6]; \\ z_{0bi} = -L_b, \end{cases} \quad (8)$$

где r_b – радиус окружности, на которой расположены шарниры основания;

a_b – угол между радиус-векторами шарниров платформы, стоящих «в паре»;

L_b – расстояние от точки излома оптической оси в призме до платформы гексапода равное высоте установки призмы над платформой и определяемое конструкцией.

Аналитическая геометрия в пространстве [45] описывает длину L произвольного отрезка АВ уравнением (9):

$$L = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2}, \quad (9)$$

где x_A, y_A, z_A – координаты точки А;

x_B, y_B, z_B – координаты точки В.

В соответствии с уравнением (9) обобщенные координаты в произвольный момент времени описываются системой (10):

$$\begin{cases} q_1 = \sqrt{(x_{a1} - x_{b1})^2 + (y_{a1} - y_{b1})^2 + (z_{a1} - z_{b1})^2}; \\ q_2 = \sqrt{(x_{a2} - x_{b2})^2 + (y_{a2} - y_{b2})^2 + (z_{a2} - z_{b2})^2}; \\ q_3 = \sqrt{(x_{a3} - x_{b3})^2 + (y_{a3} - y_{b3})^2 + (z_{a3} - z_{b3})^2}; \\ q_4 = \sqrt{(x_{a4} - x_{b4})^2 + (y_{a4} - y_{b4})^2 + (z_{a4} - z_{b4})^2}; \\ q_5 = \sqrt{(x_{a5} - x_{b5})^2 + (y_{a5} - y_{b5})^2 + (z_{a5} - z_{b5})^2}; \\ q_6 = \sqrt{(x_{a6} - x_{b6})^2 + (y_{a6} - y_{b6})^2 + (z_{a6} - z_{b6})^2}; \\ q_7 = \gamma, \end{cases} \quad (10)$$

где x_{bi}, y_{bi}, z_{bi} – координаты i -го шарнира платформы;

γ – угол поворота призмы в произвольный момент времени.

Угол поворота призмы γ задается непосредственно, без дополнительных вычислений, т.к. осуществляется обособленным приводом.

Координаты шарниров платформы (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}) в произвольный момент времени рассчитываются на основе требуемого положения призмы в пространстве, задаваемого следующими величинами:

- координаты платформы x_p, y_p, z_p в декартовой системе координат;
- координаты вектора поворота платформы (PR) x_{pr}, y_{pr}, z_{pr} ;
- угол поворота платформы β .

Поскольку координаты шарнира x_{bi} , y_{bi} , z_{bi} определяются положением платформы, которая относительно своего начального положения переместилась в пространстве и повернулась вокруг некоего вектора, дальнейшие расчеты будут вестись с помощью векторно-матричного исчисления [64]. Пересчет начальных координат i -го шарнира $(x_{0bi}, y_{0bi}, z_{0bi})$ в координаты i -го шарнира переместившейся платформы (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}) осуществляется по формуле (11):

$$\begin{pmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \\ 1 \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} x_{0bi} \\ y_{0bi} \\ z_{0bi} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где M – матрица однородных преобразований.

Матрица однородных преобразований представляет собой матрицу размерностью 4×4 , которая преобразует вектор, выраженный в однородных координатах. Однородная матрица преобразования (12) может быть разбита на четыре компонента [21] – четыре матрицы.

$$M = \begin{pmatrix} & & & \vdots \\ & R_{3 \times 3} & & \vdots \\ & & & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & P_{1 \times 3} \\ & F_{3 \times 1} & & \vdots \\ & & & S_{1 \times 1} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где R – матрица поворота размерности 3×3 ;

P – матрица переноса размерностью 1×3 ;

F – матрица преобразования перспективы размерностью 3×1 ;

S – матрица масштабирования (масштабирующий множитель).

Масштабирующий множитель S в данной ситуации равен единице (13):

$$S = 1. \quad (13)$$

Матрица преобразования перспективы F , не вносящая в вычисления никакого влияния имеет вид (14):

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Матрица переноса P представляет собой 3 компонента линейного перемещения и состоит из трех требуемых координат платформы x_p, y_p, z_p и имеет вид (15):

$$P = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Матрица поворота R в общем случае является матрицей поворота вокруг произвольной оси, и получаются путем перемножения однородных матриц элементарных поворотов [21]. В данном случае применяется матрица поворота на определенный угол вокруг определенной оси [67]. Здесь R является матрицей поворота на угол β вокруг вектора PR , заданного в виде координат x_{pr}, y_{pr}, z_{pr} , и имеет вид (16):

$$R = \begin{pmatrix} \cos\beta + (1-\cos\beta) \cdot x_{pr}^2 & (1-\cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot y_{pr} - \sin\beta \cdot z_{pr} & (1-\cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot z_{pr} + \sin\beta \cdot y_{pr} \\ (1-\cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot x_{pr} + \sin\beta \cdot z_{pr} & \cos\beta + (1-\cos\beta) \cdot y_{pr}^2 & (1-\cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot z_{pr} - \sin\beta \cdot x_{pr} \\ (1-\cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot x_{pr} - \sin\beta \cdot y_{pr} & (1-\cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot y_{pr} + \sin\beta \cdot x_{pr} & \cos\beta + (1-\cos\beta) \cdot z_{pr}^2 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

После объединения четырех компонентов в единую матрицу однородного преобразования M , выражение (11) для пересчета начальных координат i -го шарнира ($x_{0bi}, y_{0bi}, z_{0bi}$) в координаты i -го шарнира (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}) переместившейся платформы примет вид выражения (17):

$$\begin{pmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta + (1-\cos\beta) \cdot x_{pr}^2 & (1-\cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot y_{pr} - \sin\beta \cdot z_{pr} & (1-\cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot z_{pr} + \sin\beta \cdot y_{pr} \\ (1-\cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot x_{pr} + \sin\beta \cdot z_{pr} & \cos\beta + (1-\cos\beta) \cdot y_{pr}^2 & (1-\cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot z_{pr} - \sin\beta \cdot x_{pr} \\ (1-\cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot x_{pr} - \sin\beta \cdot y_{pr} & (1-\cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot y_{pr} + \sin\beta \cdot x_{pr} & \cos\beta + (1-\cos\beta) \cdot z_{pr}^2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_{0bi} \\ y_{0bi} \\ z_{0bi} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Приводя выражение (17) к виду системы уравнений, получим зависимость координат i -го шарнира платформы от её перемещения по степеням подвижности (x_p, y_p, z_p, β, PR), имеющую вид (18):

$$\begin{cases}
x_{bi}(x_p, y_p, z_p, \beta, \overline{PR}) = (\cos\beta + (1 - \cos\beta) \cdot x_{pr}^2) \cdot x_{0bi} + ((1 - \cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot y_{pr} - \\
- \sin\beta \cdot z_{pr}) \cdot y_{0bi} + ((1 - \cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot z_{pr} + \sin\beta \cdot y_{pr}) \cdot z_{0bi} + x_p; \\
y_{bi}(x_p, y_p, z_p, \beta, \overline{PR}) = ((1 - \cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot x_{pr} + \sin\beta \cdot z_{pr}) \cdot x_{0bi} + (\cos\beta + \\
+ (1 - \cos\beta) \cdot y_{pr}^2) \cdot y_{0bi} + ((1 - \cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot z_{pr} - \sin\beta \cdot x_{pr}) \cdot z_{0bi} + y_p; \\
z_{bi}(x_p, y_p, z_p, \beta, \overline{PR}) = ((1 - \cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot x_{pr} - \sin\beta \cdot y_{pr}) \cdot x_{0bi} + \\
+ ((1 - \cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot y_{pr} + \sin\beta \cdot x_{pr}) \cdot y_{0bi} + (\cos\beta + (1 - \cos\beta) \cdot z_{pr}^2) \cdot z_{0bi} + z_p.
\end{cases} \quad (18)$$

Рассчитав координаты i -го шарнира основания (x_{ai}, y_{ai}, z_{ai}) по системе (7) и вычислив начальные координаты i -го шарнира платформы ($x_{0bi}, y_{0bi}, z_{0bi}$) по системе (8), система уравнений (10) преобразуются в систему уравнений для вычисления обобщенных координат коммутатора в зависимости от требуемых перемещений платформы (x_p, y_p, z_p, β, PR) в виде (19):

$$\begin{cases}
q_i = \sqrt{(x_{ai} - (\cos\beta + (1 - \cos\beta) \cdot x_{pr}^2) \cdot x_{0bi} + ((1 - \cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot y_{pr} - \\
- \sin\beta \cdot z_{pr}) \cdot y_{0bi} + ((1 - \cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot z_{pr} + \sin\beta \cdot y_{pr}) \cdot z_{0bi} + \\
+ x_p)^2 + (y_{ai} - ((1 - \cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot x_{pr} + \sin\beta \cdot z_{pr}) \cdot x_{0bi} + \\
+ (\cos\beta + (1 - \cos\beta) \cdot y_{pr}^2) \cdot y_{0bi} + ((1 - \cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot z_{pr} - \\
- \sin\beta \cdot x_{pr}) \cdot z_{0bi} + y_p)^2 + (z_{ai} - ((1 - \cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot x_{pr} - \\
- \sin\beta \cdot y_{pr}) \cdot x_{0bi} + ((1 - \cos\beta) \cdot z_{pr} \cdot y_{pr} + \sin\beta \cdot x_{pr}) \cdot y_{0bi} + \\
+ (\cos\beta + (1 - \cos\beta) \cdot z_{pr}^2) \cdot z_{0bi} + z_p)^2}, i \in [1, 2, 3, 4, 5, 6]; \\
q_7 = \gamma.
\end{cases} \quad (19)$$

Ключевыми особенностями системы уравнений кинематики оптического коммутатора являются:

- собственное вращение q_7 определяется требуемым углом поворота призмы и более ничем, поэтому для определения q_7 не требуется каких-либо вычислений, а его величина не ограничивается особенностями кинематики (в отличие от ситуации, когда вращение призмы обеспечивается гексаподом);

- уравнения для обобщенных координат $q_1, q_2, \dots, q_6$ упрощаются, т.к. собственное вращение не является степенью подвижности гексапода и матрица поворота не учитывает его;

- в части ориентирующих перемещений платформы, уравнения для обобщенных координат $q_1, q_2, \dots, q_6$ задаются в функции угла поворота β вокруг вектора PR , заданного координатами x_{pr}, y_{pr}, z_{pr} . Данный подход удобен, поскольку при юстировке необходимо поворачивать платформу с призмой вокруг оптической оси на такой угол, чтобы отраженная ось опадала в целевую точку. В этом случае вектором PR является оптическая ось, а угол β является необходимым углом поворота.

Полученная система уравнений (19) предназначена для расчетов длин штанг и позиций призмы при дискретном позиционировании, которое является штатным режимом работы коммутатора. В данной ситуации, вновь рассчитанные значения $q_1, q_2, \dots, q_7$ загружаются в контроллер системы приводов, дается команда на перемещение приводов в новую позицию, и в последствие цикл действий повторяется.

Однако, в случае применения коммутатора для контурного управления оптической осью, можно ввести систему уравнений, описывающую требуемые перемещения платформы (x_p, y_p, z_p, β, PR) в функции времени. Дифференцируя и дважды дифференцируя систему уравнений по времени можно получить скорости и ускорения соответствующих штанг гексапода. В этом случае для контурного управления расчет новых позиций может идти непрерывно с дроблением по времени на определенный шаг, либо необходимая траектория рассчитывается заранее и загружается в контроллер в виде массива уже готовых данных.

2.3. Динамика исполнительного механизма оптического коммутатора

Второе уравнение, входящее в систему, описывающую механическую систему коммутатора, является уравнение динамики, которое связывает обобщенные координаты звеньев с действующими на систему силами. В зависимости от решаемых задач это уравнение может быть получено в различной форме из числа известных в теоретической механике – в форме уравнений

Ньютона, Гаусса, Даламбера, Лагранжа и их модификаций [64]. В данном случае основой для получения законов динамики является уравнение Лагранжа второго рода, в общем виде записывающееся (20):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dq_i} \right) - \frac{dE}{dq_i} = Q_i, \quad (20)$$

где E – кинетическая энергия системы;

q_i – обобщенная координата;

Q_i – обобщенная сила, соответствующая i -й координате.

В данном случае координатами будут являться независимые перемещения коммутатора. При рассмотрении кинематики коммутатора были рассмотрены следующие степени подвижности:

- линейное перемещение платформы x_p ;
- линейное перемещение платформы y_p ;
- линейное перемещение платформы z_p ;
- угловое перемещение платформы β с осью вращения, заданной координатами x_{pr} , y_{pr} , z_{pr} вектора PR ;
- угловое перемещение призмы γ .

Для описания вращения платформы гексапода на определенный угол вокруг заданной оси была использована матрица поворота (16). Данная матрица, описывающая вращение платформы вокруг оси на определенный угол, может быть преобразована к виду углов Эйлера (ϕ , θ , ψ) для дальнейшего описания динамики. Переход от матрицы поворота (16) к углам Эйлера (следующим в порядке осей x - y - z) производится на основе элементов матрицы [67] по системе уравнений (21):

$$\begin{cases} \phi = \arctan\left(\frac{(1 - \cos\beta) \cdot y_{pr} \cdot z_{pr} - \sin\beta \cdot x_{pr}}{\cos\beta + (1 - \cos\beta) \cdot z_{pr}^2}\right); \\ \theta = \arcsin((1 - \cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot z_{pr} + \sin\beta \cdot y_{pr}); \\ \psi = \arctan\left(\frac{(1 - \cos\beta) \cdot x_{pr} \cdot y_{pr} - \sin\beta \cdot z_{pr}}{\cos\beta + (1 - \cos\beta) \cdot x_{pr}^2}\right). \end{cases} \quad (21)$$

Таким образом, при рассмотрении динамики коммутатора будут рассмотрены следующие обобщенные координаты:

- q_1 – линейное перемещение платформы x_p ;
- q_2 – линейное перемещение платформы y_p ;
- q_3 – линейное перемещение платформы z_p ;
- q_4 – угловое перемещение платформы φ ;
- q_5 – угловое перемещение платформы θ ;
- q_6 – угловое перемещение платформы ψ ;
- q_7 – угловое перемещение призмы γ .

Кинетическая энергия верхней платформы с массой m , моментами инерции J_x, J_y, J_z можно описать следующим уравнением (22):

$$E_k = \frac{m \cdot \dot{x}_p^2}{2} + \frac{m \cdot \dot{y}_p^2}{2} + \frac{m \cdot \dot{z}_p^2}{2} + \frac{J_x \cdot \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{J_y \cdot \dot{\theta}^2}{2} + \frac{J_z \cdot \dot{\psi}^2}{2}. \quad (22)$$

Из уравнения видно, что полная кинетическая энергия платформы гексапода состоит из суммы кинетических энергий поступательного движения по трем координатам (x_p, y_p, z_p) и вращательного движения по трем координатам (φ, θ, ψ).

Схема действующих сил для гексапода приведена на рисунке 21.

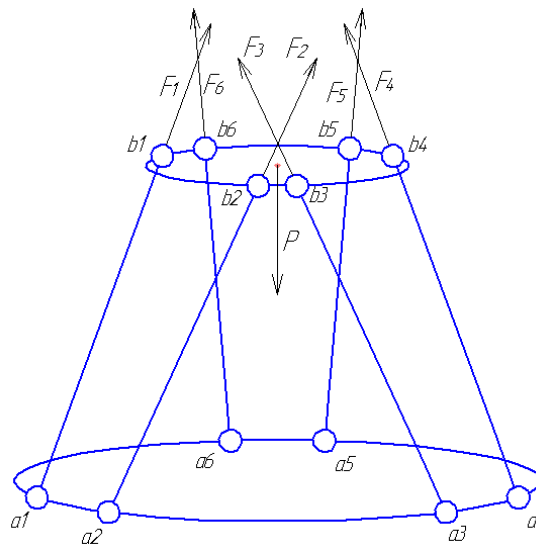


Рисунок 21 – Схема действующих сил для гексапода:

$F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ – силы штанг гексапода; P – сила тяжести;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – шарниры основания;

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ – шарниры подвижной платформы

В процессе анализа динамики гексапода будет рассматриваться работа на элементарных приращениях. Приравняем к нулю выражение для работы на элементарных приращениях (23):

$$(P, \delta R_p) + \sum_{i=1}^6 (F_i, \delta R_{bi}) = 0, \quad (23)$$

где δR_p – элементарное приращение радиус-вектора верхней платформы;

δR_{bi} – элементарное приращение радиус-вектора соответствующего шарнира верхней платформы.

Сила тяжести P представляет собой вектор, определяемый по выражению (24):

$$P = (0 \quad 0 \quad -m \cdot g), \quad (24)$$

где g – ускорение свободного падения.

Элементарное приращение радиус-вектора верхней платформы δR_B может быть представлено в виде вектора (25):

$$\delta R_p = \begin{pmatrix} \delta x_p \\ \delta y_p \\ \delta z_p \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Компонент F_i может быть разложен на три составляющие в соответствие с уравнением (26):

$$F_i = F_i \cos \alpha_1 + F_i \cos \alpha_2 + F_i \cos \alpha_3, \quad (26)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы между вектором F_i и соответствующими осями X, Y, Z , показанными на рисунке 22.

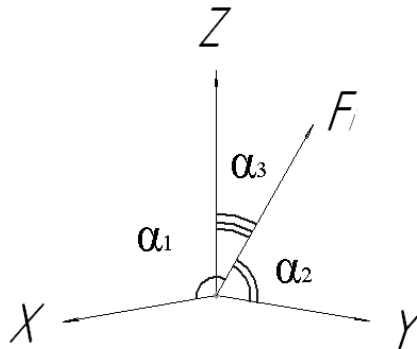


Рисунок 22 – Вектор F_i

Элементарное приращение радиус-вектора шарнира верхней платформы может быть представлено в виде вектора (27):

$$\delta R_{bi} = \begin{pmatrix} \delta x_{bi} \\ \delta y_{bi} \\ \delta z_{bi} \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Элементарное приращение радиус-вектора шарнира верхней платформы может быть представлено в виде произведения матрицы Якоби на вектор элементарных приращений обобщенных координат. Поскольку координата шарнира кинематически не может зависеть от угла поворота призмы, обобщенная координата q_7 не участвует в выражении для элементарного приращения радиус-вектора шарнира, имеющем вид (28):

$$\begin{pmatrix} \delta x_{bi} \\ \delta y_{bi} \\ \delta z_{bi} \end{pmatrix} = J_{bi} \cdot \begin{pmatrix} \delta q_1 \\ \delta q_2 \\ \delta q_3 \\ \delta q_4 \\ \delta q_5 \\ \delta q_6 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

где J_{bi} – матрица Якоби для соответствующего шарнира.

J_{bi} – это матрица частных производных, в общем виде представляющая собой матрицу для n обобщенных координат (29):

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\delta X}{\delta q_1} & \frac{\delta X}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta X}{\delta q_n} \\ \frac{\delta Y}{\delta q_1} & \frac{\delta Y}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta Y}{\delta q_n} \\ \frac{\delta Z}{\delta q_1} & \frac{\delta Z}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta Z}{\delta q_n} \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Для разрабатываемого коммутатора с гексаподом с обобщенными координатами $q_1 \dots q_6$, матрица Якоби для i -го шарнира будет иметь вид (30):

$$J_{Bi} = \begin{pmatrix} \frac{\delta x_{Bi}}{\delta x_p} & \frac{\delta x_{Bi}}{\delta y_p} & \frac{\delta x_{Bi}}{\delta z_p} & \frac{\delta x_{Bi}}{\delta \varphi} & \frac{\delta x_{Bi}}{\delta \theta} & \frac{\delta x_{Bi}}{\delta \psi} \\ \frac{\delta y_{Bi}}{\delta x_p} & \frac{\delta y_{Bi}}{\delta y_p} & \frac{\delta y_{Bi}}{\delta z_p} & \frac{\delta y_{Bi}}{\delta \varphi} & \frac{\delta y_{Bi}}{\delta \theta} & \frac{\delta y_{Bi}}{\delta \psi} \\ \frac{\delta z_{Bi}}{\delta x_p} & \frac{\delta z_{Bi}}{\delta y_p} & \frac{\delta z_{Bi}}{\delta z_p} & \frac{\delta z_{Bi}}{\delta \varphi} & \frac{\delta z_{Bi}}{\delta \theta} & \frac{\delta z_{Bi}}{\delta \psi} \end{pmatrix}. \quad (30)$$

Как и при рассмотрении кинематики коммутатора, пересчет начальных координат i -го шарнира $(x_{0bi}, y_{0bi}, z_{0bi})$ в координаты i -го шарнира переместившейся платформы (x_{bi}, y_{bi}, z_{bi}) осуществляется по формуле (11). Однако, для случая описания вращения платформы углами Эйлера с последовательностью x - y - z , матрица поворота R , получаемая умножением матриц поворота вокруг осей X, Y, Z [21] будет иметь вид (31):

$$R = \begin{pmatrix} \cos\psi \cdot \cos\theta & -\sin\psi \cdot \cos\theta & -\sin\theta \\ -\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi & \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi & -\cos\theta \cdot \sin\varphi \\ \cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \sin\psi \cdot \sin\varphi & -\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi & \cos\theta \cdot \cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (31)$$

После включения матрицы поворота (31) в матрицу однородных преобразований, выражение (11) примет вид выражения (32):

$$\begin{pmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi \cdot \cos\theta & -\sin\psi \cdot \cos\theta & -\sin\theta & x_p \\ -\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi & \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi & -\cos\theta \cdot \sin\varphi & y_p \\ \cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \sin\psi \cdot \sin\varphi & -\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi & \cos\theta \cdot \cos\varphi & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_{0bi} \\ y_{0bi} \\ z_{0bi} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (32)$$

Приводя выражение (32) к виду системы уравнений, получим зависимость координат i -го шарнира от перемещения по $x_p, y_p, z_p, \varphi, \theta, \psi$ имеющую вид (33):

$$\begin{cases} x_{bi}(x_p, y_p, z_p, \varphi, \theta, \psi) = \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot x_{0bi} - \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot y_{0bi} - \sin\theta \cdot z_{0bi} + x_p; \\ y_{bi}(x_p, y_p, z_p, \varphi, \theta, \psi) = (-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi) \cdot x_{0bi} + \\ + (\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} - \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot z_{0bi} + y_p; \\ z_{bi}(x_p, y_p, z_p, \varphi, \theta, \psi) = (\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \sin\psi \cdot \sin\varphi) \cdot x_{0bi} + \\ + (-\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi) \cdot y_{0bi} + \cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot z_{0bi} + z_p. \end{cases} \quad (33)$$

Конкретные значения частных производных образуют итоговый вид матрицы Якоби для гексапода оптического коммутатора (34):

$$J_{bi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot x_{0bi} + \\ & & & & + \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot y_{0bi} - \\ & & & & - \cos\theta \cdot z_{0bi} & -\sin\psi \cdot \cos\theta \cdot x_{0bi} - \\ & & & & & - \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot y_{0bi} \\ 0 & 1 & 0 & (-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi - \\ & & & - \sin\psi \cdot \sin\varphi) \cdot x_{0bi} + & - \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot x_{0bi} + & (\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \\ & & & + (\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi - & + \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot y_{0bi} + & + \cos\psi \cdot \cos\varphi) \cdot x_{0bi} + \\ & & & - \cos\psi \cdot \sin\varphi) \cdot y_{0bi} - & + \sin\theta \cdot \sin\varphi \cdot z_{0bi} & + (\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi - \\ & & & - \cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot z_{0bi} & & - \sin\psi \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} \\ 0 & 0 & 1 & (-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \\ & & & + \sin\psi \cdot \cos\varphi) \cdot x_{0bi} + & \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot x_{0bi} - & (-\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \\ & & & + (\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + & - \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} - & + \cos\psi \cdot \sin\varphi) \cdot x_{0bi} + \\ & & & + \cos\psi \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} + & - \sin\theta \cdot \cos\varphi \cdot z_{0bi} & - (\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \\ & & & + \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot z_{0bi} & & + \sin\psi \cdot \sin\varphi) \cdot y_{0bi} \end{pmatrix}. \quad (34)$$

На основе полученной матрицы Якоби (34) элементарное приращение вектора положения δR_{bi} для i -го шарнира платформы примет вид (35):

$$\begin{aligned}
& \left(\begin{array}{ccccccc}
1 & 0 & 0 & 0 & -\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot x_{0bi} + & -\sin\psi \cdot \cos\theta \cdot x_{0bi} - \\
& & & & +\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot y_{0bi} - & -\cos\psi \cdot \cos\theta \cdot y_{0bi} \\
& & & & -\cos\theta \cdot z_{0bi} & \\
0 & 1 & 0 & (-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi - & -\cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot x_{0bi} + & (\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \\
& & & -\sin\psi \cdot \sin\varphi) \cdot x_{0bi} + & +\sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot y_{0bi} + & +\cos\psi \cdot \cos\varphi) \cdot x_{0bi} + \\
& & & +(\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi - & +\sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot y_{0bi} + & +(\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi - \\
& & & -\cos\psi \cdot \sin\varphi) \cdot y_{0bi} - & +\sin\theta \cdot \sin\varphi \cdot z_{0bi} & -\sin\psi \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} \\
& & & -\cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot z_{0bi} & & \\
0 & 0 & 1 & (-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + & \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot x_{0bi} - & (-\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \\
& & & +\sin\psi \cdot \cos\varphi) \cdot x_{0bi} + & -\sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} - & +\cos\psi \cdot \sin\varphi) \cdot x_{0bi} - \\
& & & +(\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + & -\sin\theta \cdot \cos\varphi \cdot z_{0bi} & -(\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \\
& & & +\cos\psi \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} + & & +\sin\psi \cdot \sin\varphi) \cdot y_{0bi} \\
& & & +\cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot z_{0bi} & &
\end{array} \right) \times \\
& \times \left(\begin{array}{l}
\delta x_p + \delta\theta \cdot (-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot x_{0bi} + \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot y_{0bi} - \cos\theta \cdot z_{0bi}) + \\
+ \delta\psi \cdot (-\sin\psi \cdot \cos\theta \cdot x_{0bi} - \cos\psi \cdot \cos\theta \cdot y_{0bi}) \\
\delta y_p + \delta\varphi \cdot ((-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi - \sin\psi \cdot \sin\varphi) \cdot x_{0bi} + \\
+ (\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi - \cos\psi \cdot \sin\varphi) \cdot y_{0bi} - \cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot z_{0bi}) + \\
\delta\theta \cdot (-\cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot x_{0bi} + \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot y_{0bi} + \sin\theta \cdot \sin\varphi \cdot z_{0bi}) + \\
+ \delta\psi \cdot ((\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi) \cdot x_{0bi} + \\
+ (\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi - \sin\psi \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi}) \\
\delta z_p + \delta\varphi \cdot ((-\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \sin\psi \cdot \cos\varphi) \cdot x_{0bi} + \\
+ (\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi + \cos\psi \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} + \cos\theta \cdot \sin\varphi \cdot z_{0bi}) + \\
+ \delta\theta \cdot (\cos\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi \cdot x_{0bi} - \sin\psi \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi) \cdot y_{0bi} - \sin\theta \cdot \cos\varphi \cdot z_{0bi}) + \\
+ \delta\psi \cdot ((-\sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \cos\psi \cdot \sin\varphi) \cdot x_{0bi} - (\cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi + \\
+ \sin\psi \cdot \sin\varphi) \cdot y_{0bi})
\end{array} \right). \quad (35)
\end{aligned}$$

Подставляя в уравнение (23) выражение для силы тяжести (24), элементарное приращение радиус-вектора верхней платформы (25), выражение для силы в i-м шарнире (26) и элементарное приращение вектора положения i-го шарнира (35), получим выражение работы на элементарных приращениях, представленное в виде (36):

$$\begin{aligned}
& -\delta z_p \cdot mg + \delta x_p \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_1 + \\
& + \delta \theta \cdot (-\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot x_{0bi} + \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot y_{0bi} - \cos \theta \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_1 + \\
& + \delta \psi (-\sin \psi \cdot \cos \theta \cdot x_{0bi} - \cos \psi \cdot \cos \theta \cdot y_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_1 + \\
& + \delta y_p \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2 + \delta \varphi \cdot ((-\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi - \sin \psi \cdot \sin \varphi) \cdot x_{0bi} + \\
& + (\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi - \cos \psi \cdot \sin \varphi) \cdot y_{0bi} - \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2 + \\
& + \delta \theta \cdot (-\cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot x_{0bi} + \sin \psi \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot y_{0bi} + \\
& + \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2 + \\
& + \delta \psi \cdot ((\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + \cos \psi \cdot \cos \varphi) \cdot x_{0bi} + \\
& + (\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi - \sin \psi \cdot \cos \varphi) \cdot y_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2 + \\
& + \delta z_p \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3 + \delta \varphi \cdot ((-\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + \sin \psi \cdot \cos \varphi) \cdot x_{0bi} + \\
& + (\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + \cos \psi \cdot \cos \varphi) \cdot y_{0bi} + \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3 + \\
& + \delta \theta \cdot (\cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot x_{0bi} - \sin \psi \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi) \cdot y_{0bi} - \\
& - \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3 + \\
& + \delta \psi \cdot ((-\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + \cos \psi \cdot \sin \varphi) \cdot x_{0bi} - (\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + \\
& + \sin \psi \cdot \sin \varphi) \cdot y_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3 = 0.
\end{aligned} \tag{36}$$

Комбинации множителей при элементарных приращениях δx_p , δy_p , δz_p , $\delta \varphi$, $\delta \theta$, $\delta \psi$ дают выражения для обобщенных сил $Q_1 \dots Q_6$. Подставляя данные выражения и выражение для кинетической энергии (22) в уравнение Лагранжа (20), получим уравнения, описывающие динамику гексапода оптического коммутатора. Динамика привода призмы, соответствующая обобщенной силе Q_7 , без учета трения описывается основным законом динамики вращающегося тела [65] в виде уравнения (37):

$$M_{prism} = J_{prism} \cdot \ddot{\gamma}, \quad (37)$$

где M_{prism} – вращающий момент привода призмы (обобщенная сила Q_7);

J_{prism} – момент инерции привода вместе с рабочим органом - призмой.

Полученные дифференциальные уравнения, соответствующие обобщенным силам $Q_1 \dots Q_7$ представлены в виде системы (38):

$$\left\{ \begin{array}{l} m \cdot \ddot{x}_p = \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_1; \\ m \cdot \ddot{y}_p = \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2; \\ m \cdot \ddot{z}_p = \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3 - mg; \\ J_x \cdot \ddot{\varphi} = ((-\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi - \sin \psi \cdot \sin \varphi) \cdot x_{0bi} + (\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi - \cos \psi \cdot \sin \varphi) \cdot y_{0bi} - \\ - \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2 + ((-\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + \sin \psi \cdot \cos \varphi) \cdot x_{0bi} + \\ + (\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + \cos \psi \cdot \cos \varphi) \cdot y_{0bi} + \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3; \\ J_y \cdot \ddot{\theta} = (-\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot x_{0bi} + \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot y_{0bi} - \cos \theta \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_1 + \\ + (-\cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot x_{0bi} + \sin \psi \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot y_{0bi} + \\ + \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2 + (\cos \psi \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot x_{0bi} - \\ - \sin \psi \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot y_{0bi} - \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot z_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3; \\ J_z \cdot \ddot{\psi} = (-\sin \psi \cdot \cos \theta \cdot x_{0bi} - \cos \psi \cdot \cos \theta \cdot y_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_1 + ((\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi + \\ + \cos \psi \cdot \cos \varphi) \cdot x_{0bi} + (\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi - \sin \psi \cdot \cos \varphi) \cdot y_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_2 + \\ + ((-\sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + \cos \psi \cdot \sin \varphi) \cdot x_{0bi} - \\ - (\cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi + \sin \psi \cdot \sin \varphi) \cdot y_{0bi}) \cdot \sum_{i=1}^6 F_i \cos \alpha_3 = 0; \\ J_{prism} \cdot \ddot{\gamma} = M_{prism}. \end{array} \right. \quad (38)$$

Из данной системы уравнений могут быть найдены необходимые управляющие силы при непосредственном задании $x_p, y_p, z_p, \varphi, \theta, \psi, \gamma$ в функции времени, либо при задании x_p, y_p, z_p, β, PR в функции времени и переходе к углам Эйлера, описанном в системе уравнений (21).

Формирование эффективных уравнений динамики манипулятора в целом, является одной из важнейших задач в робототехнике. Ее решение необходимо для моделирования динамики манипуляторов в масштабе реального времени, для разработки эффективных алгоритмов управления роботами с учетом динамики, оценки качества кинематической схемы и т.д. [60].

Не смотря на то, что в данной работе не предусматривалось контурное управление движением манипулятора оптического коммутатора, приведенное выше описание динамики может служить основой для дальнейшей разработки и уточнения уравнений динамики. В последствие, уточненное описание динамики может лечь в основу алгоритмов контурного управления положением оптической оси, осуществляемого при помощи разрабатываемого оптического коммутатора.

2.4. Моделирование исполнительного механизма оптического коммутатора

Одним из методов исследования многих системы является её моделирование и дальнейшие испытания полученной модели, на основе которых могут быть сделаны выводы о работоспособности системы. Такой метод позволяет отказаться от натурных испытаний, которые могут быть сопряжены с определенными затратами, неудобством, риском и т.д.

Моделирование элементов оптического коммутатора производилось в пакете MATLAB 8.0 и среде Simulink. Для моделирования использовались библиотеки `continues` и `simMechanics`. На языке MATLAB была написана программа, описывающая геометрические параметры механики модели, степени подвижности и связи, а также начальные условия эксперимента.

Созданная модель подразделяется на следующие основные части:

- симулятор управляющих воздействий;
- модель контроллера;
- модель механики;
- модель средств измерения.

Модель манипулятора оптического коммутатора в среде Simulink приведена на рисунке 23.

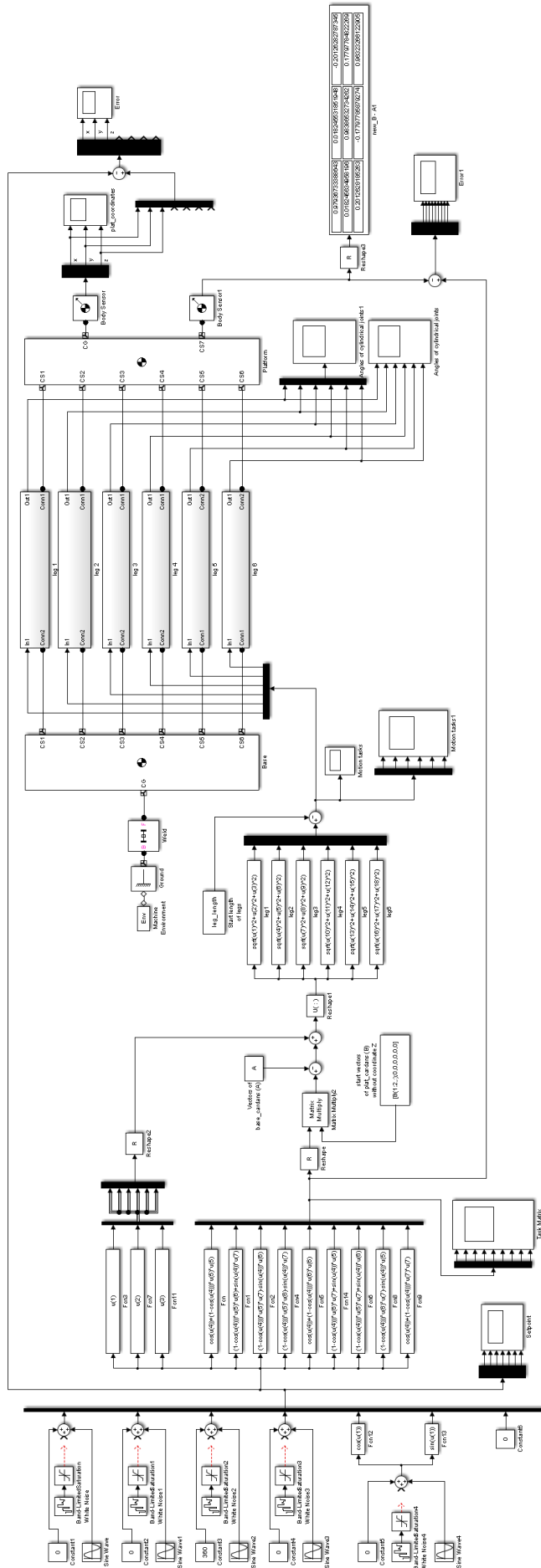


Рисунок 23 – Модель манипулятора оптического коммутатора в среде Simulink

Симулятор управляющих воздействий является моделью системы управления, выдающей входные сигналы для контроллера коммутатора (гармонический сигнал, релейная функция и случайный сигнал).

Модель контроллера описывает математическую составляющую программы управления. Здесь на основе вектроно-матричных алгоритмов построена система преобразования входных сигналов в управляющие воздействия приводов.

Модель механики описывает механическую и приводную составляющую коммутатора. Здесь на основе элементов библиотеки SimMechanics смоделирована конструкция гексапода, включающая верхнюю и нижнюю платформы, шесть штанг с приводами, шарико-винтовыми передачами и карданными опорами. Базисом для построения данной субмодели является геометрия гексапода и взаимное расположение его элементов. Все параметры модели в части геометрических размеров являются редактируемыми и импортируются в модель из предзагрузочной программы PreLoad.m. Исходный текст программы PreLoad.m приведен в приложении А к данной диссертационной работе.

Модель средств измерения необходима для слежения за положением подвижной платформы гексапода. Данная модель реализована на базе звеньев визуализации Scope, устанавливаемых в связке со звеньями Body Sensor, позволяющими вести наблюдение за координатами тел в 3-мерном пространстве.

Полученная разность линейных координат являет собой абсолютную погрешность линейных перемещений гексапода. Полученная разность элементов матрицы поворота указывает на погрешности углового перемещения.

В процессе испытаний модели в имитаторе сигналов задавались следующие задающие воздействия:

- гармонический закон изменения линейных координат X , Y , Z с амплитудой 50 мм и частотой 10 Гц;
- гармонический закон изменения угла наклона платформы β с амплитудой 0,5 рад и частотой 10 Гц;
- вращение вектора PR вокруг оси Z по гармоническому закону с амплитудой 6 рад и частотой 3 Гц.

В процессе моделирования были получены следующие осциллограммы:

- линейные перемещения приводов гексапода (рисунок 24);
- абсолютные погрешности линейных координат платформы (рисунок 25);
- абсолютные погрешностей элементов матрицы поворота (рисунок 26).

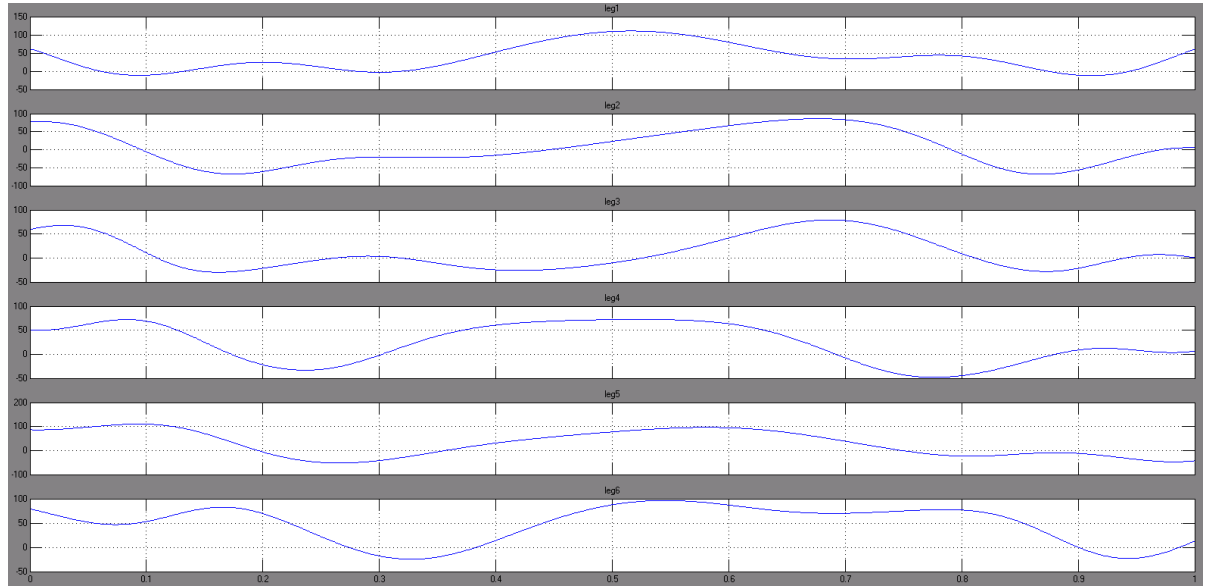


Рисунок 24 – Линейные перемещения приводов гексапода, мм

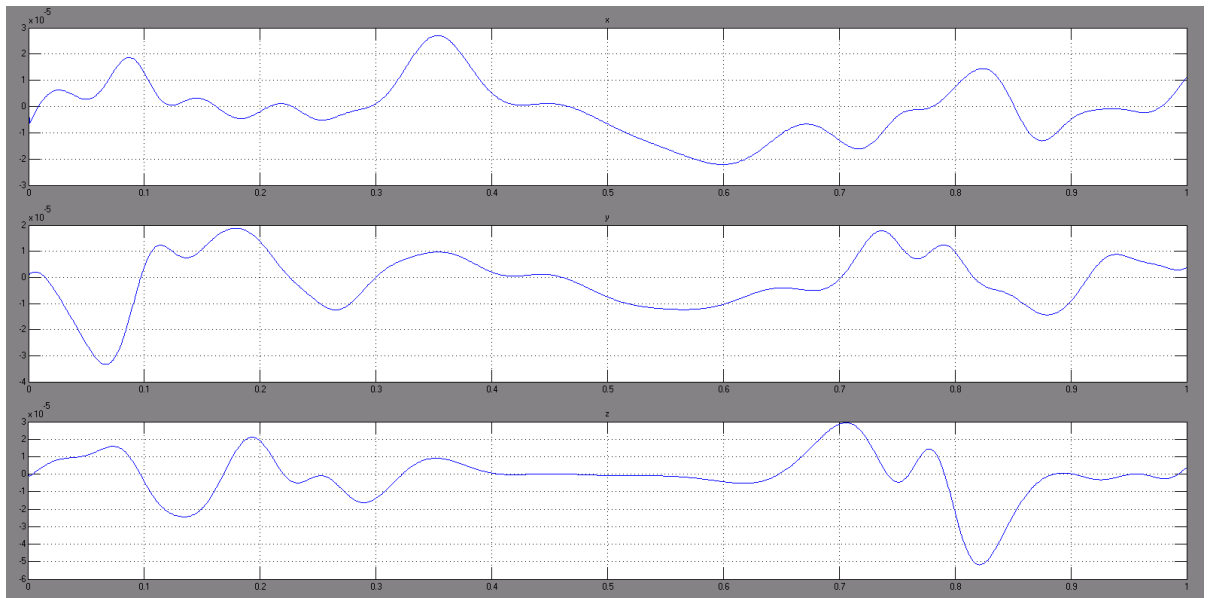


Рисунок 25 – Абсолютные погрешности линейных координат платформы, мм

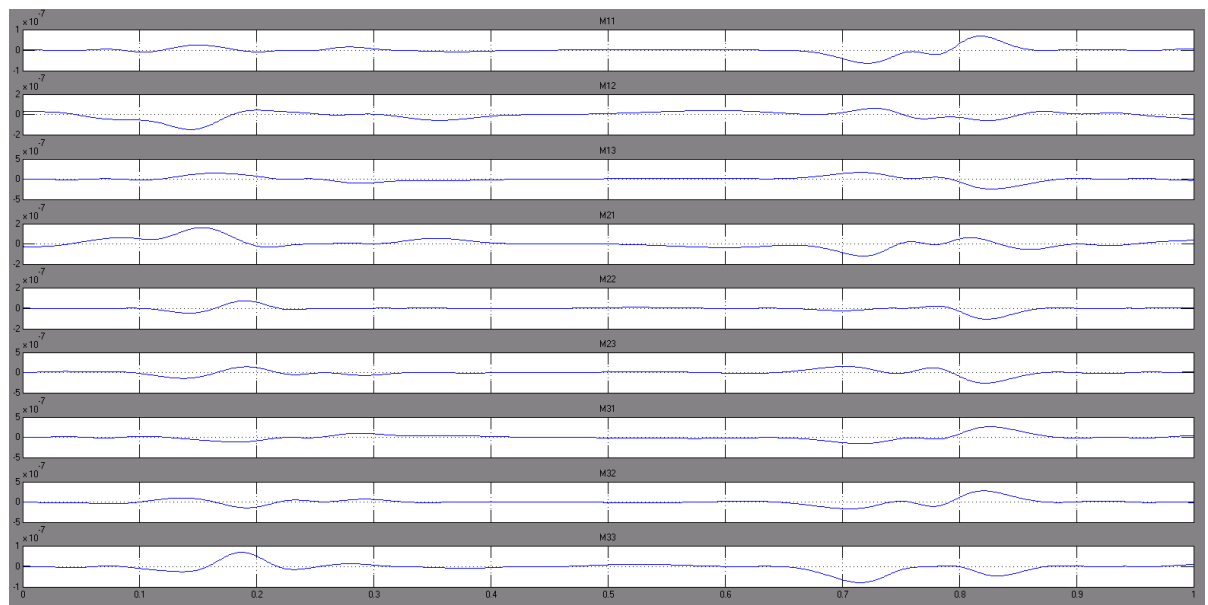


Рисунок 26 – Абсолютные погрешности элементов матрицы поворота

В процессе моделирования гексапода происходила 3D визуализация его перемещений в пространстве методами библиотеки SimMechanics. 3D модели гексапода при различных заданных координатах показаны на рисунке 27.

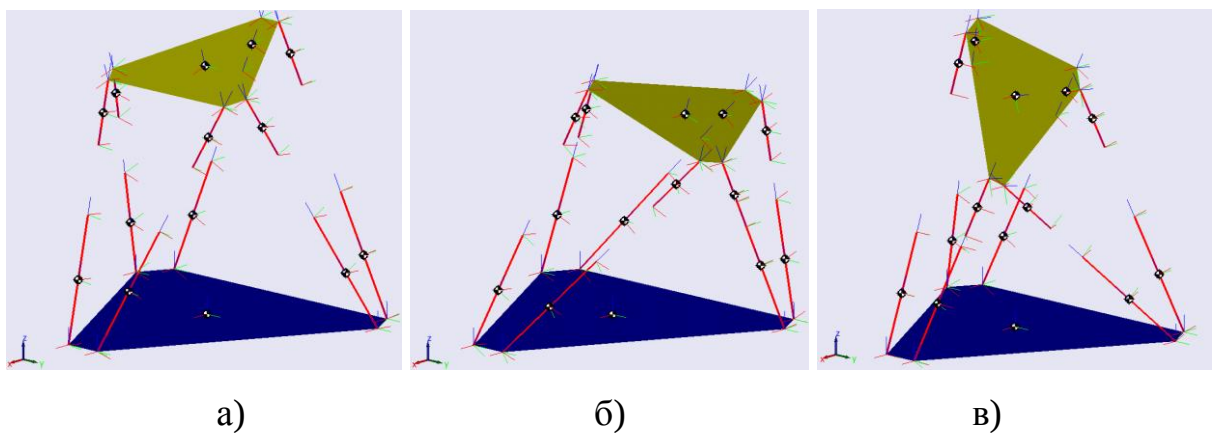


Рисунок 27 – 3D модели гексапода при различных заданных координатах:

а – поворот вокруг оси Y на угол $\beta=0.3$ рад;

б – $X= -150$ мм, $Z= -100$ мм, поворот вокруг оси X на угол $\beta= -0.3$ рад;

в – потеря управляемости при повороте вокруг оси X на угол $\beta= -1,35$ рад

По результатам проведенного моделирования были сделаны следующие выводы:

1. Абсолютные погрешности линейного позиционирования платформы не превысили $5 \cdot 10^{-5}$ мм, а абсолютные погрешности значений элементов матрицы поворота не превысили $5 \cdot 10^{-7}$. Полученные результаты находятся на уровне точности численных методов расчета Simulink и говорят о корректности разработанных законов перемещения.

2. Трехмерная визуализация показала корректность решения обратной задачи кинематики для данного механизма. Аномалии при штатном процессе движений отсутствовали, что также говорит о корректности разработанных законов перемещения оптического коммутатора.

2.5. Результаты и выводы

По итогам второй главы диссертации, могут быть сделаны следующие выводы:

- на основе анализа разнообразных параллельнокинематических структур выбрана кинематическая структура оптического коммутатора: гексапод с расположенным на подвижной платформе оптическим элементом.

- проанализирована кинематика оптического коммутатора. При этом ключевой особенностью разработанных законов движения оптического коммутатора явилось исключение угла собственного вращения платформы из степеней подвижности гексапода и замена его углом вращения обособленного привода призмы, а также отказ от представления ориентирующих степеней подвижности в виде углов Эйлера в пользу угла поворота платформы вокруг некоторого вектора. Данный подход позволил упростить уравнения для обобщенных координат штанг гексапода и максимально упростить уравнение собственного вращения рабочего органа;

- проведено моделирование исполнительного механизма оптического коммутатора, в ходе которого показана корректность решения обратной задачи кинематики, при этом ошибка позиционирования составила менее $5 \cdot 10^{-5}$ мм, а 3D-визуализация позволила убедиться в отсутствии аномалий в процессе движения, что говорит о корректности решения обратной задачи кинематики.

Глава 3. Структура системы и алгоритмы управления оптическим коммутатором

Основой для дальнейшего корректного функционирования любого робототехнического и мехатронного устройства является проработка его структуры в целом и формирование решений в области отдельных подсистем. В соответствие с ранее полученными математическими уравнениями движения устройства создаются общие алгоритмы управления, а также алгоритмы функционирования отдельных структурных единиц.

3.1. Структура системы оптического коммутатора

Разрабатываемый оптический коммутатор представляет собой структурно сложную систему, состоящую из набора основных блоков, предназначенных для определенных операций. Структурная схема, иллюстрирующая коммутатор в составе оптической установки, с указанием составных частей изделия и взаимосвязей [12, 58], показана на рисунке 28.



Рисунок 28 – Структурная схема оптического коммутатора в составе оптической установки

Разрабатываемый оптический коммутатор включает в себя следующие структурные единицы:

1. Персональный компьютер (далее ПК) – является системой управления верхнего уровня для оптического коммутатора.

2. Система приводов – является структурной и конструктивной единицей, включающей в себя элементы электропривода, контроллер движения и необходимую периферию. Согласно схеме информационных и энергетических потоков в мехатронной системе, приводимой Ю.В. Подураевым, данная система приводов, как единое целое, является информационно электрическим преобразователем [47].

3. Манипулятор – является структурной и конструктивной единицей, объединяющей в себе двигатели, механические передачи и несущие конструктивные элементы, предназначенные для позиционирования рабочего органа коммутатора – призмы.

4. Призма – является рабочим органом оптического коммутатора и объектом управления в мехатронной системе.

5. Система отведения излучения – представляет собой систему зеркал/светоделительных пластин для отведения части излучения с оптической оси на элементы системы главной обратной связи и системы регистрации параметров.

6. Система главной обратной связи – охватывает всю систему оптического коммутатора связью по положению оптической оси. Она представляет собой канал, включающий в себя оптические элементы, оптико-информационный преобразователь и интерфейс связи с системой управления верхнего уровня (ПК)

Оптический коммутатор интегрирован в оптическую установку, имеющую набор источников излучения, коммутируемых разрабатываемым устройством.

Параллельно оптической установке с коммутатором функционирует система регистрации параметров. Она предназначена для сбора, обработки и хранения параметров рабочего режима оптического коммутатора. В данной работе регистрировались частоты коммутации, точности юстировки, а также параметры работы приводов.

Для пояснения процессов, протекающих в отдельных функциональных цепях и устройстве в целом, дается функциональная схема, приведенная на рисунке 29.

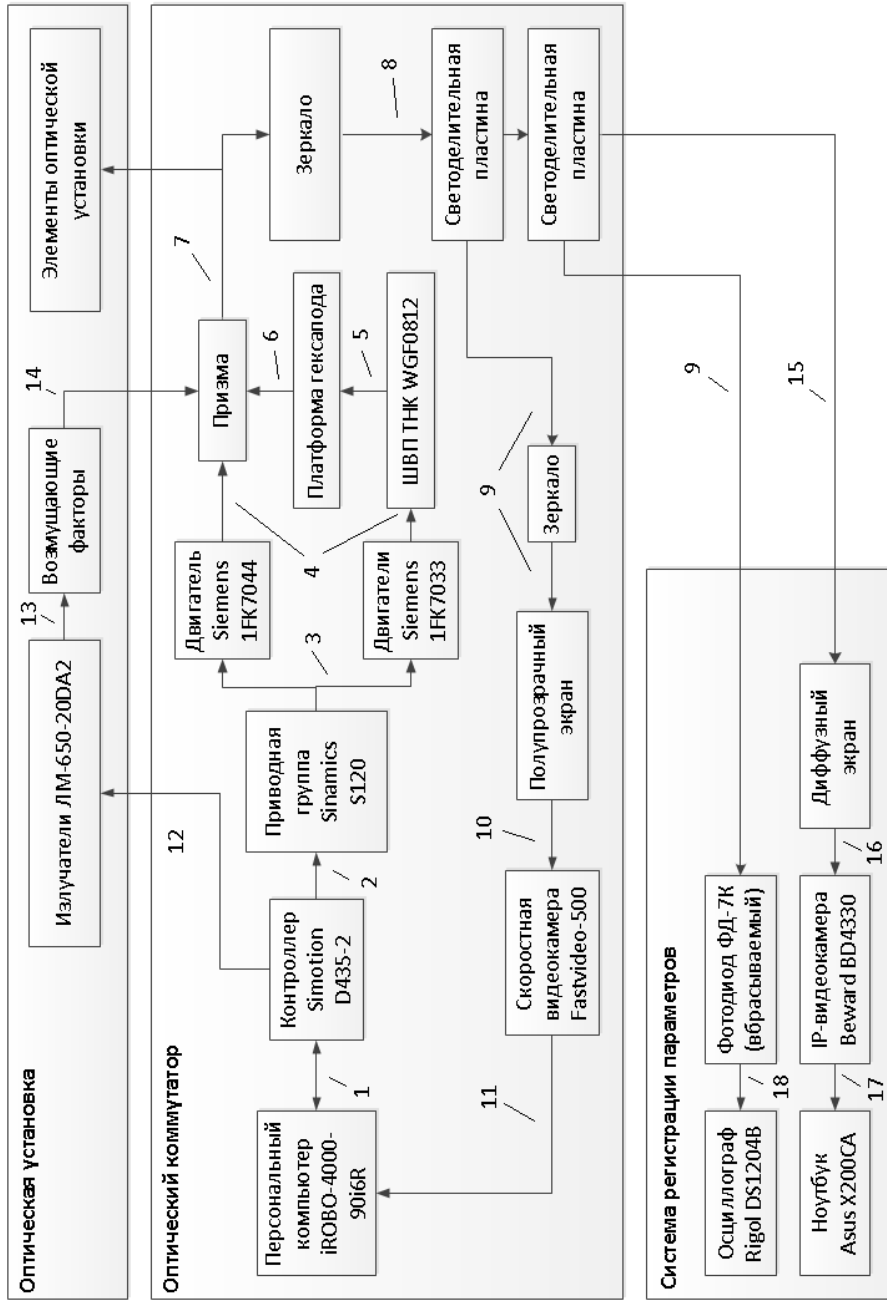


Рисунок 29 – Функциональная схема оптического коммутатора, интегрированного в оптическую установку:

- 1 – служебные команды; 2 – задающее воздействие; 3 – управляющее воздействие; 4 – угловые перемещения; 5 – линейные перемещения; 6 – пространственное перемещения; 7 – оптическое излучение; 8 – отраженное излучение; 9 – отведенный пучок; 10 – положение светового пятна; 11 – видеосигнал; 12 – логический сигнал; 13 – оптическое излучение; 14 – излучение разъюстированной оси; 15 – прошедший пучок; 16 – положение светового пятна; 17 – видеосигнал; 18 – напряжение

В данной работе коммутатор использовался в оптической установке, в которой оси имитировались излучателями, разъюстировки имитировались клиньями, а прочие элементы отсутствовали. Целью коммутатора была компенсация вводимых разъюстировок и, как следствие, падение светового пучка в центр диффузного экрана. Оптический коммутатор мог выполнять следующие задачи:

- коммутация оптических осей в режиме автоюстировки на основе определенных отклонений осей от эталонного положения;
- перемещение рабочего органа (призмы) по независимым степеням подвижности (координатам);
- независимое управление штангами гексапода (управление отдельными приводами).

Последние две функции являются служебными и имеют два назначения:

- утилитарное – позиционирование рабочего органа при встраивании в оптическую установку с целью определения положения источников излучения и корректного расположения выходной оптической оси;
- исследовательское – изучение перемещения оптической оси при различных перемещениях коммутатора, получения экспериментальных данных о параметрах приводов при позиционировании по отдельным координатам.

Последовательность действий оптического коммутатора (алгоритм) при определении разъюстировок и дальнейшем опросе излучателей в режиме автоюстировки приведена в виде блок-схемы на рисунке 30.

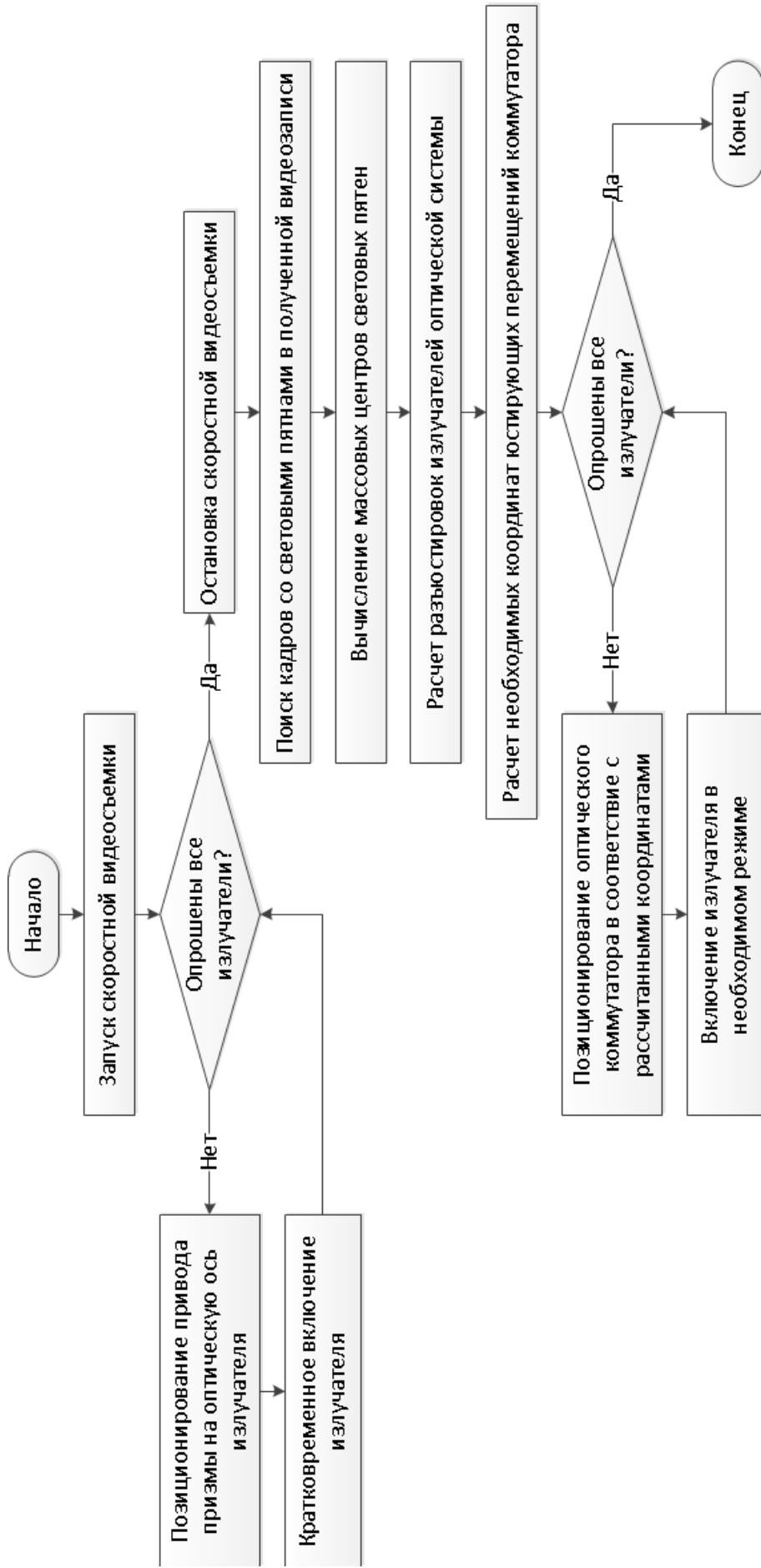


Рисунок 30 – Последовательность действий оптического коммутатора при определении разбьюстировок и дальнейшем опросе излучателей в режиме автоюстировки

В приведенной на рисунке 30 блок-схеме последовательности действий показаны основные операции оптического коммутатора:

1. Опрос разъюстированных излучателей, включающихся в кратковременном и маломощном режиме, и получение скоростной видеозаписи со световыми пятнами на диффузном экране.
2. Поиск видеокадров со световыми пятнами на них.
3. Вычисление массовых центров световых пятен на кадрах видеозаписи.
4. Расчет разъюстировок оптических осей излучателей.
5. Расчет необходимых координат юстирующих перемещений коммутатора, необходимых для компенсации разъюстировок излучателей.
6. Опрос излучателей в режиме автоюстировки (в режиме компенсации разъюстировок).

Все операции обеспечиваются ПО управления оптическим коммутатором. Вторая, третья, четвертая и пятая операции производятся по алгоритму автоюстировки, лежащему в основе концепции оптического коммутатора.

3.2. Алгоритмы управления оптическим коммутатором

Одной из основных функций оптического коммутатора, наряду с коммутацией источников, является компенсация разъюстировок оптических осей.

3.2.1. Система главной обратной связи

Разъюстировка источника излучения представляет собой угловое отклонение его оси излучения от эталонного положения и может быть разложена на вертикальную и горизонтальную составляющие (углы A_V и A_H соответственно). Схематичное изображение хода эталонного и разъюстированного луча при различных видах разъюстировки излучателя приведено на рисунке 31.

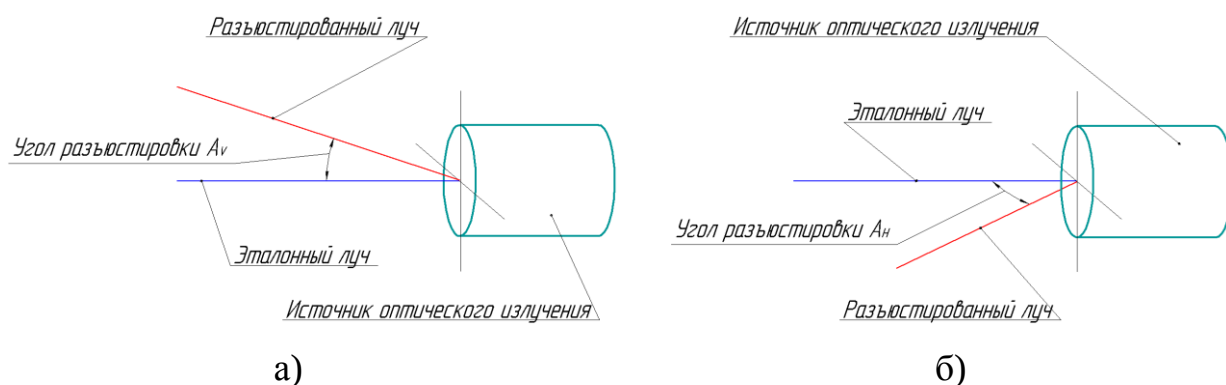


Рисунок 31 – Схема разъюстировки источника оптического излучения:

а – вертикальная разъюстировка; б – горизонтальная разъюстировка

Определить степень увода излучения от эталонной оси позволяет система главной обратной связи по положению светового луча. Введение такой обратной связи позволяет судить о положении оси излучения, которая ранее являлась не полностью наблюдаемой координатой. Формирование главной обратной связи сводится к построению сенсорной системы, фиксирующей положение оси излучения.

В соответствие со схемой, приведенной на рисунке 31, сенсорная система должна формировать сигнал по двум составляющим разъюстировки: вертикальной угловой и горизонтальной угловой. Таким образом, достаточно отводить световой луч одной пластиной на полупрозрачный диффузный экран. В работах [49, 22, 48] дан подход к формированию главной обратной связи коммутатора на основе двух пластин и четырех составляющих отклонения: двух угловых и двух линейных. Однако испытания показали, что основной вклад в отклонение оси приносят угловые разъюстировки. Кроме того, определение линейных разъюстировок затруднено при малом расстоянии между пластинами, не дающим достаточного «оптического плеча». Поэтому итоговым вариантом было использование одного отклоненного пучка для скоростной камеры. Кроме того, для увеличения расстояния между пластиной и полупрозрачным экраном, использовалось поворотное зеркало. Наряду с увеличением расстояния такое решение позволяет сделать расположение элементов более компактным.

Схема, иллюстрирующая взаиморасположение элементов сенсорной системы (системы главной обратной связи и системы регистрации параметров), приведена на рисунке 32.

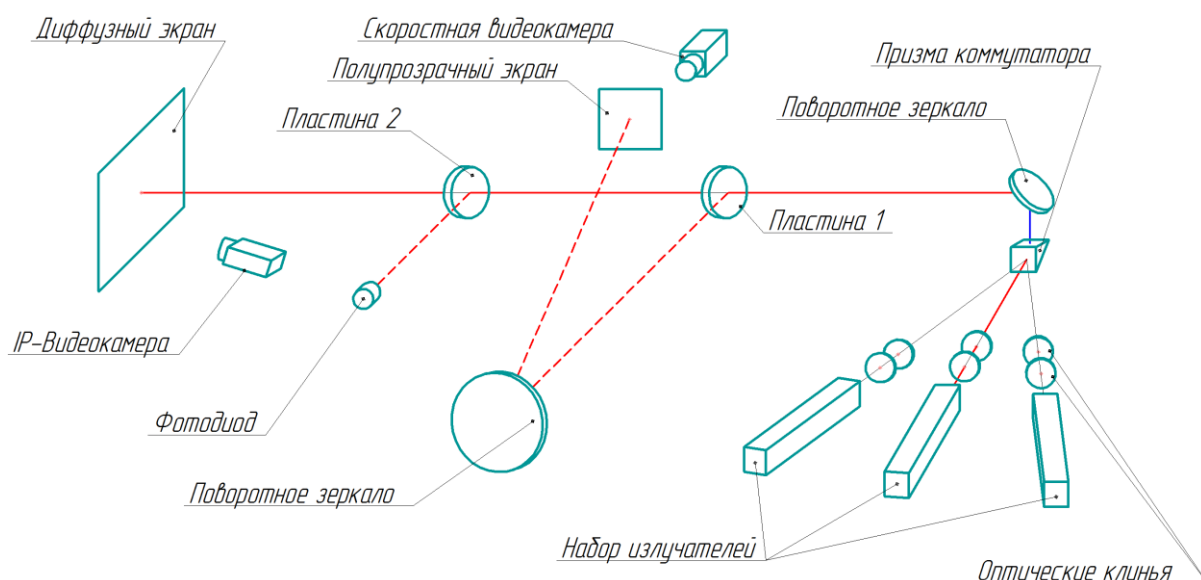


Рисунок 32 – Взаиморасположение элементов сенсорной системы

При определении разъюстировок коммутатор дискретно опрашивает излучатели, в то время как скоростная камера записывает видеофайл со световыми пятнами на полупрозрачном экране. Видеофайл представляет собой последовательность кадров - блоков по 204800 байт. Каждый байт определяет яркость соответствующего пикселя. Если в момент захвата конкретного кадра включился излучатель, то на кадре будут присутствовать засвеченные пиксели – световые пятна.

Определение позиции пятен на кадре видеофайла сводится к последовательности действий:

- 1) нахождение засвеченных пикселей, принадлежащих к световым пятнам;
- 2) вычисление весовых центров световых пятен.

Пиксель светового пятна обладает заведомо большей яркостью, чем фон, поэтому принадлежность некоторого пикселя p к множеству засвеченных пикселей Z определяется законом (39):

$$f(p) > f_{\text{фон}} \Rightarrow p \in Z, \quad (39)$$

где $f(p)$ – яркость пикселя;

$f_{\text{фон}}$ – яркость фоновых пикселей, определяемая шумом видеоматрицы в случае общего затемнения окружающего пространства;

p – некоторый пиксель видеокадра;

Z – множество засвеченных пикселей (световое пятно).

Алгоритм, реализующий поиск видеокадров с засвеченными пикселями, показан на рисунке 33.

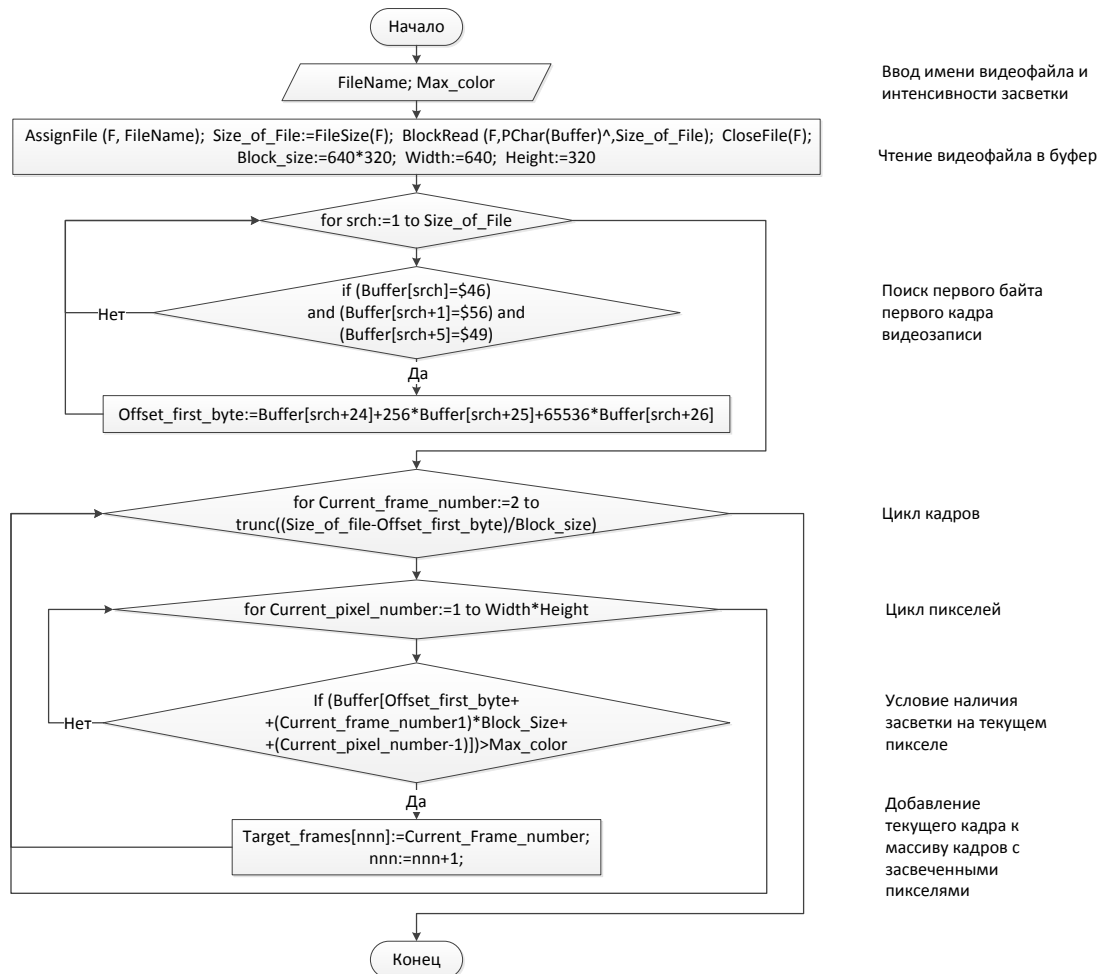


Рисунок 33 – Блок-схема алгоритма поиска видеокадров

Приведенный выше алгоритм производит поиск кадров с засвеченными пикселями в видеозаписи, сформированной скоростной видеокамерой, представляющей собой файл с расширением .fvlab. В начале данного файла содержится служебная информация о видеозаписи, в частности – номер (оффсет) первого байта первого кадра. Поскольку оффсет первого байта не является

величиной постоянной, алгоритм производит его поиск. В файлах .fvlab младший байт оффсета находится на 26 байт позже сочетания байт, образующих фразу «FVI» (в соответствие с таблицей символов ASCII).

Предварительный поиск видеокадров с засвеченными пикселями позволяет в дальнейшем исключить кадры без световых пятен из видеоанализа, и массовые центры пятен для них не будут вычисляться. Данное решение позволяет добиться снижения затрачиваемого на видеоанализ времени.

В процессе исследования эффективности данного решения производился расчет центров световых пятен в видеозаписи длиной 500 кадров, из которых пятна имелись в 66 кадрах, причем расчет производился как с предварительным поиском, так и без. На основе двадцати проведенных экспериментов были построены графики времени выполнения видеоанализа, показанные на рисунке 34.

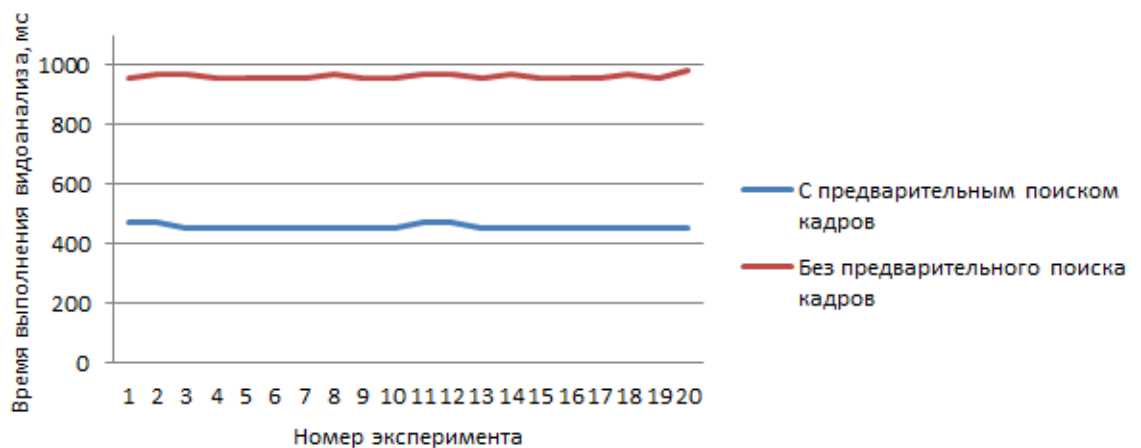


Рисунок 34 – Графики времени выполнения видеоанализа с применением предварительного поиска кадров и без предварительного поиска

По результатам 20 экспериментов среднее время видеоанализа без предварительного поиска кадров составило 960,05 мс, а с предварительным поиском 456,1 мс. Проведенное исследование показало снижение затрачиваемого времени в среднем на 52% при применении предварительного поиска. Таким образом, данное решение признано эффективным средством снижения временных затрат при выполнении расчета центров световых пятен.

3.2.2. Алгоритм вычисления массовых центров световых пятен

Определение координат весового центра пятна сводится к нахождению среднего арифметического значения координат n пикселей, составляющих пятно.

Расчеты ведутся в соответствии с системой уравнений (40):

$$\begin{cases} w(Z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w(p_i); \\ h(Z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h(p_i), \end{cases} \quad (40)$$

где $w(Z)$, $h(Z)$ – координаты центра светового пятна по горизонтали и вертикали видеокadra соответственно;

$w(p_i)$, $h(p_i)$ – координаты i -го пикселя по горизонтали и вертикали соответственно.

Блок-схема алгоритма, реализующего вычисление массовых центров пятен на видеокдрах, показана на рисунке 35.

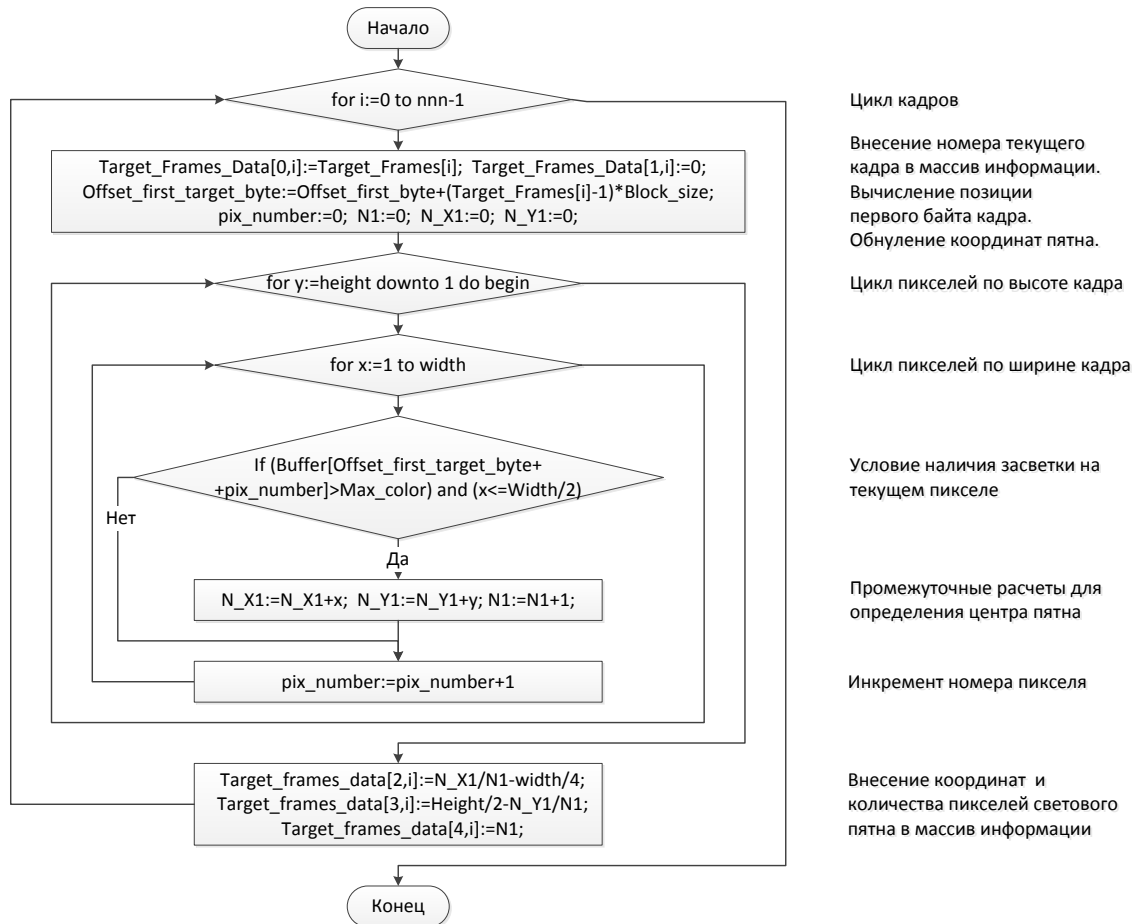


Рисунок 35 – Блок-схема алгоритма вычисления центров световых пятен

Исследования данного алгоритма проводились при видеоанализе файла, содержащего 500 кадров (на видеозаписи были зафиксированы три световых пятна от трех различных излучателей. На рисунке 36 приведены фрагменты видеок кадров №49, 224, 408, содержащих световые пятна с указанием центра кадра белыми линиями, центра пятна – зелеными линиями, а засвеченных пикселей – красным цветом.

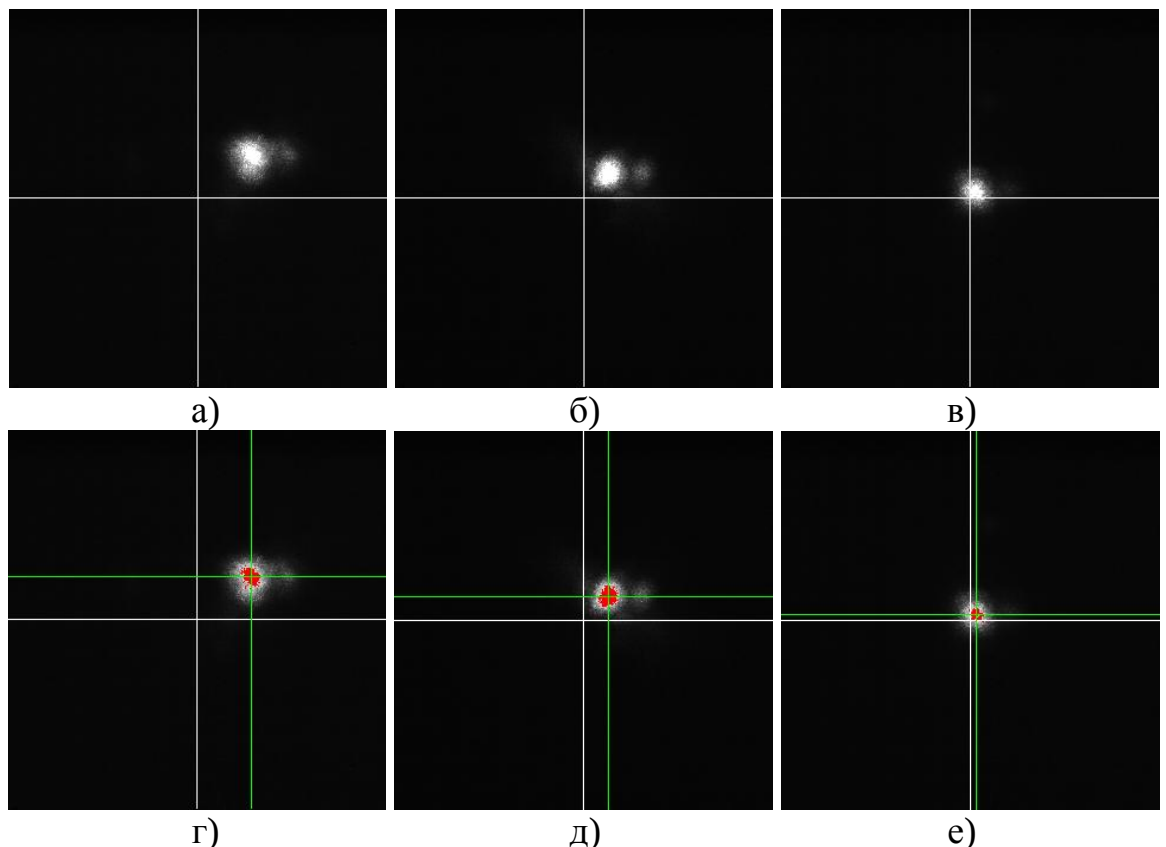


Рисунок 36 – Результаты исследования алгоритма определения массовых центров световых пятен: а, б, в – видеок кадры до вычисления массового центра пятна; г, д, е – видеок кадры после вычисления массового центра

Проведенное исследование показало корректное функционирование алгоритма. Для различных форм и положений пятен их центры вычислялись корректно, что подтверждалось дальнейшей графической визуализацией кадров с обозначением центра пятна и засвеченных пикселей.

3.2.3. Алгоритм автоюстировки излучения

Поскольку при видеоанализе использовалась область кадра размером 320x320, отклонение светового пятна от центра области кадра определяются системой уравнений (41):

$$\begin{cases} x(Z) = w(Z) - 160; \\ y(Z) = h(Z) - 160, \end{cases} \quad (41)$$

где $x(Z)$, $y(Z)$ – отклонения пятна от центра области по горизонтали и вертикали соответственно.

В соответствие с рисунком 10, излучатели расположены в единой плоскости, и их оптические оси сходятся к призме с некоторыми углами α между собой. Здесь угол α является шагом призмы коммутатора при опросе излучателей. При повороте призмы на угол α для опроса очередного излучателя, световое пятно на полупрозрачном экране также совершит поворот на угол α вокруг центра области видеокadra. Визуально это будет выглядеть, как перемещение световой точке по окружности с диаметром равным отклонению её от эталонного положения. Данный поворот точки необходимо учесть при расчетах, поэтому вводится система уравнений (42):

$$\begin{cases} \Delta x = x(Z) \cdot \cos \alpha + y(Z) \cdot \sin \alpha; \\ \Delta y = -x(Z) \cdot \sin \alpha + y(Z) \cdot \cos \alpha, \end{cases} \quad (42)$$

где Δx , Δy – отклонения пятна от центра области кадра по горизонтали и вертикали соответственно с учетом угла поворота призмы;

α – угол поворота призмы.

На основе данных по отклонениям светового пятна можно определить разъюстировки. Нахождение вертикальной и горизонтальной угловой разъюстировки идет в соответствие с системой уравнений (43):

$$\begin{cases} A_v = \arctan\left(\frac{\Delta_x}{L_e}\right); \\ A_H = \arctan\left(\frac{\Delta_y}{L_e}\right), \end{cases} \quad (43)$$

где A_V , A_H – вертикальная угловая и горизонтальная угловая разъюстировки соответственно;

L_e – расстояние от излучателя до полупрозрачного экрана.

На основе полученных разъюстировки (A_V , A_H) рассчитываются корректировочные координаты оптического коммутатора.

Для дальнейших расчетов вводятся несколько условных точек, чьи координаты характеризуют положение определенных элементов оптической установки в пространстве:

- точка $M (x_m, y_m, z_m)$ – источник излучения;
- точка $P (x_p, y_p, z_p)$ – призма;
- точка $T (x_t, y_t, z_t)$ – целевая точка.

В соответствие с разработанной концепцией коммутатора, данной в первой главе, а также приведенными выше условными обозначениями, задачей оптического коммутатора является позиционирование призмы со следующими условиями:

- призма должна позиционироваться в такую точку пространства P , чтобы оптическая ось излучателя проходила через неё и являлась прямой MP ;
- оптическая ось излучателя MP должна быть перпендикулярна входной грани призмы для исключения преломления излучения в ней;
- оптическая ось отраженного призмой излучения PT должна проходить через целевую точку T .

Положения призмы коммутатора при эталонной и разъюстированной оси, с указанием разъюстировок и точек расположения некоторых оптических элементов системы, схематично изображены на рисунке 37.

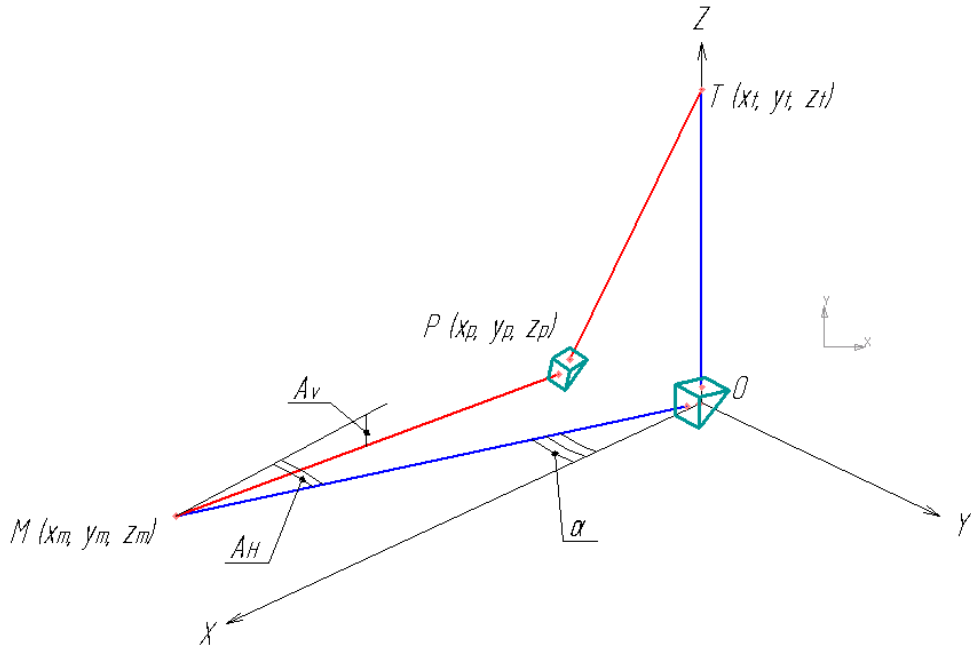


Рисунок 37 – Положения призмы коммутатора:

синяя линия – эталонная ось; красная линия – разъюстированная ось;

$M (x_m, y_m, z_m)$ – положение источника; $P (x_p, y_p, z_p)$ – положение призмы;

$T (x_t, y_t, z_t)$ – положение целевой точки; α – угол поворота призмы;

A_v – вертикальная разъюстировка; A_h – горизонтальная разъюстировка

Примем эталонное положение призмы за начало координат. Зададим ось излучения MP как прямую пролегающую в пространстве, описанную в параметрическом виде [45] системой уравнений (44):

$$\begin{cases} x = x_m + t; \\ y = y_m - tg(\alpha - A_h) \cdot t; \\ z = z_m + tg(A_v) \cdot t, \end{cases} \quad (44)$$

где x, y, z – координаты точки прямой PM в декартовых координатах;

t – параметр, имеющий действительное значение.

Целевую точку T зададим, как расположенную на оси Z , т.е. находящуюся на эталонной отраженной оптической оси.

Зададим плоскость I , перпендикулярную оси излучения MP и проходящую через целевую точку T [45] в виде уравнения (45):

$$1 \cdot (x - x_t) - tg(\alpha - A_h) \cdot (y - y_t) + tg(A_v) \cdot (z - z_t) = 0, \quad (45)$$

где x, y, z – координаты точки плоскости I в декартовых координатах.

Поскольку точка T лежит на оси Z, её координаты x_t и y_t равны нулю. Координату z_t обозначим как L_{PT} – расстояние от призмы целевой точки. Таким образом, уравнение плоскости (45) преобразуется к виду (46):

$$x - \operatorname{tg}(\alpha - A_H) \cdot y + \operatorname{tg}(A_V) \cdot z - \operatorname{tg}(A_V) \cdot L_{PT} = 0, \quad (46)$$

где L_{PT} – расстояние от призмы до целевой точки.

Точку пересечения оси излучения МР с плоскостью I, получим посредством подстановки в (46) значений x, y, z из (44). Полученное выражение будет иметь вид (47):

$$\begin{aligned} x_m + t - \operatorname{tg}(\alpha - A_H) \cdot (y_m - \operatorname{tg}(\alpha - A_H) \cdot t) + \\ + \operatorname{tg}(A_V) \cdot (z_m + \operatorname{tg}(A_V) \cdot t) - \operatorname{tg}(A_V) \cdot L_{PT} = 0. \end{aligned} \quad (47)$$

Параметр t , характерный для точки пересечения, определяется уравнением (48), полученным при преобразовании (47):

$$t = \frac{-x_m + \operatorname{tg}(\alpha - A_H) \cdot y_m - \operatorname{tg}(A_V) \cdot z_m + \operatorname{tg}(A_V) \cdot L_{PT}}{1 + \operatorname{tg}(\alpha - A_H)^2 + \operatorname{tg}^2(A_V)}. \quad (48)$$

Параметр t , найденный по выражению (48) при определенных отклонениях A_H и A_V , будет определять точку $P(x_p, y_p, z_p)$ положения призмы в 3-мерном пространстве (координаты переносных степеней свободы манипулятора оптического коммутатора) при подстановке в систему (44).

Ориентирующие степени подвижности оптического коммутатора позволяют установить призму в такое положение, чтобы ось излучения была перпендикулярна входной плоскости призмы, т.е. прямая МР перпендикулярна плоскости I. Кроме того должно выполняться условия пролегания оси отраженного излучения через целевую точку T. Заданная позиция призмы достигается коммутатором в два этапа:

- поворот призмы вокруг некоторого вектора $\overline{PR}$ на такой угол β , чтобы нормаль выходной грани прошла через точку T, т.е. нормаль должна совпадать с прямой РТ;

- поворот призмы вокруг прямой РТ на такой угол τ , чтобы входная грань стала перпендикулярна оси излучения (прямой РМ).

Для дальнейшего описания позиционирования призмы вводится схема, изображающая углы поворота и их вектора, а также промежуточные положения призмы. Данная схема, являющаяся, по сути, схемой последовательных перемещений призмы коммутатора по ориентирующим степеням, приведена на рисунке 38.

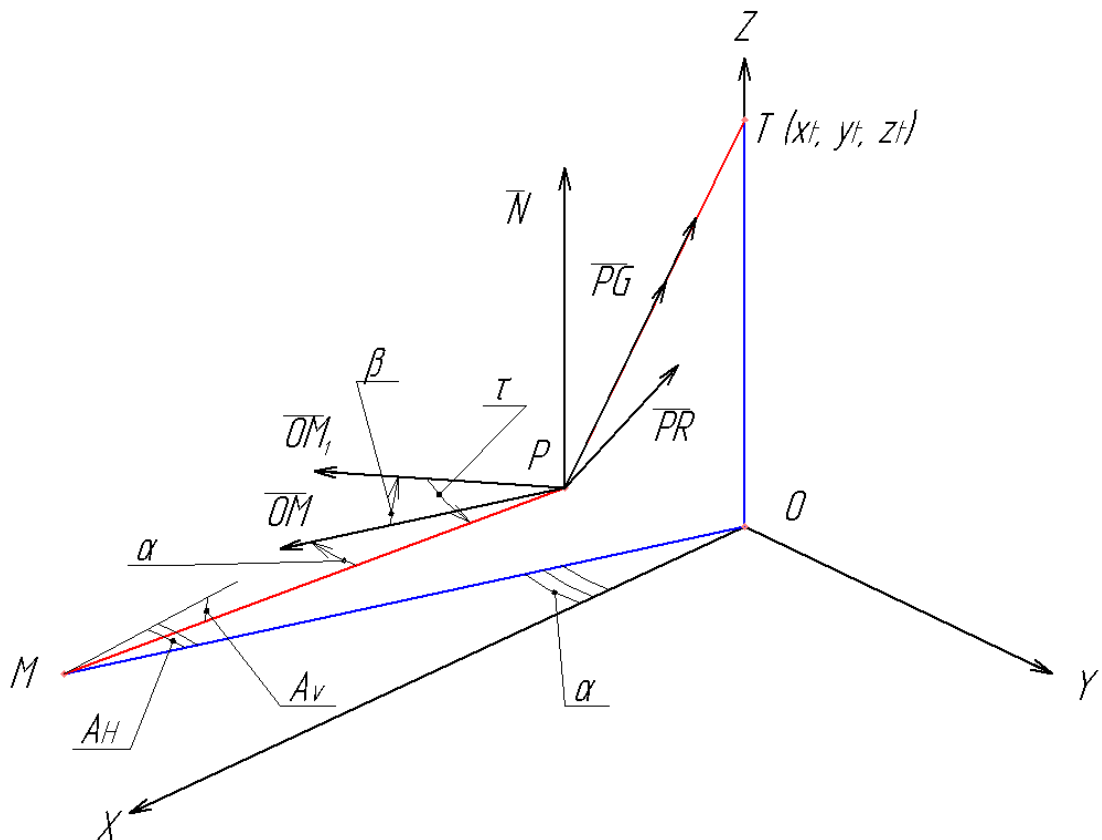


Рисунок 38 – Схема перемещения призмы коммутатора по ориентирующим степеням подвижности

В дальнейшем описание перемещений призмы будет даваться пошагово, на примере излучателя, расположенного на некотором расстоянии L_{mp} от оптического коммутатора, причем необходимый угол поворота призмы для опроса этого излучателя равен α . На рисунке 38 данный излучатель условно показан точкой М, а синими линиями показан ход его эталонного излучения.

Поскольку все излучатели располагаются в одной плоскости (в соответствии с концепцией коммутатора и рисунком 10), координаты точки М (x_m, y_m, z_m) определяются по следующей системе (49):

$$\begin{cases} x_m = L_{mp} \cdot \cos \alpha; \\ y_m = L_{mp} \cdot \sin \alpha; \\ z_m = 0, \end{cases} \quad (49)$$

где L_{mp} – расстояний от излучателя до оптического коммутатора;

α – угол поворота призмы при опросе данного излучателя.

При возникновении вертикальной разъюстировки A_v и горизонтальной A_h , ось излучения изменит направление и будет соответствовать прямой МР, показанной на рисунке 38 красной линией.

После позиционирования призмы переносными степенями свободы из начального положения (начало координат) в точку Р (x_p, y_p, z_p), нормаль входной грани призмы будет задаваться вектором $\overline{OM}$, очевидно параллельным прямой ОМ и обладающего координатами ($L_{mp} \cos \alpha; L_{mp} \sin \alpha; 0$). Нормаль выходной грани призмы будет задаваться вектором $\overline{N}$, очевидно параллельным оси Z.

Далее необходимо совместить нормаль выходной грани с прямой РТ, чтобы отраженное призмой излучение попадало в целевую точку Т. Это достигается разворотом платформы с призмой на угол β вокруг вектора $\overline{PR}$, причем вектор должен быть перпендикулярен прямой РТ и вектору $\overline{N}$. Для этого введем вектор $\overline{PT}$, параллельный прямой РТ с координатами, определяемыми вычитанием координат точки Р из координат точки Т. В результате вектор $\overline{PT}$ имеет следующие координаты (50):

$$\overline{PT} = \begin{pmatrix} 0 - x_p \\ 0 - y_p \\ L_{PT} - z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_p \\ -y_p \\ L_{PT} - z_p \end{pmatrix}. \quad (50)$$

Вектор $\overline{PR}$, вокруг которого осуществляется разворотом, является векторным произведением [45] вектора $\overline{N}$ и вектора $\overline{PT}$, и имеет следующие координаты (51):

$$\overline{PR} = \overline{N} \times \overline{PT} = \begin{pmatrix} 0 \cdot (L_{PT} - z_P) - 1 \cdot (-y_P) \\ 1 \cdot (-x_P) - 0 \cdot (L_{PT} - z_P) \\ 0 \cdot (-y_P) - 0 \cdot (-x_P) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_P \\ -x_P \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (51)$$

Угол разворота β является углом между вектором $\overline{PT}$ и вектором $\overline{N}$. Угол между векторами определяется [45] по формуле (52):

$$\beta = \arccos \left(\frac{\overline{N} \cdot \overline{PT}}{|\overline{N}| \cdot |\overline{PT}|} \right) = \arccos \left(\frac{z_{PT}}{\sqrt{x_{PT}^2 + y_{PT}^2 + z_{PT}^2}} \right). \quad (52)$$

Полученные выше: угол поворота β , координаты вектор $\overline{PR}$ (x_{pr} ; y_{pr} ; z_{pr}) и координаты точки Р (x_p , y_p , z_p), используются в системе (19) для расчета длин штанг гексапода (обобщенные координаты q_1 , q_2 , q_3 , q_4 , q_5 , q_6).

После разворота призмы на угол β вокруг вектора $\overline{PR}$, нормаль входной грани призмы будет соответствовать вектору $\overline{OM}_1$. Координаты вектора $\overline{OM}_1$ (x_{om1} ; y_{om1} ; z_{om1}), наряду с координатами верхних шарниров, определяются на основе матрицы поворота (16) для вектора $\overline{OM}$ и выражены в виде произведения матрицы поворота на координаты вектора $\overline{OM}$ (53):

$$\begin{pmatrix} x_{om1} \\ y_{om1} \\ z_{om1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot x_{pr}^2 & (1 - \cos \beta) \cdot x_{pr} \cdot y_{pr} - \sin \beta \cdot z_{pr} & (1 - \cos \beta) \cdot x_{pr} \cdot z_{pr} + \sin \beta \cdot y_{pr} \\ (1 - \cos \beta) \cdot y_{pr} \cdot x_{pr} + \sin \beta \cdot z_{pr} & \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot y_{pr}^2 & (1 - \cos \beta) \cdot y_{pr} \cdot z_{pr} - \sin \beta \cdot x_{pr} \\ (1 - \cos \beta) \cdot z_{pr} \cdot x_{pr} - \sin \beta \cdot y_{pr} & (1 - \cos \beta) \cdot z_{pr} \cdot y_{pr} + \sin \beta \cdot x_{pr} & \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot z_{pr}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_{om} \\ y_{om} \\ z_{om} \end{pmatrix}. \quad (53)$$

Полученное направление нормали $\overline{OM}_1$ входной грани заведомо не совпадает с направлением прямой РМ. Однако, необходимо их совпадение для того, чтобы излучение падало перпендикулярно на входную грань призмы. Поставленная задача достигается собственным вращением призмы (вкруг прямой

РТ) на такой угол τ , чтобы входная грань стала перпендикулярна оси излучения (прямой РМ).

Основой для описанного выше действия является нахождение угла τ между вектором $\overline{OM_1}$ и вектором $\overline{PM}$. Здесь используется закон для нахождения угла между векторами, аналогичный примененному в выражении (52). Выражение для нахождения угла τ имеет вид (54):

$$\tau = \arccos \left(\frac{\overline{OM_1} \cdot \overline{PM}}{|\overline{OM_1}| \cdot |\overline{PM}|} \right) = \arccos \left(\frac{x_{om1} \cdot x_{pm} + y_{om1} \cdot y_{pm} + z_{om1} \cdot z_{pm}}{\sqrt{x_{om1}^2 + y_{om1}^2 + z_{om1}^2} \sqrt{x_{pm}^2 + y_{pm}^2 + z_{pm}^2}} \right). \quad (54)$$

Поворот на угол τ осуществляется вокруг вектора $\overline{PG}$, получаемого в результате векторного произведения вектора $\overline{OM_1}$ и вектора $\overline{PM}$. Вектор $\overline{PM}$ параллелен прямой РМ и имеет координаты, определяемые вычитанием координат точки Р из координат точки М. В результате вектор $\overline{PM}$ имеет следующие координаты (55):

$$\overline{PM} = \begin{pmatrix} x_m - x_p \\ y_m - y_p \\ z_m - z_p \end{pmatrix}. \quad (55)$$

Вектор $\overline{PG}$ имеет координаты, получаемые в результате векторного произведения вектора $\overline{OM_1}$ и вектора $\overline{PM}$ (56):

$$\overline{PG} = \overline{OM_1} \times \overline{PM} = \begin{pmatrix} y_{om1} \cdot (z_m - z_p) - z_{om1} \cdot (y_m - y_p) \\ z_{om1} \cdot (x_m - x_p) - x_{om1} \cdot (z_m - z_p) \\ x_{om1} \cdot (y_m - y_p) - y_{om1} \cdot (x_m - x_p) \end{pmatrix}. \quad (56)$$

На основе полученного угла τ и координат вектора $\overline{PG}$ (x_{pg} ; y_{pg} ; z_{pg}) осуществляется корректирующий поворот призмы по степени подвижности собственного вращения.

Конкретное направление вращения привода на угол τ выбирается на основе направления вектора $\overline{PG}$. Если вектор $\overline{PG}$ сонаправлен с вектором $\overline{PT}$, то вращение идет против часовой стрелки (если смотреть с положительного направления вектора $\overline{PT}$), в противном случае – по часовой стрелке. Направление

векторов определяется при проверке значения косинуса угла ρ между векторами $\overline{PG}$ и $\overline{PT}$, определяемого по выражению (57):

$$\cos \rho = \frac{\overline{PG} \cdot \overline{PT}}{|\overline{PG}| \cdot |\overline{PT}|} = \frac{x_{pg} \cdot x_{pt} + y_{pg} \cdot y_{pt} + z_{pg} \cdot z_{pt}}{\sqrt{x_{pg}^2 + y_{pg}^2 + z_{pg}^2} \sqrt{x_{pt}^2 + y_{pt}^2 + z_{pt}^2}}. \quad (57)$$

Векторы сонаправлены, если косинус равен единице. В противном случае косинус равен -1. Таким образом, результирующий угол поворота привода призмы γ можно описать следующим уравнением (58):

$$\gamma = \alpha - \tau \cdot \cos \rho. \quad (58)$$

Алгоритм автоюстировки, позволяющий рассчитать необходимые координаты юстирующих перемещений при возникающих разъюстировках излучателей, приведен на рисунке 39.

Подводя итог разработанному алгоритму, можно привести его краткое содержание: для излучателя, стоящего на расстоянии L_{mp} от оптического коммутатора при угле поворота призмы α , компенсация разъюстировок A_H и A_V будет включать в себя следующие действия:

1. Позиционирование штанг гексапода в соответствие с уравнениями, определяющими $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ в системе (19). При этом значение угла β определяется выражением (52), координаты x_{pr}, y_{pr}, z_{pr} – выражением (51), а координаты x_p, y_p, z_p – выражением (44) с параметром t определенным по уравнению (48).

2. Вращение призмы коммутатора в соответствие с уравнением, определяющим q_7 в системе (19), при этом значение угла γ определяется выражением (58). В свою очередь, для выражения (58), значение угла τ определяется выражением (54), а значение косинуса угла ρ – выражением (57).

Разработанный алгоритм позволит компенсировать угловые разъюстировки любого излучателя в системе с целью попадания его излучения в целевую точку.

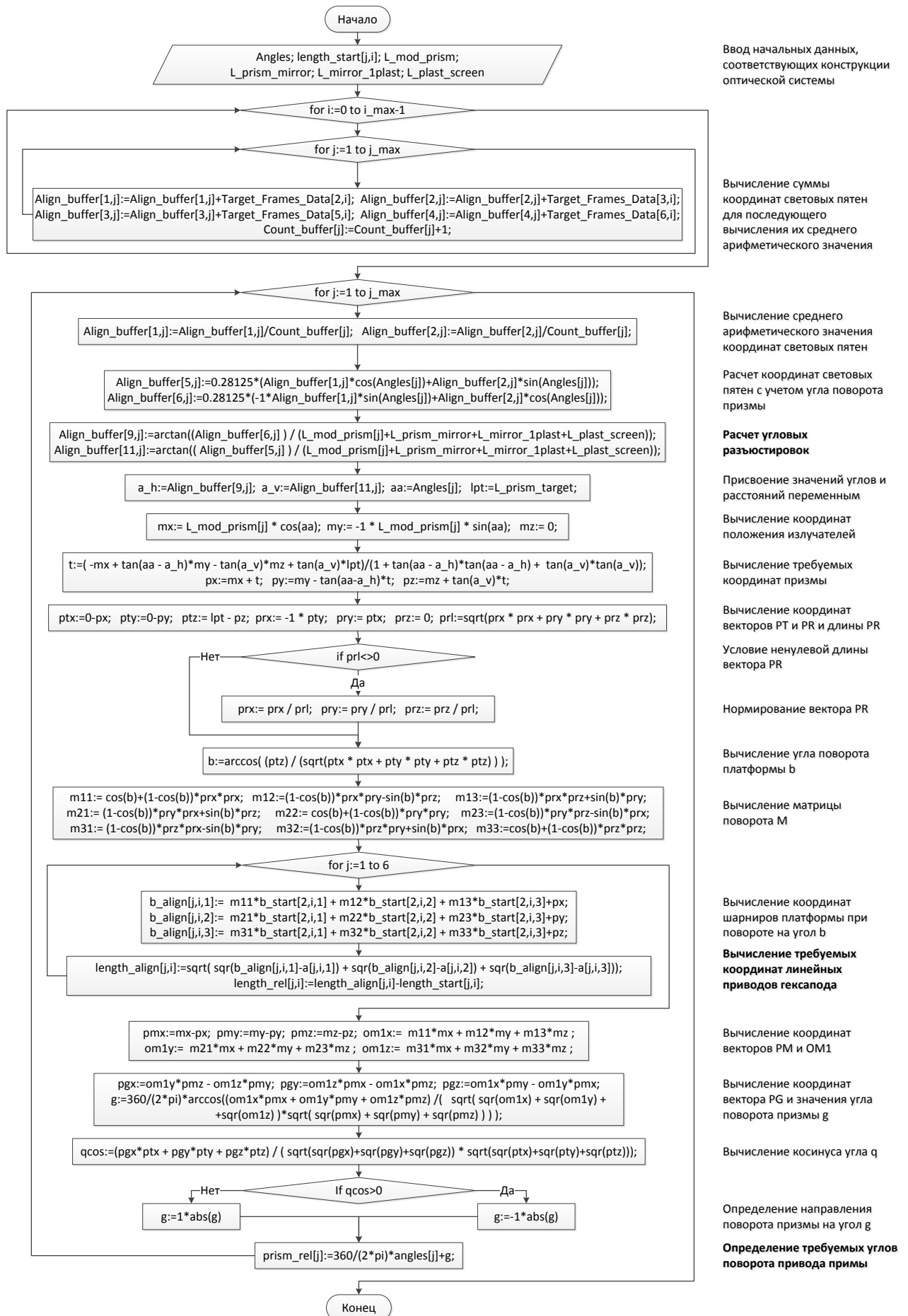
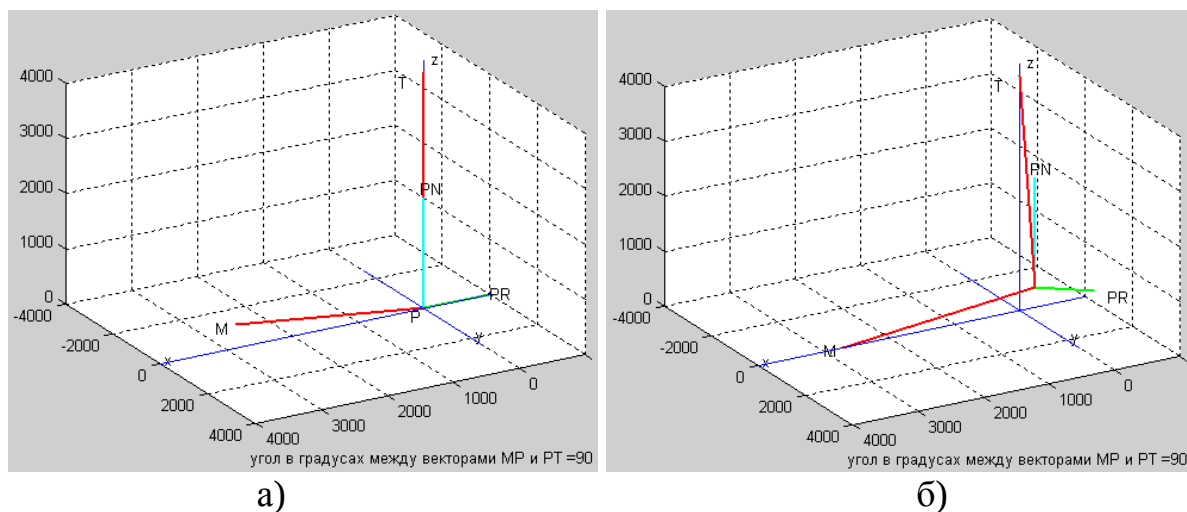


Рисунок 39 – Блок-схема алгоритма автоюстировки излучения

3.2.4. Моделирование алгоритма автоюстировки излучения

Задачей моделирования алгоритма автоюстировки излучения является проверка математических законов, разработанных и изложенных выше. Проверка сводится к вычислению угла между входящей в призму оптической осью и отраженной осью, координаты которых вычисляются на основе алгоритма автоюстировки. Угол между осями должен составлять 90° при том, что отраженная ось должна пролегать через целевую точку. Кроме того, положение оптических осей, векторов поворота и условных точек оценивается визуально. Модель представляет собой программу, написанную на языке Matlab.

В ходе выполнения программы, для установленных значений угла поворота призмы под конкретный излучатель (α), вертикальной (A_V) и горизонтальной (A_H) разъюстировок, рассчитывался угол между оптическими осями, и визуализировалось их положение в декартовой системе координат. Некоторые результаты моделирования при заданных разъюстировках и положениях излучателя приведены на рисунке 40.



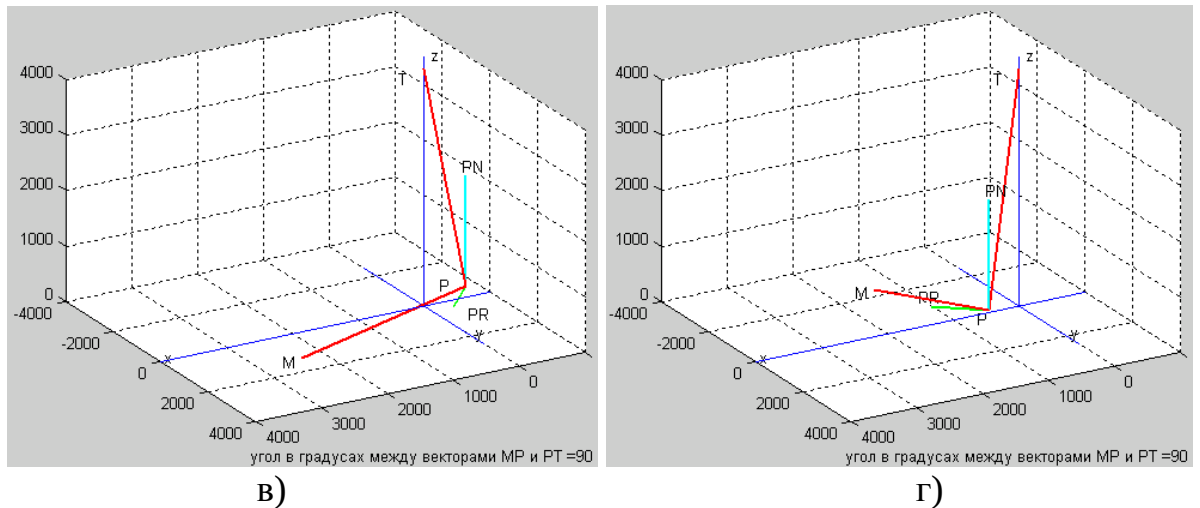


Рисунок 40 – Результаты моделирования алгоритма автоюстировки при различных углах поворота призмы и разъюстировках:

а – $\alpha=25^\circ$, $A_H=0^\circ$, $A_V=0^\circ$; б – $\alpha=0^\circ$, $A_H=5^\circ$, $A_V=-5^\circ$;

в – $\alpha=-30^\circ$, $A_H=-10^\circ$, $A_V=-6^\circ$; г – $\alpha=60^\circ$, $A_H=-15^\circ$, $A_V=-14^\circ$

Полученные результаты моделирования показали, что алгоритм автоюстировки верен и позволяет добиться угла между входящей и отраженной осями 90° , при этом отраженная ось пролегает через целевую точку. Кроме того, в процессе графического моделирования не было выявлено аномальных положений оптических осей, векторов поворота и характерных точек.

При построении массива точек Р (положение призмы) для различных сочетаний разъюстировок в интервале от -45° до 45° была получена поверхность, приведенная на рисунке 41.

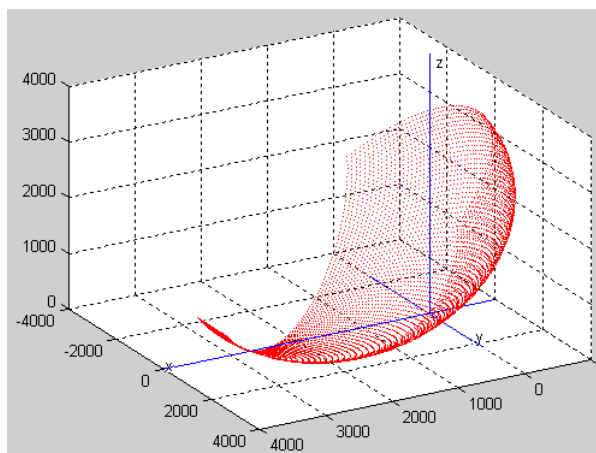


Рисунок 41 – Фрагмент поверхности, образованный точками положения призмы при разъюстировках в интервале от -45° до 45°

Полученная поверхность образована множеством точек положений призмы при различных величинах разъюстировки излучателей и представляет собой фрагмент сферы с большим кругом, образованным целевой точкой, точкой эталонного положения призмы и точкой положения излучателя.

Исходный текст программы AutoAlign.m приведен в приложении Б к данной диссертационной работе.

3.2.5. Оценка точности системы обратной связи

Оценка точности предложенной системы обратной связи на базе скоростной видеокамеры проводилась системно, для всех её элементов одновременно. Целью являлось получение диаграмм абсолютной погрешности определения углового перемещения оптической оси для сенсора скоростной видеокамеры при различных температурных условиях за некоторый промежуток времени.

Данная цель достигалась расположением излучателя на оси электропривода, управляемого по положению. Электропривод, размещенный на юстировочном столике, мог позиционировать излучатель таким образом, чтобы перемещения его оптической оси фиксировались скоростной камерой на диффузном полупрозрачном экране. Взаиморасположение описанных выше элементов упрощенно приведено на рисунке 42.

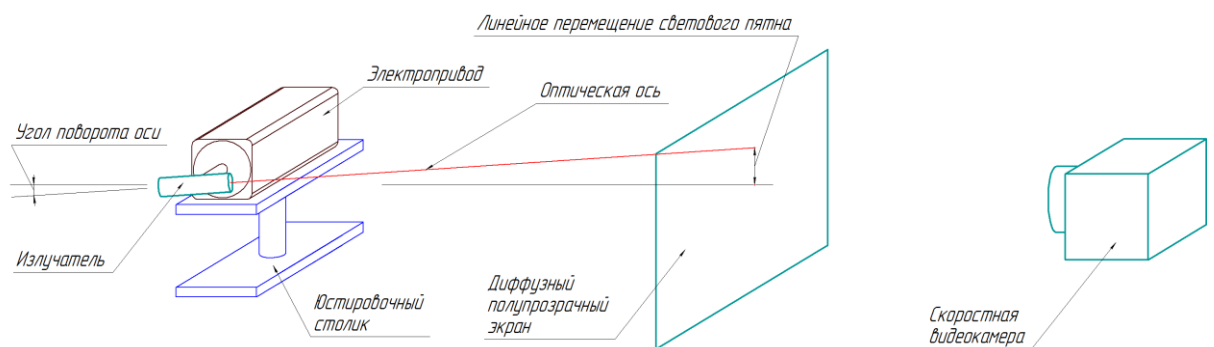


Рисунок 42 – Взаиморасположение элементов при исследовании точности системы обратной связи

В ходе исследования с помощью юстировочного столика и электропривода достигалось расположение светового пятна в 25 различных положениях,

равномерно распределенных в области видимости камеры. В каждом из положений электроприводу давалась команда на угловое перемещение $0,03^\circ$.

Определяемое системой обратной связи угловое смещение a_k оптической оси определяется формулой (59):

$$a_k = \arctan\left(\frac{k \cdot \sqrt{\Delta l_x^2 + \Delta l_y^2}}{L}\right), \quad (59)$$

где k – коэффициент, характеризующий линейное расстояние на экране, приходящееся на каждый пиксел видеокамеры, равный $0,28125$ мм/пикс;

Δl_x – перемещение светового пятна по оси X , фиксируемое камерой, пикс;

Δl_y – перемещение светового пятна по оси Y , фиксируемое камерой, пикс;

L – расстояние от излучателя до поверхности экрана, мм.

Перемещения световых пятен Δl_x и Δl_y получались, как средние арифметические значения разниц положений светового пятна по соответствующим осям до и после перемещения излучателя электроприводом на $0,03^\circ$ на основании 50 записанных видеокадров.

Абсолютная погрешность Δa_k определения углового смещения оптической оси находилась по формуле (60):

$$\Delta a_k = a_k - a_3, \quad (60)$$

где a_3 – задаваемое электроприводом угловое смещение оси;

Данное исследование включало в себя три эксперимента, проводившихся с промежутком в 1 час в условиях температуры окружающей среды с 24°C , 27°C и 29°C соответственно. В ходе трех экспериментов были получены диаграммы абсолютной погрешности для области сенсора видеокамеры, используемой при захвате видеоизображения.

На рисунке 43 приведены полученные диаграммы абсолютной погрешности для области сенсора видеокамеры 320×320 пикселей.

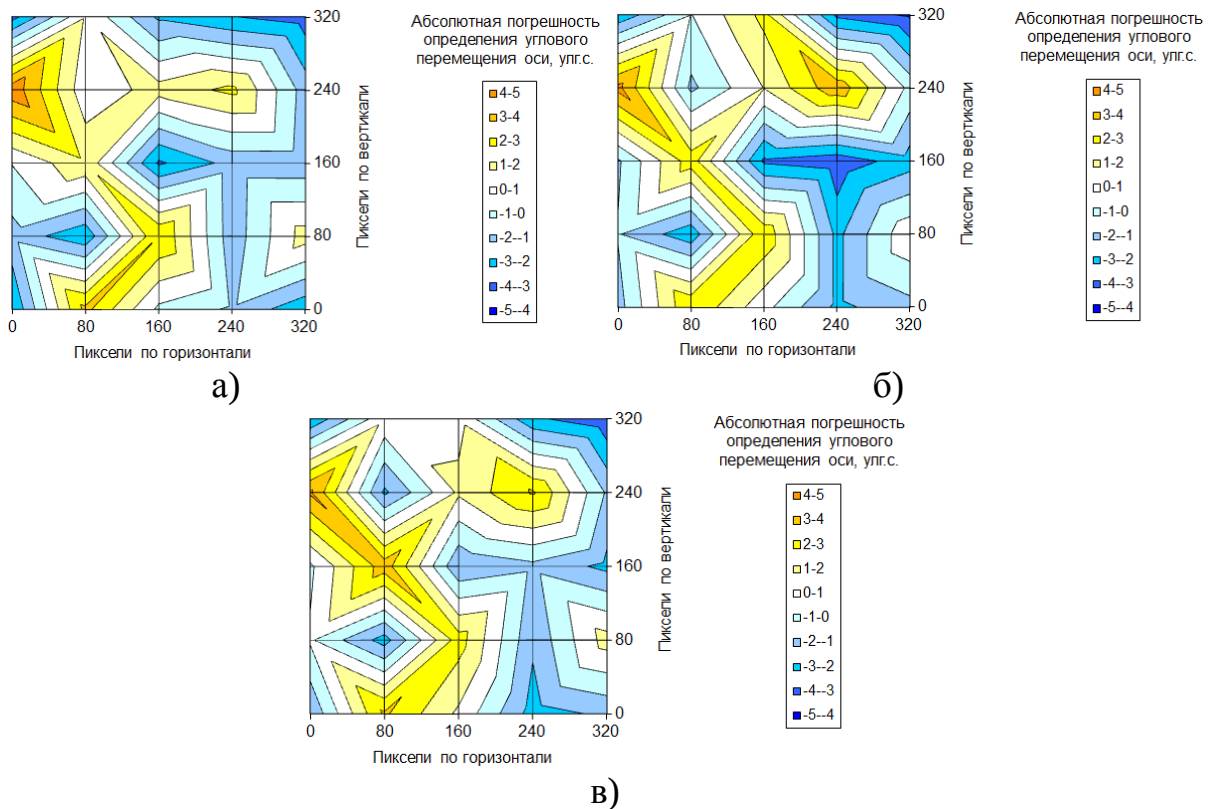


Рисунок 43 – Абсолютные погрешности определения углового перемещения оптической оси при различных температурах окружающей среды: а – 24°C; б – 27°C; в – 29°C

Диаграммы, приведенные на рисунке 43, иллюстрируют неравномерность точности определения угловых перемещений оптической оси в области видеокadra, используемой в системе обратной связи. Характерный внешний вид диаграммы и её изменение при росте температуры окружающей среды и с течением времени свидетельствует о геометрических искажениях оптических элементов системы вследствие теплового расширения, в первую очередь – сенсора видеокамеры. Поскольку данный видеосенсор относится к классу скоростных, он обладает сравнительно высоким тепловыделением. Поскольку данная видеокамера не оснащена устройством охлаждения, отвод тепла от сенсора происходит за счет теплопроводности конструктивного соединения «подложка сенсора – печатная плата», что не является средством равномерного и эффективного теплоотвода.

Кроме сенсора видеокамеры погрешности также вносятся объективом (несферичность линз) и оптическими элементами системы главной обратной связи (погрешности изготовления поворотных зеркал, пластины и призмы).

В процессе исследования максимальное значение погрешности составило величину 4,68 угл.с. Приемлемая погрешность оптического коммутатора, обоснованная в первой главе и находящаяся на уровне 1 угл.мин, более чем на порядок превосходит погрешности системы главной обратной связи, поэтому применение предложенной главной обратной связи на основе скоростной камеры Fastvideo-500 является адекватным решением в данной работе.

3.3. Система приводов оптического коммутатора и программное обеспечение контроллера

Поскольку манипулятор оптического коммутатора оснащен шестью приводами штанг гексапода и приводом поворота призмы, система приводов является 7-осевой. Структурно эта система представляет собой набор модулей семейства приводов Siemens Sinamics S120. В систему входят следующие элементы: модули двигателей (однодвигательный и двухдвигательные); модули питания; модуль торможения; периферия (блоки служебного питания, электрокоммутационная техника и т.д.).

Обмен информацией между приводными компонентами в системе Sinamics S120 осуществляется на базе интерфейса Drive-Cliq, являющегося физической основой для эмуляции полевой шины Profibus. Модуль питания осуществляет снабжение модулей двигателей энергией через контур постоянного тока, а так же рекуперацию (возврат) энергии в сеть. Модуль двигателя осуществляет снабжение энергией двигатель привода. Модуль двигателя – управляемый транзисторный инвертор, преобразующий постоянный ток промежуточного контура в переменный. Модуль торможения предусмотрен на случай чрезвычайно активных тормозных режимов двигателя и ситуаций, когда рекуперация в сеть невозможна.

Для точного и быстрого проектирования элементов системы приводов применена система проектирования Sizer разработки фирмы Siemens [55]. Она поддерживает необходимые при техническом расчете задач привода аппаратные и

программные компоненты Siemens и включает в себя проектирование комплексной приводной системы.

Описание проектирования системы приводов, в дальнейшем, будет соответствовать порядку проектирования в системе Sizer. На первом этапе выбираются параметры системы питания и требуемая структура. Затем для каждой оси выполняется выбор двигателя, модуля двигателя и дополнительных компонентов (датчики, силовые и сигнальные кабели и т.д.). После завершения формирования списка осей выбираются компоненты питания и промежуточного контура (модуль питания, модуль торможения, тормозные резисторы, дроссели и фильтры питания, коммутационная аппаратура и т.д.). Затем происходит выбор элементов системы управления приводами (контроллеры и расширения), расчет служебного питания (блоки питания 24 В), разработка топологии системы приводов, проверка производительности системы управления, расположение элементов и т.д. Итоговым действием является формирование списка технических данных по разработанной системе приводов.

Описанная выше последовательность может быть визуализирована в виде графического изображения алгоритма проектирования в программе Sizer, приведенного на рисунке 44.



Рисунок 44 – Последовательность проектирования в системе Sizer:

Properties – выбор параметров питания; Motor – выбор двигателя;

Motor module – выбор модуля двигателя;

Output components – выбор дополнительных компонентов;

Line module – выбор компонентов питания и промежуточного контура;

System components – выбор элементов системы управления

Структурная схема системы приводов с указанием линий питания и связи приведена на рисунке 45.

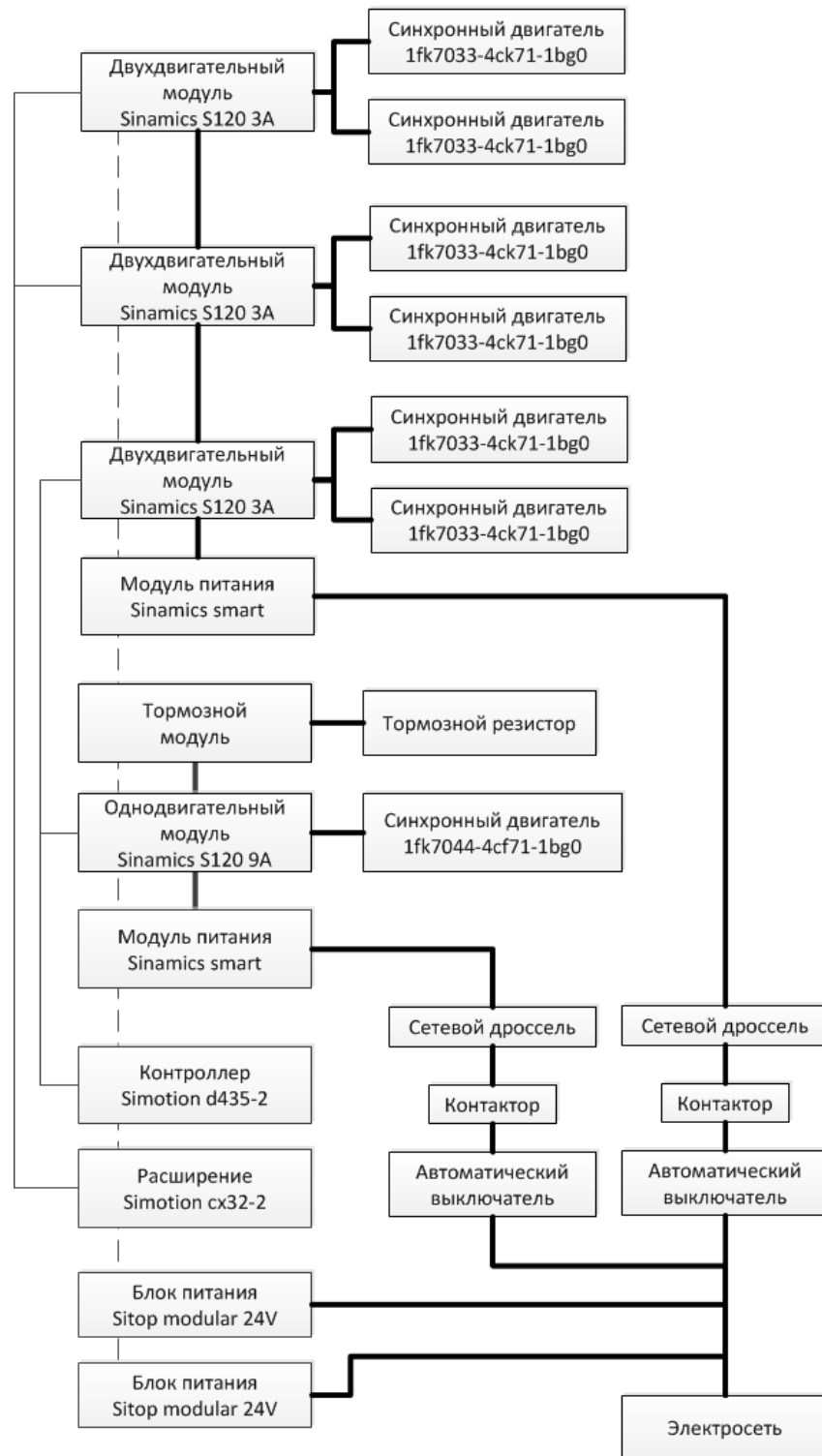


Рисунок 45 – Структурная схема системы приводов оптического коммутатора: Тонкая линия – интерфейс управления Drive-Cliq; Пунктирная линия – шина служебного питания; Утолщенная линия – силовое питание

Приведенные выше данные не включили в себя описание подбора и технические параметры элементов системы приводов, т.к. полные технические данные самостоятельно формируются системой Siemens Sizer и экспортируются из нее в виде списка комплектующих.

Программное обеспечение контроллера системы приводов коммутатора представляет собой разрабатываемые в среде Simotion Scout программы. Данные программы принято называть «программами пользователя» и, в дальнейшем, под программа пользователя будет пониматься ПО, специально разработанное для контроллера оптического коммутатора.

Разработка программ пользователя может идти на нескольких языках: ST (Structured Text), MCC (Motion Control Charts), LAD (LADder logic) и FBD (Function Block Diagrams). Программа пользователя взаимодействует с прочими элементами программной структуры (библиотеки, технологические пакеты) посредством включения в себя или вызова их подпрограмм и стандартных функций.

Последовательностью выполнения программ пользователя управляет система задач контроллера (Execution System). Система задач состоит из индивидуальных уровней (Execution Levels), которые определяют хронологическую последовательность выполнения программ.

В данной работе основная программа пользователя MCC_test_main.mcc начинает выполняться сразу после перехода контроллера в активный режим.

Поскольку язык MCC поддерживает объединение (вложение) нескольких последовательных операций в один модуль для наглядности, разработанная программа представляет собой многократно вложенные модули. На верхнем уровне программа представляет собой последовательность четырёх модулей, заключенных между командами начала и окончания программы.

Стартовый модуль Module Startup содержит в себе команды, обеспечивающие штатное ведение манипулятора в активный режим. В процессе его выполнения включаются все оси манипулятора, и проходит проверка положения приводов (т.н. Soft Limit – программное ограничение хода приводов).

Кроме того, программное ограничение хода приводов реализовано, как защитная функция в процессе выполнения программы. Особенностью механизмов с параллельной кинематикой является существование т.н. особых положений которые ограничивают их рабочие пространства и могут приводить к потере управляемости. Кроме того, неидеальность связей в МСПС (наличие сил и моментов сил трения в кинематических парах) приводит к тому, что вблизи особых положений может произойти заклинивание механизма. Программное ограничение хода приводов исключает возникновения особых положений механизма коммутатора, т.к. при нештатном выходе привода за установленные пределы происходит его принудительное торможение и последующее отключение.

Модуль вывода манипулятора в нулевое положение Module Home all axis содержит в себе команды для вывода всех семи осей манипулятора в нулевое положение на основе показаний абсолютных датчиков.

Основной модуль Module Main содержит в себе операторы и команды необходимые для реализации всех режимов работы, описанных в разделе программного обеспечения персонального компьютера: режим видеозаписи, рабочий режим, управление манипулятором по степеням подвижности и управление независимыми приводами.

Завершающий модуль Module Shutdown обеспечивает корректное отключение сетевого соединения контроллера и компьютера, выключение всех осей и перевод контроллера в пассивный режим.

Осями, управляемыми программой пользователя являются 7 приводов манипулятора оптического коммутатора. Управляемой периферией являются 3 излучателя, имитирующие источники оптического излучения в системе. Управление ими осуществляется посредством цифровых выходов контроллера (разъемы X122.9, X122.10, X122.12 соответственно). Доступ к цифровому выходу осуществляется посредством специального оператора в теле модуля Module Main.

Разработанная программа MCC_test_main.mcc пользователя контроллера Siemens Smotion D435-2 DP/PN приведена в приложении В.

3.4. Программная реализация алгоритмов управления оптическим коммутатором

Программное обеспечение, установленное на персональном компьютере, предназначено для управления контроллером системы приводов и скоростной камерой в системе главной обратной связи. Данное программное обеспечение представляет собой исполняемый файл Komm.exe, предоставляющий интерфейс и выполняющий все необходимые функции и предназначенный для работы под управлением ОС Windows XP или Windows 7.

Разработанная программа реализует:

- интерфейс оператора;
- отображение контролируемых параметров на экране монитора;
- прием/передачу данных контроллеру приводов по интерфейсу Ethernet;
- управление скоростной камерой Fastvideo-500 посредством эмуляции работы оператора в программе FastvideoLab.exe, поставляемой с камерой;
- расчеты разъюстировок излучателей системы на основе показаний главной обратной связи в соответствии с выражениями (40) – (43);
- расчеты необходимых юстировочных перемещений манипулятора оптического коммутатора в соответствии с выражениями (44) – (58);
- управление степенями подвижности манипулятора и отдельными приводами в ручном режиме посредством задания требуемых величин в цифровом виде или в виде перемещений движков в окне программы.

Пользовательский интерфейс программы выполнен в виде стандартного оконного приложения ОС Windows. При запуске программы Komm.exe отображается её главное окно, содержащее четыре вкладки, предназначенные для различных задач.

Главное окно имеет следующие вкладки:

- «Видеоанализ», открывающая окно с органами управления записью видеофайлов и видеоанализом;

- «Рабочий режим», открывающая окно для расчета разбюстировок и поправочных координат манипулятора, а также запуска опроса излучателей системы в рабочем режиме;

- «Управление степенями подвижности», открывающая окно с органами управления служебными перемещениями по отдельным степеням подвижности;

- «Управление независимыми приводами», открывающая окно с органами управления перемещениями независимых приводов манипулятора.

Внешний вид главного окна программы Komm.exe на вкладке «Видеоанализ» представлен на рисунке 46.

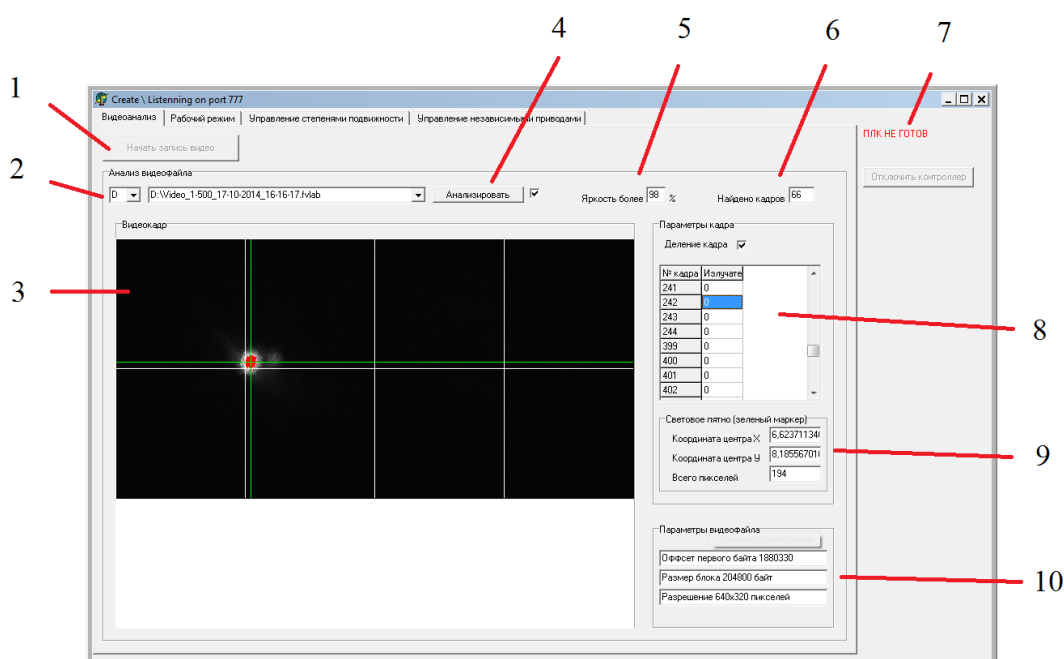


Рисунок 46 – Окно программы Komm.exe на вкладке «Видеоанализ»:

- 1 – кнопка «Начать запись видео»;
- 2 – Область задания пути файла;
- 3 – Область видеокadra;
- 4 – Кнопка «Анализировать»;
- 5 – Поле задания яркости;
- 6 – Поле количества найденных кадров;
- 7 – Индикатор готовности контроллера;
- 8 – Таблица целевых кадров;
- 9 – Область информации о пятне;
- 10 – Область информации о видеофайле

Вкладка «Видеоанализ» включает в себя кнопку «Начать запись видео», запускающую алгоритм, показанный на рисунке 47:

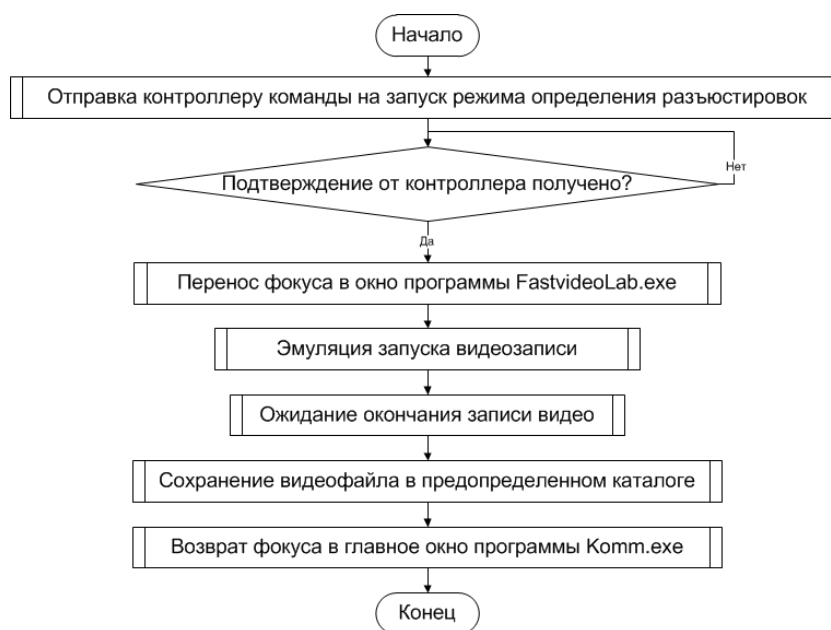


Рисунок 47 – Алгоритм работы кнопки «Начать видеозапись»

Отправка и получение данных от контроллера происходит посредством программного интерфейса – сокетов [11]. Отправка команды контроллеру производится в виде посылки кода команды «10». По получении данной команды контроллер производит подготовительные действия для режима и отправляет компьютеру код команды «13», означающий готовность. По получении данного подтверждения происходит запуск скоростной видеозаписи. Запуск видеозаписи, сохранение файла и переносы фокуса происходят посредством эмуляции нажатия последовательностей и комбинаций клавиш. Данный способ перехвата управления продиктован тем, что программа управления скоростной камерой FastvideoLab.exe является программным обеспечением с закрытым исходным кодом и организация полноценного перехвата управления является весьма сложной задачей.

После возврата фокуса, полученный видеофайл может быть проанализирован с целью поиска кадров, содержащих световые пятна. Для этого в области задания пути файла выбирается локальный диск и имя файла в соответствующих полях, нажимается кнопка «Анализировать».

Общий алгоритм кнопки «Анализировать» представлен на рисунке 48.

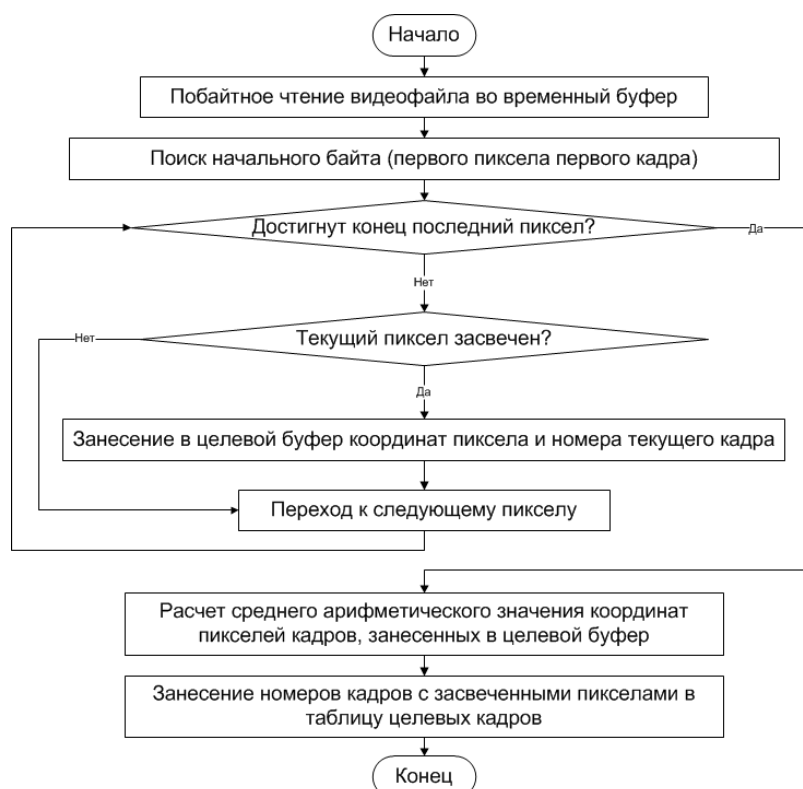


Рисунок 48 – Алгоритм работы кнопки «Анализировать»

Видеофайл представляет собой контейнер, содержащий, помимо служебной информации, последовательность байт, соответствующих пикселям кадров. Значение байта соответствует яркости пикселя. Если превышено пороговое значение, указанное в поле задания яркости, то пиксель является засвеченным. Отношение пикселя к группе засвеченных определяется по закону (39). Для засвеченных пикселей запоминаются их координаты и номера их кадров. После проверки всего файла рассчитываются средние арифметические значения центров пикселей по системе (40) и отклонения весовых центров пятен по системе (41).

При выборе кадра (выделении мышью в таблице) происходит его отображение в области видеокадра с заливкой засвеченных пикселей красным цветом и указанием центра пятна зеленым маркером (перекрестьем).

Внешний вид главного окна программы Komt.exe на вкладке «Рабочий режим» представлен на рисунке 49.

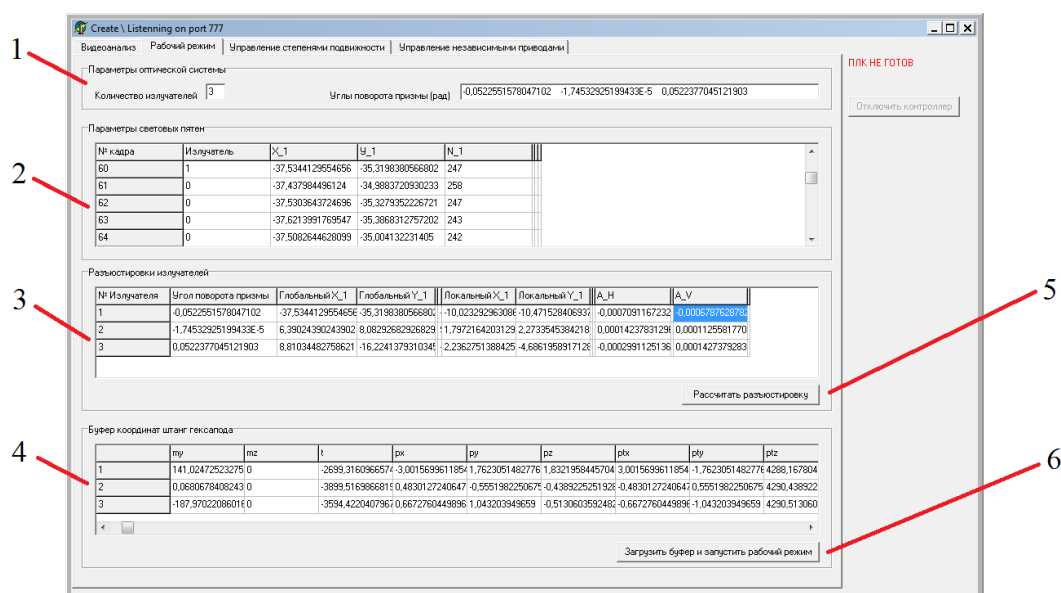


Рисунок 49 – Внешний вид окна программы Komm.exe на вкладке «Рабочий режим»: 1 – Область информации об оптической системе; 2 – Таблица кадров с засвеченными пикселями; 3 – Таблица разъюстировок; 4 – Таблица поправочных координат; 5 – Кнопка «Рассчитать разъюстировки»; 6 – Кнопка «Загрузить буфер и запустить рабочий режим»

На вкладке «Рабочий режим» в области информации об оптической системе выводится количество излучателей и углы поворота призмы для их опроса. Эти данные являются справочными и устанавливаются для каждой системы на этапе встраивания коммутатора. В данном случае имеются три излучателя.

В таблице кадров с засвеченными пикселями отображаются координаты световых пятен и количество пикселей их образовавшее, а также соответствующий номер излучателя для выбранных кадров.

На основе выбранных кадров со световыми пятнами можно рассчитать разъюстировки соответствующего излучателя с помощью кнопки «Рассчитать разъюстировки», общий алгоритм которой представлен на рисунке 50.

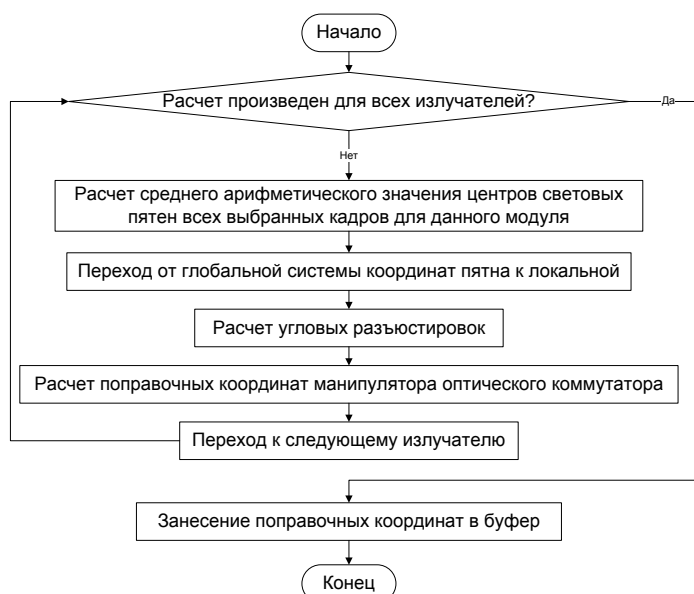


Рисунок 50 – Алгоритм работы кнопки «Рассчитать разъюстировки»

Расчет разъюстировок для каждого излучателя идет на основе алгоритма автоюстировки. Все действия совершаются для каждого излучателя, а полученные поправочные координаты заносятся в буфер.

Нажатие кнопки «Загрузить буфер и запустить рабочий режим» вызывает отправку контроллеру кода команды «20», означающего подготовку к рабочему режиму, прием буфера поправочных координат и последующий запуск рабочего режима (опроса излучателей в режиме юстировки).

Вкладка «Управление степенями подвижности» предоставляет оператору возможность ручного управления манипулятором по степеням свободы: линейные перемещения по осям X, Y, Z и поворот платформы на угол β вокруг вектора, лежащего в плоскости X0Y и образующего с осью X угол, задаваемый оператором.

Внешний вид главного окна программы Komm.exe на вкладке «Управление степенями подвижности» представлен на рисунке 51.

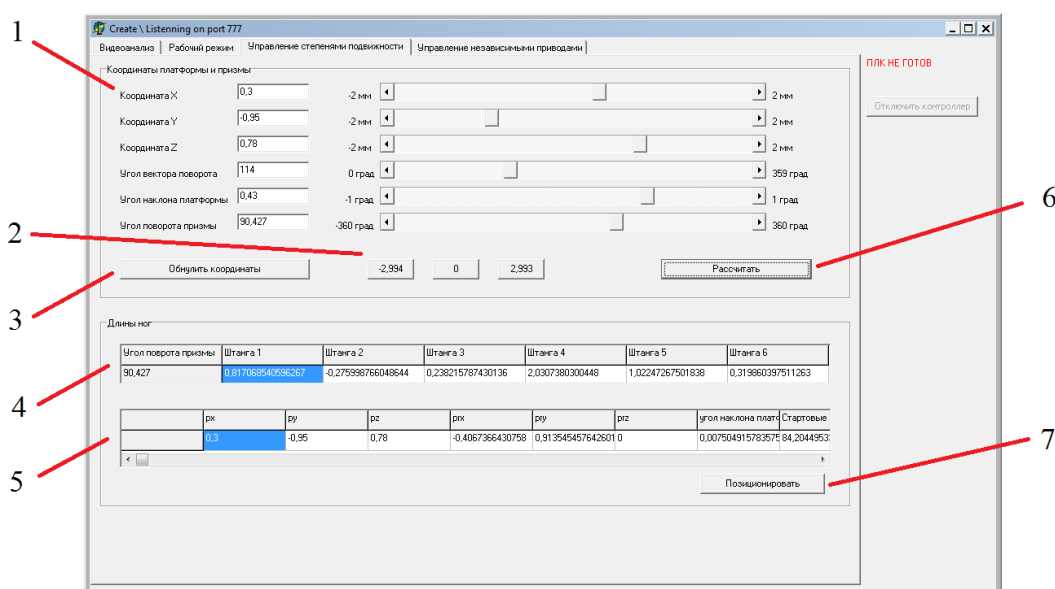


Рисунок 51 – Внешний вид окна программы Komm.exe на вкладке «Управление степенью подвижности»:

- 1 – Область задания требуемых координат; 2 – Кнопки установки призмы;
 3 – Кнопка «Обнулить координаты»; 4 – Таблица длин штанг;
 5 – Таблица расчетов; 6 – Кнопка «Рассчитать»; 7 – Кнопка «Позиционировать»

Значения перемещений задаются с помощью движков в области задания требуемых координат и контролируются по цифровым значениям в соответствующих полях. Предусмотрена возможность быстрого обнуления всех значений. Также предусмотрена быстрая установка углов поворота призмы на значения, соответствующие излучателям данной системы.

По нажатию кнопки «Рассчитать» происходит расчет необходимых перемещений приводов на основе системы уравнений (19), т.к. все необходимые для расчета координаты задаются пользователем. Промежуточные значения вычислений заносятся в таблицу расчетов, а рассчитанные длины штанг в таблицу длин штанг.

По нажатию кнопки «Позиционировать» происходит отправка контроллеру кода команды «30», означающего подготовку к позиционированию, прием необходимых координат и последующее перемещение.

Помимо управления манипулятором коммутатора по степеням подвижности, программа Komm.exe предоставляет возможность управления независимыми приводами. Интерфейс для такого управления предоставлен на вкладке «Управление независимыми приводами» и показан на рисунке 52.

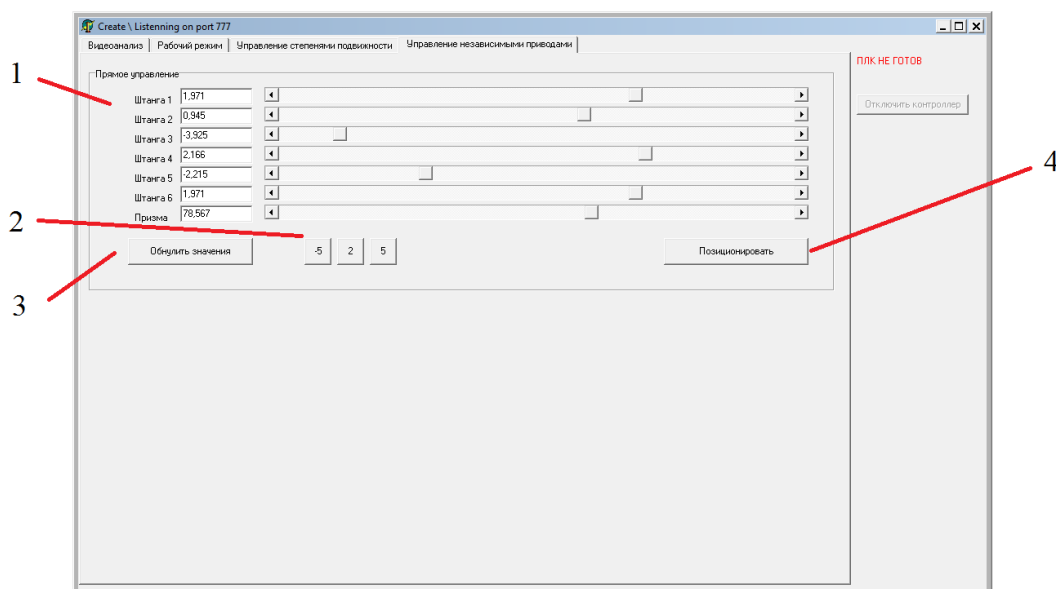


Рисунок 52 – Внешний вид окна программы Komm.exe на вкладке «Управление независимыми приводами»:

- 1 – Область задания требуемых перемещений приводов;
- 2 – Кнопки быстрой установки штанг;
- 3 – Кнопка «Обнулить значения»; 4 – Кнопка «Позиционировать»

Данная вкладка во многом повторяет интерфейс вкладки «Управление степенями подвижности». Здесь в области задания требуемых перемещений приводов движками задаются необходимые значения. Кнопкой «Обнулить значения» можно быстро приравнять к нулю все координаты, а кнопками быстрой установки штанг можно одновременно присвоить всем штангам длины, указанные на кнопках. По нажатию кнопки «Позиционировать» происходит отправка контроллеру кода команды «40», означающего подготовку к перемещению независимых приводов, прием необходимых координат и последующее перемещение.

Во время работы программы Komm.exe статус подключения к контроллеру отображается в верхнем правом углу окна. Подключение активно при зеленой надписи «ПЛК готов». При красной надписи «ПЛК не готов» подключение отсутствует. Когда контроллер системы приводов включается и переходит в активный режим (режим RUN), программа Komm.exe принимает его сигнал готовности и отображает надпись «ПЛК готов». При отключении контроллера отображается «ПЛК не готов». Принудительно отключить контроллер возможно кнопкой «Отключить контроллер» расположенной в правом верхнем углу окна.

Приведенная на рисунке 30 общая последовательность действий может быть распределена на две группы операций, выполняемых программным обеспечением, поскольку каждая группа операций запускается оператором ПК. Первая группа включает в себя предварительную подготовку оптического коммутатора и видеосистемы, запись видеоинформации в оперативную память во время съемки и запись полученной информации на жесткий диск в виде файла. Вторая группа операций включает в себя поиск кадров со световыми пятнами и расчет координат их центров, расчет разъюстировок и юстирующих перемещений, загрузку данных в контроллер системы приводов и опрос излучателей в требуемом режиме с применением автоюстировки.

Время выполнения первой группы операций исследовалось в процессе пяти экспериментов, в которых программа Komm.exe фиксировала время выполнения всех операций. По результатам пяти экспериментов среднее время подготовки оптического коммутатора составило 784 мс, подготовки видеосистемы – 1200 мс, время записи видео и сохранения его в оперативную память – 5000 мс, время сохранения видеофайла на жёсткий диск – 9500 мс. Подготовка оптического коммутатора включает в себя: позиционирование приводов гексапода коммутатора в начальное положение, позиционирование привода призмы на первый излучатель системы, получение приоритета управления излучателями оптической системы. Подготовка видеосистемы включает в себя перенос фокуса из окна программы Komm.exe в окно программы FastvideoLab.exe и эмуляцию запуска видеозаписи и «стартового триггера». Время записи и сохранения видео

позволяет получить 500 кадров с частотой 746 кадр/с, поскольку данное время позволяет получить видеозапись с тремя световыми пятнами от трех излучателей при программно установленной длительности импульса излучения 30 мс и сохранить запись в оперативной памяти. Записанная в оперативную память информация по окончании видеосъемки сохраняется на жестком диске. Средняя длительность первой группы операций оптического коммутатора составила 16484 мс. На рисунке 53 представлена временная диаграмма первой группы операций коммутатора.

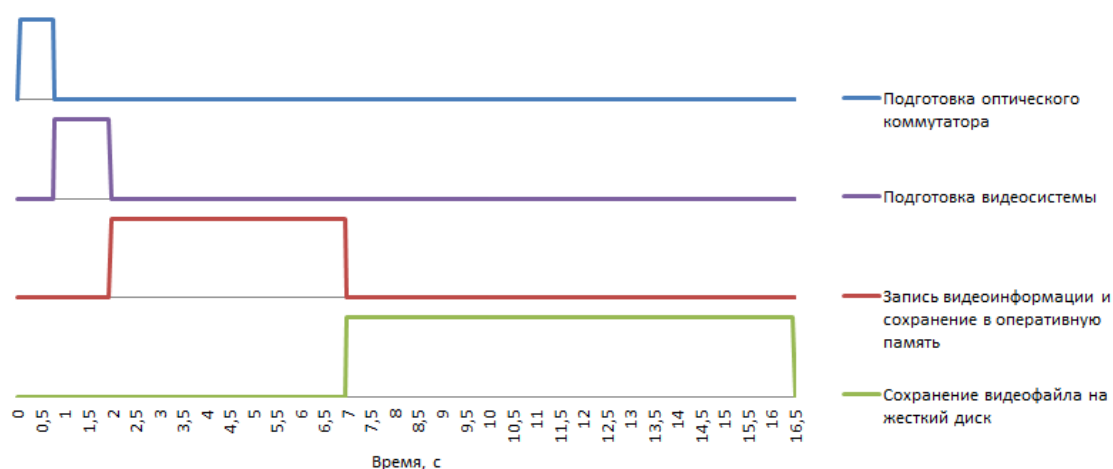


Рисунок 53 – Временная диаграмма операций оптического коммутатора

Время выполнения второй группы операций исследовалось в процессе пяти экспериментов, в которых программа Komm.exe фиксировала время выполнения всех операций. По результатам пяти экспериментов среднее время поиска кадров со световыми пятнами и расчет координат их центров составило 456 мс, расчет разъюстировок и юстирующих перемещений – менее 1 мс, загрузка данных в контроллер – 3100 мс, опрос излучателей в необходимом режиме – 151 мс. Средняя длительность второй группы операций оптического коммутатора составила 3708 мс. На рисунке 54 представлена временная диаграмма второй группы операций коммутатора.

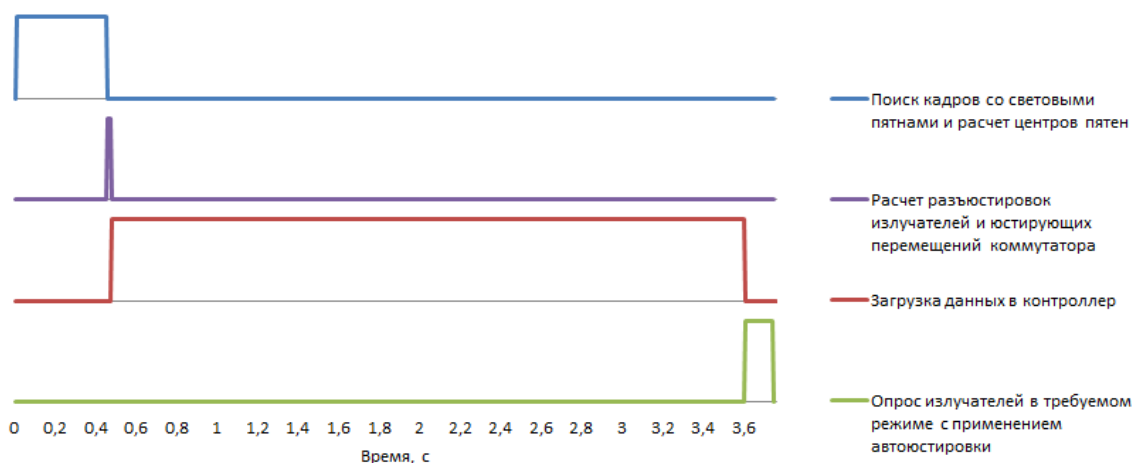


Рисунок 54 – Временная диаграмма операций оптического коммутатора

Без учета времени опроса излучателей, которое является величиной переменной и зависит от требуемых настроек, суммарное время получения и обработки информации для данного программного обеспечения составило 20,041 с, что на 66% меньше времени, запланированного в первой главе данной работы и на 97% меньше времени, затрачиваемого в существующем лазерном комплексе. Диаграмма, иллюстрирующая времена получения и обработки информации в существующем лазерном комплексе, а также требуемое и полученное время на разработанном оптическом коммутаторе приведено на рисунке 55.

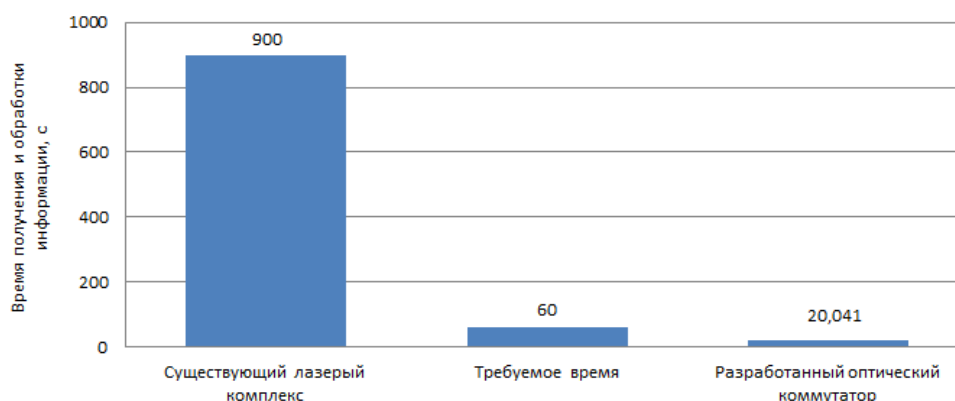


Рисунок 55 – Сравнительная диаграмма времени получения и обработки информации

Время получения и обработки информации при использовании разработанного программного обеспечения значительно меньше времени,

затрачиваемого в существующем лазерном комплексе. Полученная величина 20,041 с отвечает требованию, приведенному в первой главе данной работы (1 минута и менее).

3.5. Результаты и выводы

По итогам третьей главы диссертации, могут быть сделаны следующие выводы:

- разработан алгоритм автоюстировки излучения и предложена система главной обратной связи на основе скоростной видеосистемы. Проведенное моделирование алгоритма автоюстировки в среде пакета Matlab показало корректность разработанных математических законов, а экспериментальное исследование системы главной обратной связи подтвердило её работоспособность и точность. При этом абсолютная ошибка определения угловой разъюстировки при этом не превысила 4,26 угл.с;

- разработано программное обеспечение Komm.exe, устанавливаемое на компьютер и программа пользователя контроллера системы приводов MCC_test_main.mcc. Исследования показали, что время получения и обработки информации при использовании разработанного программного обеспечения составляет 20,041 с, что отвечает заданным техническим требованиям и на 97% меньше времени, затрачиваемого в существующем лазерном комплексе;

- разработанная структура оптического коммутатора относит его к классу мехатронных систем с компьютерным управлением [47], т.к. система управления, включающая в себя компьютер и специализированный контроллер, единомоментно осуществляет управление механическим движением приводов и их координацию, обработку сенсорной информации от системы главной обратной связи и взаимодействие с оператором через интерфейс разработанной программы.

Глава 4. Экспериментальные исследования оптического коммутатора

Экспериментальные исследования разработанного устройства позволяют на практике проверить теоретические основы функционирования, выявить характерные особенности работы и сформулировать возможные требования к модернизации.

4.1. Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд для испытаний оптического коммутатора представляет собой совокупность разнообразных оптических элементов и устройств, построенную на основе разработанной концепции коммутатора, а также на основе структурной и функциональной схем (рисунок 28 и 29 соответственно). Установка коммутатора, оптических элементов и видеокамер производится на основе взаиморасположение элементов сенсорной системы (рисунок 44).

Фотография экспериментального стенда с указанием некоторых элементов (на фотографии не видно поворотное зеркало в канале отведения излучения, источники излучения и оптические клинья) приведена на рисунке 56.

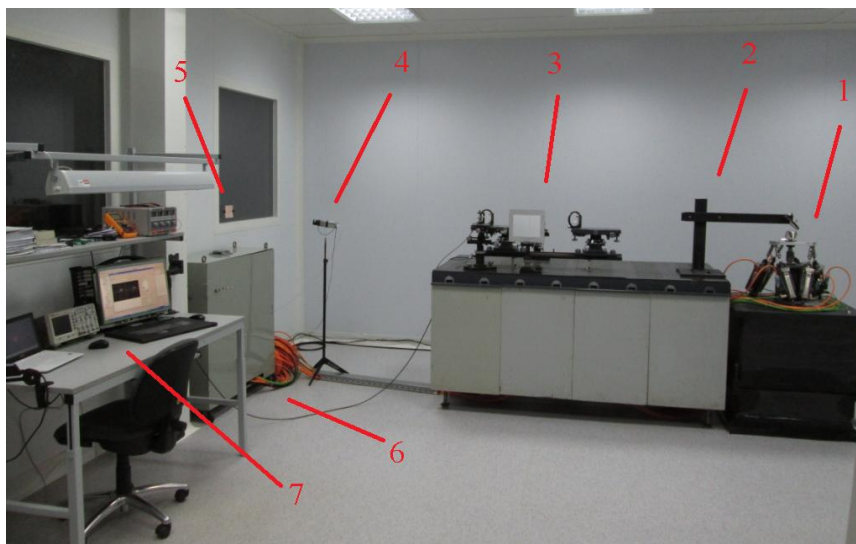
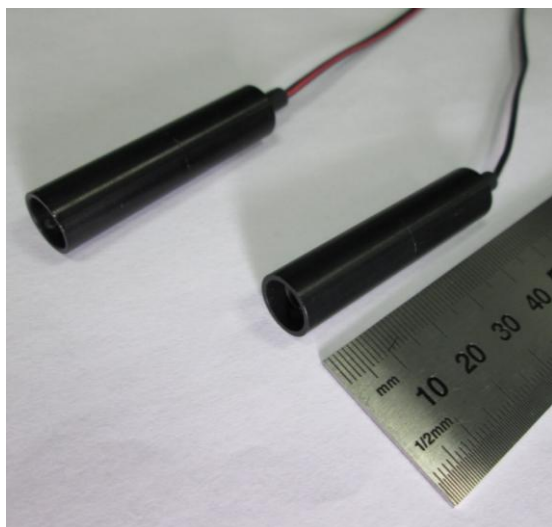


Рисунок 56 – Экспериментальный стенд оптического коммутатора:

- 1 – оптический коммутатор; 2 – поворотное зеркало на штативе;
- 3 – элементы системы отведения излучения и сенсорной системы;
- 4 – IP-видеокамера на штативе; 5 – диффузный экран; 6 – электрошкаф;
- 7 – элементы системы управления и регистрации параметров

Источником оптического излучения в системе были три излучателя ЛМ-650-20DA2 производства ЗАО «Кантегир». На рисунке 57 приведены фотографии излучателей ЛМ-650-20DA2.



а)



б)

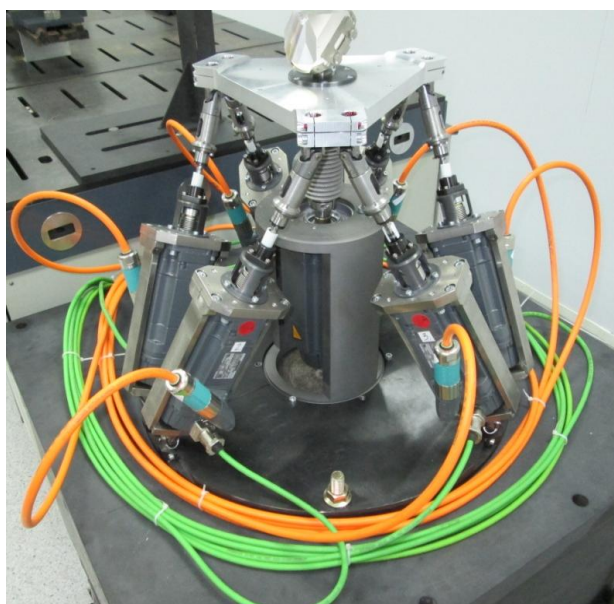
Рисунок 57 – Излучатели ЛМ-650-20DA2: а – размер излучателей;
б – излучатель в сборе с радиатором и юстировочной подвижкой Standa

Оптическая ось первого излучателя пролегает в направлении коммутатора и проходит через вращающиеся оптические клинья, установленные в оправу и имитирующие разъюстировки. Фотография клиньев приведена на рисунке 58.



Рисунок 58 – Вращающиеся оптические клинья в оправе

Компенсацию разбюстировок осуществляет образец разработанного оптического коммутатора, установленный на бетонной станине и показанный на рисунке 59.



а)



б)



в)

Рисунок 59 – Оптический коммутатор:

а – вид справа от входящей оптической оси; б – вид слева от входящей оси;
в – вид на платформу, сильфонную муфту и ШВП штанг

В непосредственной близости от станины коммутатора находится оптический стол с установленными на нем элементами системы отведения излучения и сенсорной системы. Совокупность этих элементов позволяет

охватить установку главной обратной связью и организовать регистрацию параметров работы. Элементы системы отведения излучения и сенсорной системы показаны на фотографии на рисунке 60.

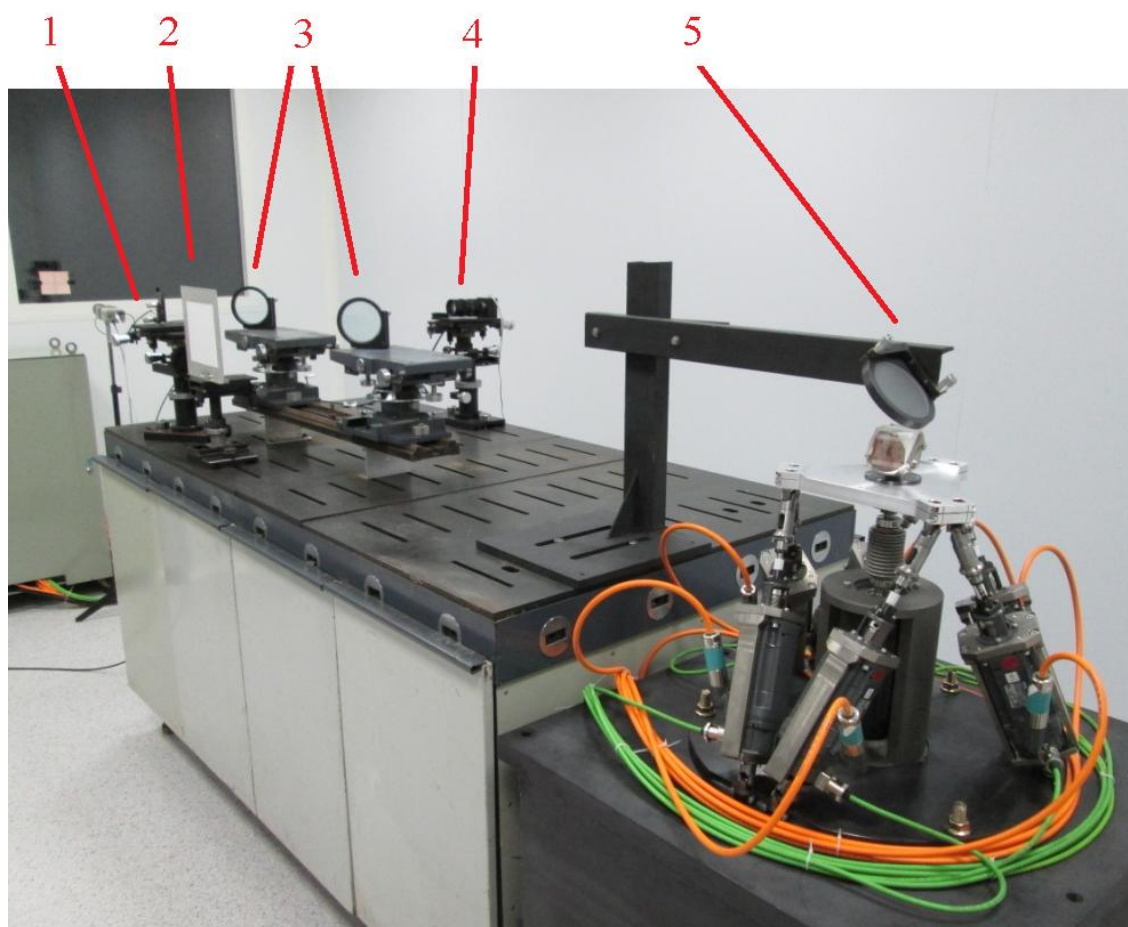


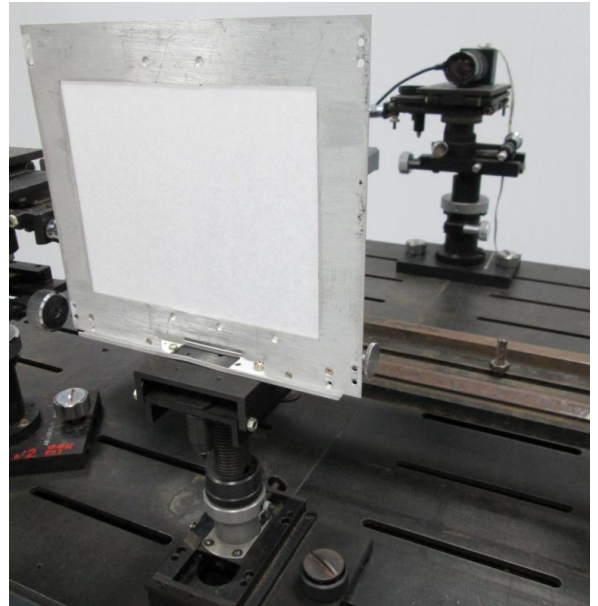
Рисунок 60 – Элементы системы отведения излучения и сенсорной системы:

- 1 – фотодиод в юстировочной подвижке Standa; 2 – полупрозрачный экран;
3 – светоделительные пластины; 4 – скоростная камера; 5 – поворотное зеркало

Отведенный первой пластиной пучок излучения отклоняется на 90° от первоначального направления, попадает на поворотное зеркало и отражается на полупрозрачный экран. Образованное им световое пятно наблюдается скоростной камерой. Поворотное зеркало, полупрозрачный экран и скоростная камера, образующие систему главной обратной связи, показаны на рисунке 61.



а)



б)

Рисунок 61 – Элементы системы главной обратной связи:

а – поворотное зеркало; б – полупрозрачный экран и скоростная камера

Система приводов и контроллер, а также вся необходимая периферия, расположена в электрошкафе, показанном на рисунке 62.



а)

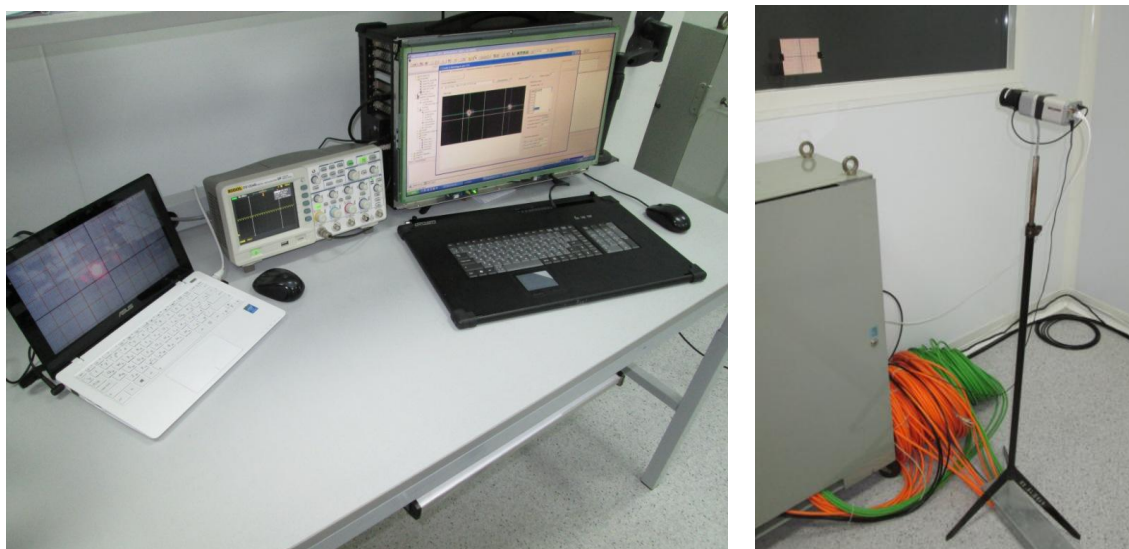


б)

Рисунок 62 – Электрошкаф и системы приводов:

а – электрошкаф; б – системы приводов, смонтированная в электрошкафе

Управление оптическим коммутатором и регистрация параметров приводов осуществляется с персонального компьютера IRobo-4000-90i6R. Регистрация позиций световых пятен на диффузном экране осуществляется IP-камерой, подсоединенной к ноутбуку Asus X200CA. Регистрация частот коммутации осуществляется осциллографом Rigol DS1204B. Данные элементы систем управления и регистрации параметров показаны на рисунке 63.



а)

б)

Рисунок 63 – Элементы системы управления и регистрации параметров:
а – ноутбук Asus X200CA, осциллограф Rigol DS1204B, ПК IRobo-4000-90i6R;

б – IP-камера, направленная на диффузный экран

4.2. Результаты экспериментальных исследований

Концепция разработанного оптического коммутатора, данная в первой главе данной работы, включает в себя ряд требуемых параметров: частота коммутации свыше 20 Гц, точность угловой юстировки на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ рад, предельные компенсируемые разъюстировки на уровне 5 угловых минут.

Целью исследований коммутатора было доказательство его работоспособности и возможности достижения заявленных технических параметров.

4.2.1 Исследование режима автоюстировки

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методикой, приведенной в приложении Г к данной диссертационной работе.

Исследование работоспособности алгоритма автоюстировки излучения включало в себя 9 опытов при различных сочетаниях вертикальной и горизонтальной разъюстировки первого излучателя, водившихся клиньями.

Первый опыт проводился без смещения клиньев. Со второго по девятый опыт излучатель разъюстировался таким образом, чтобы световые пятна заняли различные положения (приблизительно на окружности диаметром 8-10 мм с центром в середине диффузного экрана).

В соответствие с методикой испытаний, приведенной в приложении Г, на первом этапе каждого опыта производилась видеозапись положений световых пятен до юстировки и фиксация частоты коммутации и параметров приводов. Далее будет рассмотрен третий опыт, в котором световое пятно первого излучателя в результате разъюстировки уведено вверх и влево на диффужном экране. На рисунке 64 приведены световые пятна от трех опрошенных излучателей.

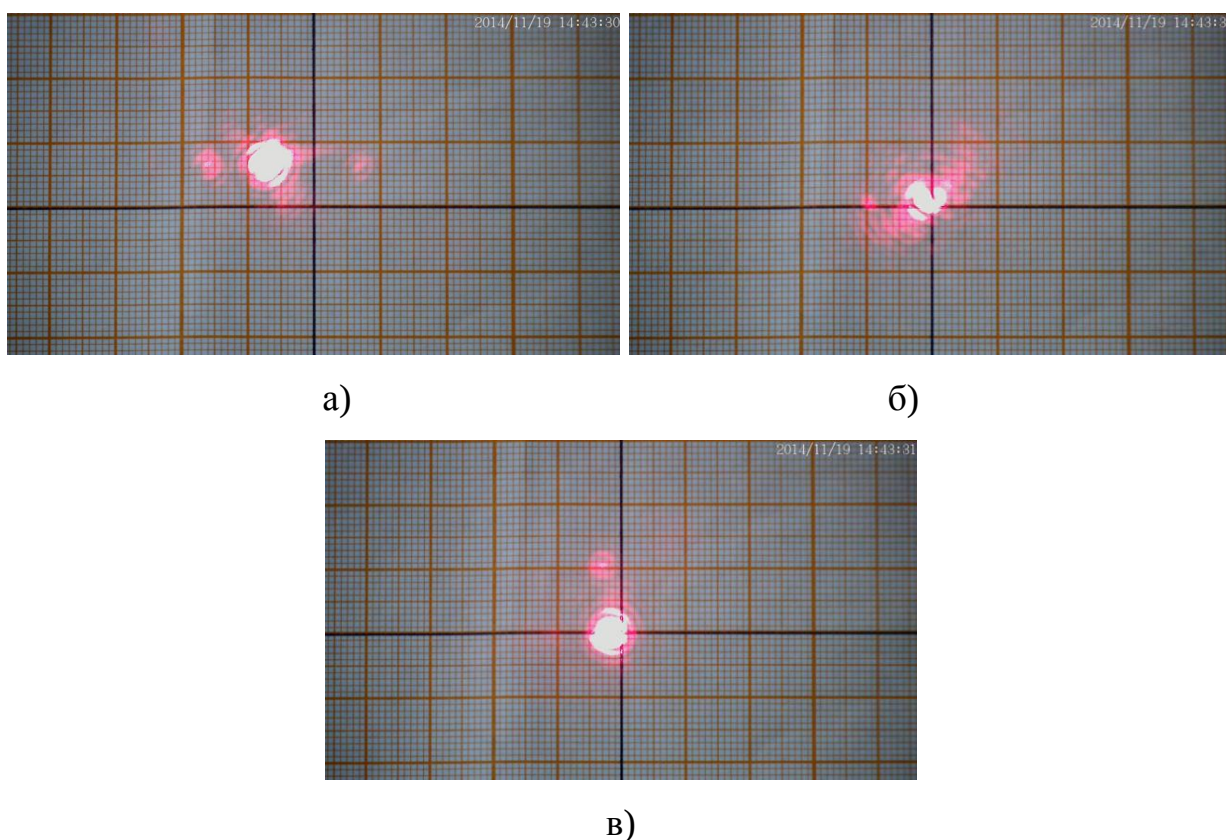


Рисунок 64 – Световые пятна опрошенных излучателей до юстировки (на первом этапе опыта): а – первый излучатель; б – второй излучатель; в – третий излучатель

На рисунке 64 отчетливо видно смещение светового пятна первого излучателя – следствие разъюстировки его оптической оси клиньями.

Отведенный световой пучок, попавший на фотодиод, позволил зафиксировать осциллограмму импульсов излучения, показанную на рисунке 65.

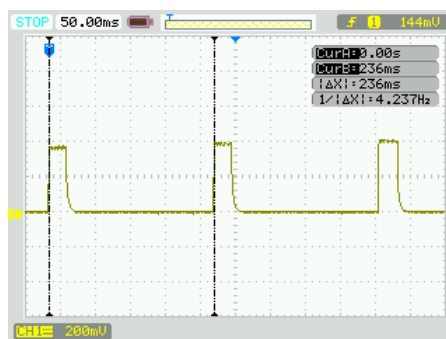


Рисунок 65 – Осциллограмма импульсов излучения на первом этапе опыта

С помощью измерительных курсоров была получена частота следования импульсов порядка 4,23 Гц. Данная частота является фиксированной для прочих восьми опытов, поскольку на первом этапе выполняется опрос излучателей приводом призмы с фиксированным быстродействием. Осциллограмма параметров привода призмы приведена на рисунке 66.

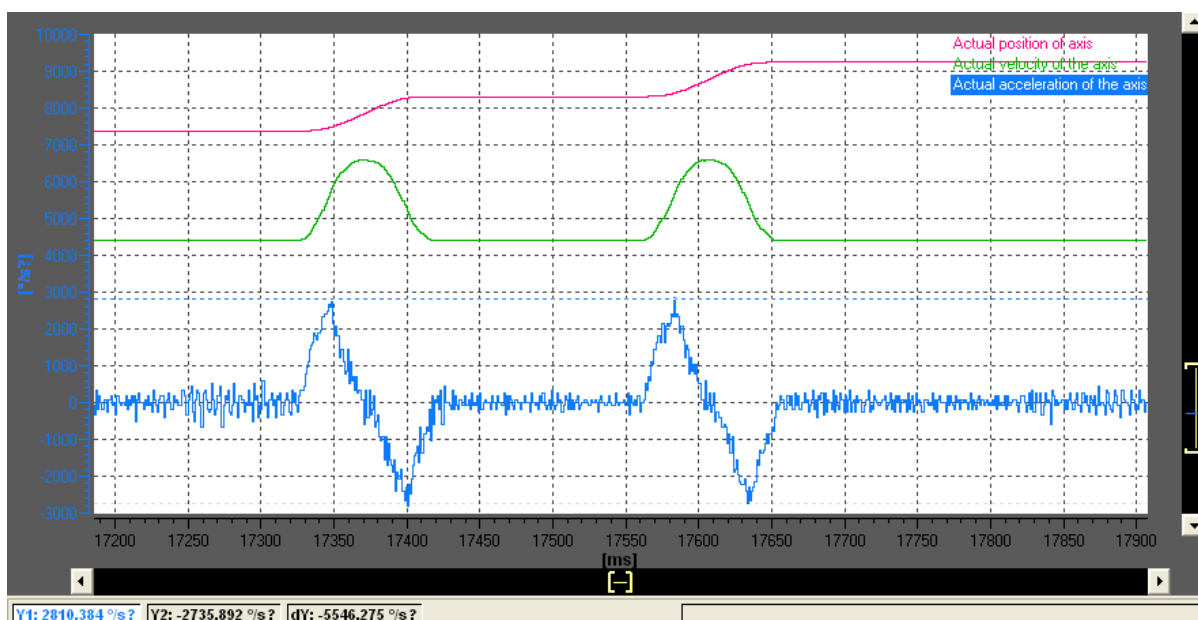


Рисунок 66 – Осциллограмма параметров привода призмы на первом этапе опыта: розовый график – положение; зеленый график – скорость; синий график – ускорение

Полученная осциллограмма показала, что максимальная скорость привода призмы составила 60 угл.град/с, а ускорение – порядка 2800 угл.град/с².

На втором этапе опыта происходила коммутация излучателей в режиме автоюстировки. На рисунке 67 приведены световые пятна от трех опрошенных излучателей после юстировки.

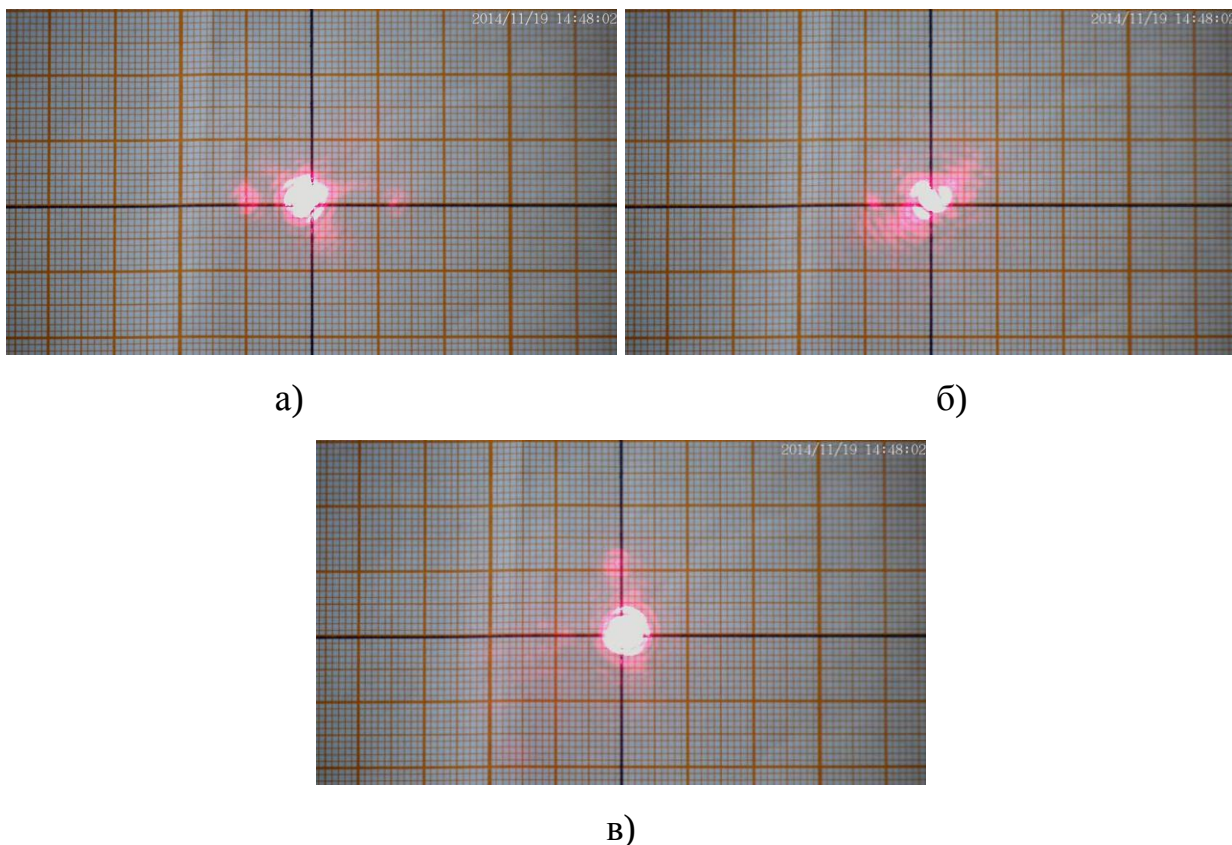


Рисунок 67 – Световые пятна опрошенных излучателей в режиме автоюстировки (на втором этапе опыта): а – первый излучатель; б – второй излучатель; в – третий излучатель

На рисунке 67 отчетливо видно, что световое пятно первого излучателя попадает в центр экрана, в отличие от его пятна на рисунке 64. Для второго и третьего излучателя компенсация не столь заметна, но, тем не менее, видна. Таким образом, при коммутации излучателей произошла компенсация разъюстировок.

Осциллограмма импульсов излучения в рабочем режиме дана на рисунке 68.



Рисунок 68 – Осциллограмма импульсов излучения на втором этапе опыта

С помощью измерительных курсоров была получена частота следования импульсов порядка 5,05 Гц. Данная частота является фиксированной для прочих восьми опытов, поскольку на первом этапе выполняется опрос излучателей приводом призмы с фиксированным быстродействием.

Поскольку при рабочем режиме в работу включаются привода гексапода, на рисунке 69 приведена осциллограмма параметров привода первой штанги.

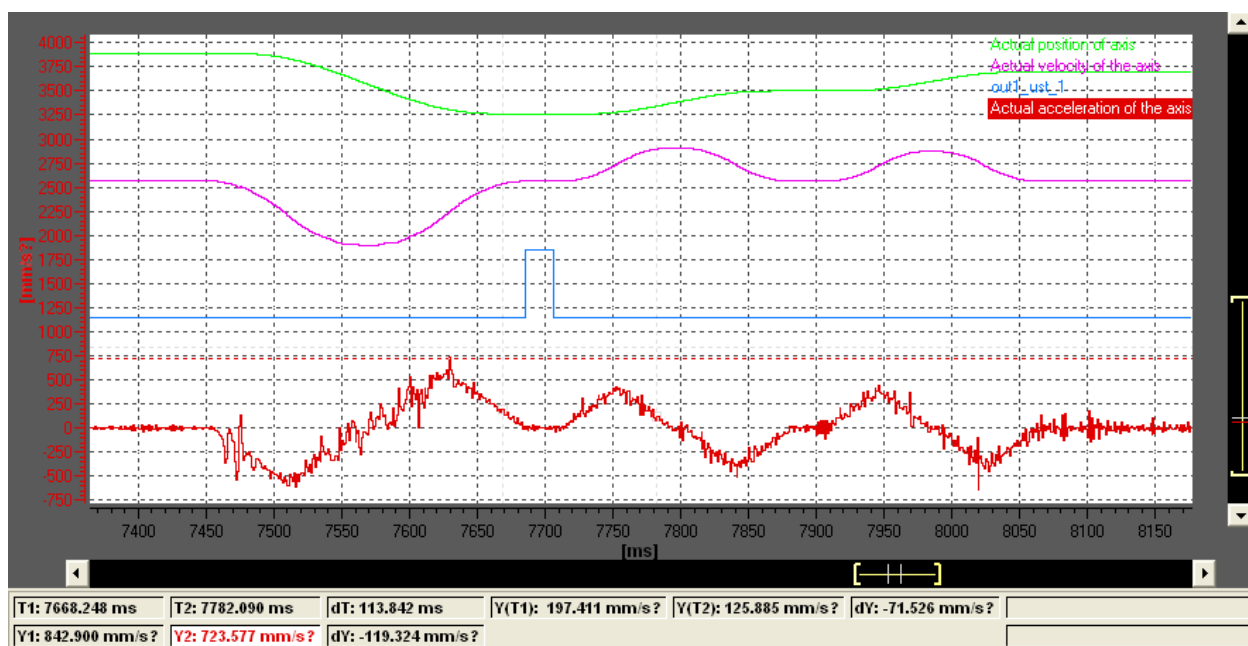


Рисунок 69 – Осциллограмма параметров привода первой штанги на втором этапе опыта: зеленый график – положение; розовый график – скорость; красный график – ускорение; синий график – управляющий импульс для первого излучателя

Полученная осциллограмма показала, что максимальная скорость привода первой штанги составила 33 мм/с, а ускорение – порядка 700 мм/с².

На протяжении девяти опытов осциллограммы частот и параметров приводов имеют абсолютно идентичную форму, т.к. настройки приводов были предустановлены и не изменялись. Изменения претерпевали только вводимые в первый излучатель разъюстировки (перемещение клиньев осуществлялось вручную).

Полный перечень кадров со световыми пятнами (до и после юстировки), наблюдавшимися IP-камерой на диффузном экране на протяжении девяти опытов приведен в приложении Д к данной диссертационной работе.

По результатам девяти опытов были получены экспериментальные данные по компенсируемым разъюстировкам трех излучателей. Поскольку искусственные разъюстировки вводились только в первый излучатель, в таблице 1 представлены данные для первого излучателя.

Таблица 1 – Компенсируемые разъюстировки первого излучателя

№ опыта	Дата и время создания видеокadra со световым пятном	Позиция светового пятна относительно центра экрана	Компенсируемая разъюстировка излучателя, рад	
			горизонтальная	вертикальная
1	19.11.2014 14-30-26	Совпадение	-0,00010	-0,00012
2	19.11.2014 14-27-44	Смещение вверх	0,0012	-0,00016
3	19.11.2014 14-43-30	Смещение вверх и влево	0,00095	0,00096
4	19.11.2014 14-51-27	Смещение влево	0,000015	0,00098
5	19.11.2014 14-55-48	Смещение вниз и влево	-0,00081	0,00064
6	19.11.2014 15-3-00	Смещение вниз	-0,0011	0,000093
7	19.11.2014 15-09-03	Смещение вниз и вправо	-0,001	-0,0011
8	19.11.2014 15-16-31	Смещение вправо	-0,000015	-0,0010
9	19.11.2014 15-22-59	Смещение вверх и вправо	0,00089	-0,00083

На основе данных из таблицы 1 был составлен график динамики компенсируемых разъюстировок первого излучателя на протяжении девяти опытов. График представлен на рисунке 70.

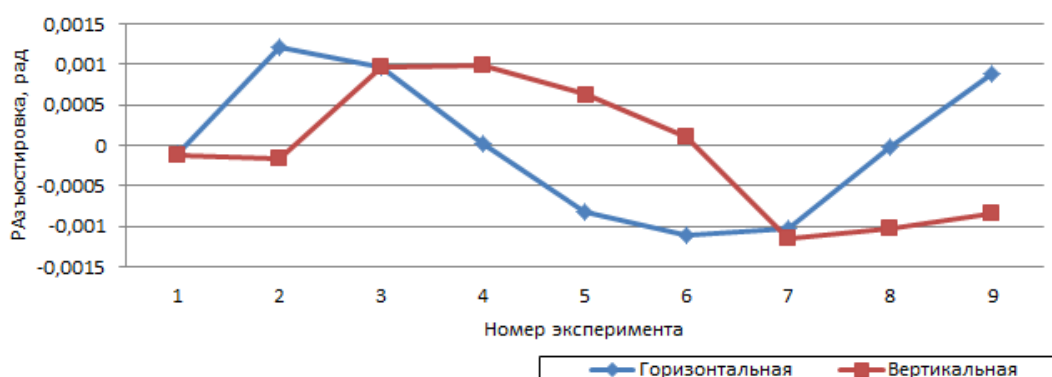


Рисунок 70 – График компенсируемых разъюстировок первого излучателя

Горизонтальная и вертикальная составляющие образуют итоговое значение компенсируемой разъюстировки согласно формуле (61):

$$A = \sqrt{A_H^2 + A_V^2}, \quad (61)$$

где A_H и A_V – горизонтальная и вертикальная составляющие компенсируемой разъюстировки соответственно.

По итогам девяти опытов максимальная компенсируемая разъюстировка наблюдалась в седьмом опыте и составила 0,0015 рад.

На основе полученных видеок кадров с пятнами на диффузном экране были получены экспериментальные данные по погрешностям угловой юстировки первого излучателя, представленные в таблице 2.

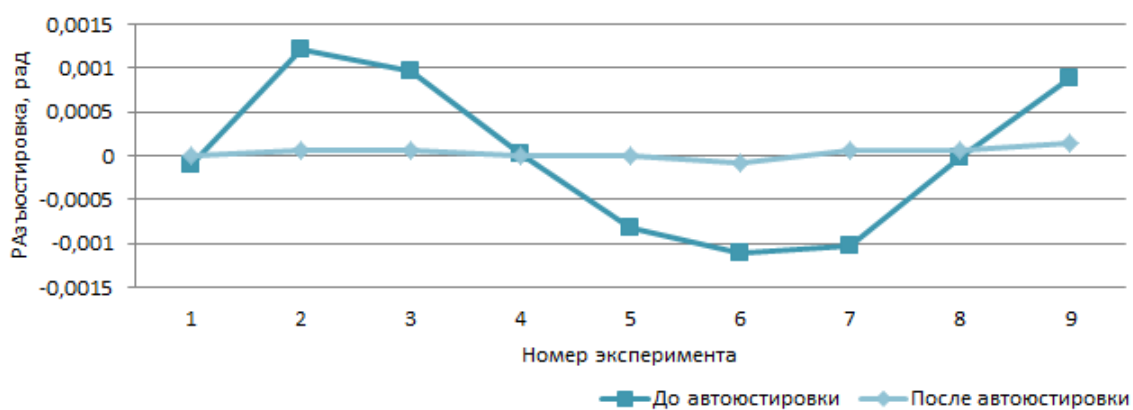
Таблица 2 – Погрешность угловой юстировки первого излучателя

№ опыта	Дата и время создания видеок кадра со световым пятном	Смещение светового пятна относительно центра экрана, мм		Погрешность угловой юстировки, рад	
		горизонтальное	вертикальное	горизонтальная	вертикальная
1	19.11.2014 14-33-02	0,5	0	0	-0,000071
2	19.11.2014 14-41-09	0	0,5	0,000071	0
3	19.11.2014 14-48-02	-1	0,5	0,000071	0,00014

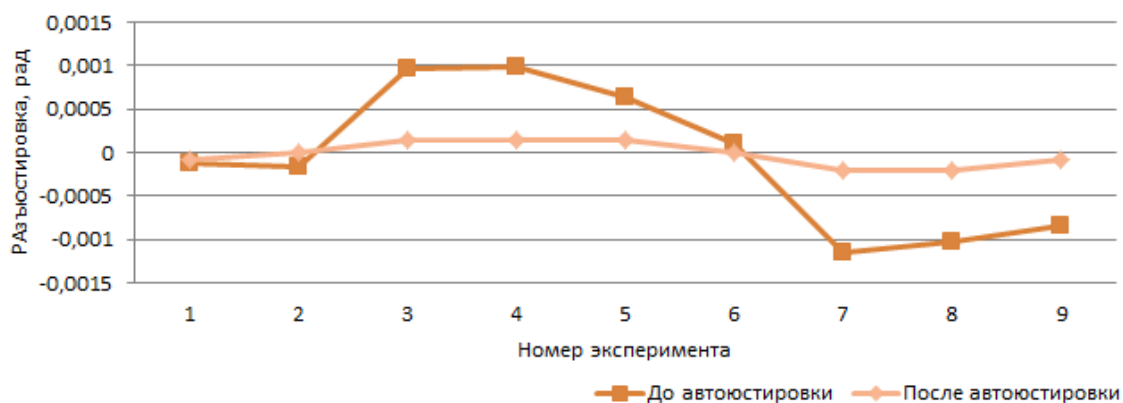
Продолжение таблицы 2

4	19.11.2014 14-52-32	-1	0	0	0,00014
5	19.11.2014 14-57-23	-1	0	0	0,00014
6	19.11.2014 15-03-46	0	-0,5	-0,000071	0
7	19.11.2014 15-13-12	2	0,5	0,000071	-0,00028
8	19.11.2014 15-19-04	2	0,5	0,000071	-0,00028
9	19.11.2014 15-28-44	0,5	1	0,00014	-0,000071

На основе данных из таблицы 2 были составлены сравнительные графики разъюстировок излучателей до и после автоюстировки. Графики представлены на рисунке 71.



а)



б)

Рисунок 71 – Сравнительные графики разъюстировок излучателей до и после автоюстировки: а – горизонтальная; б – вертикальная

Горизонтальная и вертикальная составляющие образуют итоговое значение погрешностей угловой юстировки согласно формуле (62):

$$\Delta A = \sqrt{\Delta A_x^2 + \Delta A_y^2}, \quad (62)$$

где A_x и A_y – горизонтальная и вертикальная составляющие погрешности угловой юстировки.

По итогам девяти опытов наибольшая погрешность угловой юстировки наблюдалась в седьмом и восьмом опыте и составила 0,00029 рад.

По итогам девяти опытов можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная компенсируема разъюстировка составила 0,0015 рад или 5,29 угл.мин. Полученный результат соответствует заданному требованию на максимальную компенсируемую разъюстировку более 5 угл. мин.

2. Наибольшая погрешность угловой юстировки наблюдалась в седьмом и восьмом опыте и составила 0,00029 рад. Среднее значение погрешности по итогам девяти опытов составила 0,00015 рад. Полученные значения максимальной и средней погрешностей автоюстировки соответствуют заданному требованию на предельную погрешность автоюстировки 0,0003 рад.

3. Способность коммутатора компенсировать разъюстировки излучателей позволяет исключить из установки излишнюю юстирующую оптику, т.к. её функция успешно выполняется разработанным оптическим коммутатором.

4.2.2 Исследование повышения эффективности оптической системы с оптическим коммутатором

Основной задачей разработанного коммутатора является повышение эффективности работы оптической установки с набором излучателей. Повышение эффективности, в данном случае, достигается за счет роста КПД оптического тракта вследствие исключения излишней юстирующей оптики - оптических клиньев, функции которых выполняет оптический коммутатор.

Целью исследования являлось определение роста интенсивности световых пятен при исключении юстирующей оптики и применении оптического коммутатора. Рост интенсивности является подтверждением повышения

эффективности работы оптической установки, т.к. свидетельствует о повышении КПД оптических трактов излучателей.

Для достижения цели в процессе коммутации излучателей записывался видеофайл со световыми пятнами на полупрозрачном диффузном экране. Коммутация производилась для имеющихся в системе излучателей двукратно: при наличии юстирующей оптики в оптических трактах и при отсутствии таковой.

В ходе испытаний для трех излучателей были получены видеокадры со световыми пятнами, примеры которых представлены на рисунке 72.

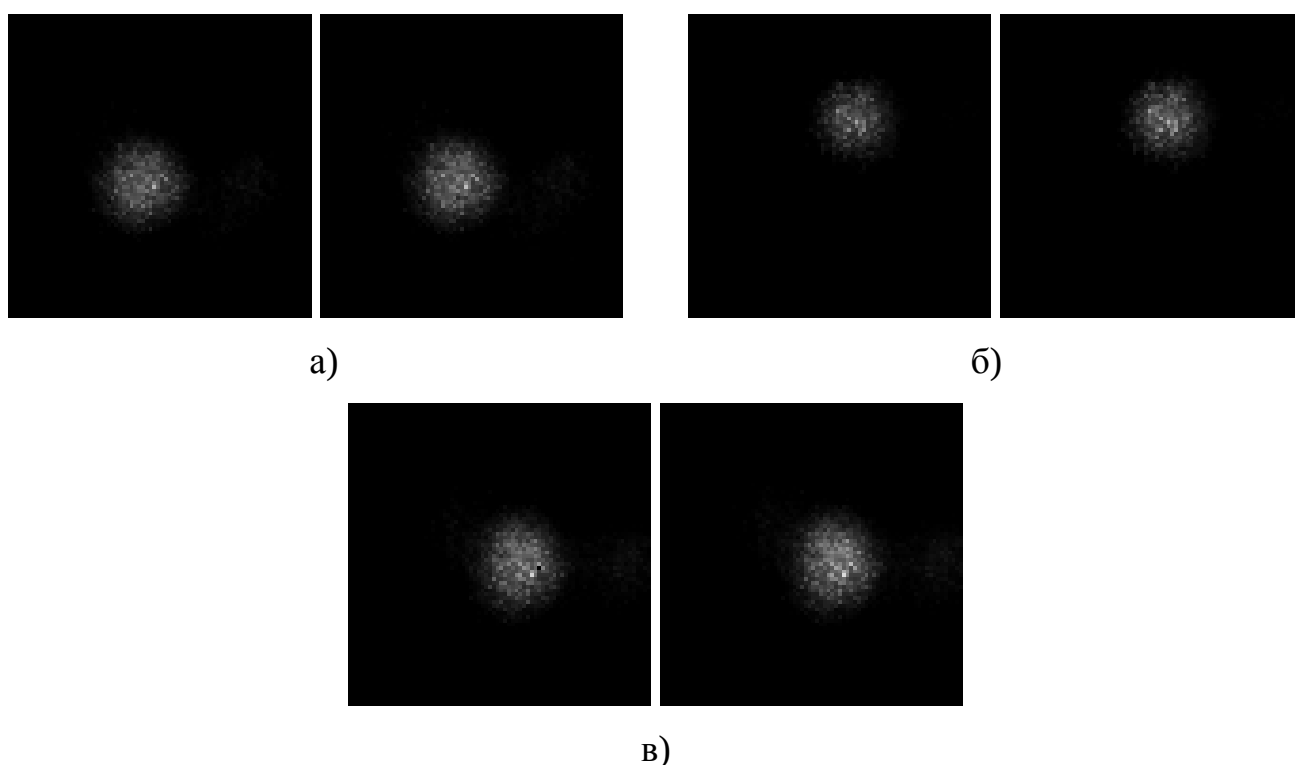


Рисунок 72 – Видеокадры при наличии и отсутствии юстирующей оптики в трактах излучателей (левые и правые кадры соответственно):

а – первый излучатель; б – второй излучатель; в – третий излучатель

Для полученных световых пятен были построены объемные диаграммы, иллюстрирующие увеличение интенсивности при исключении юстирующей оптики, представленные на рисунке 73.

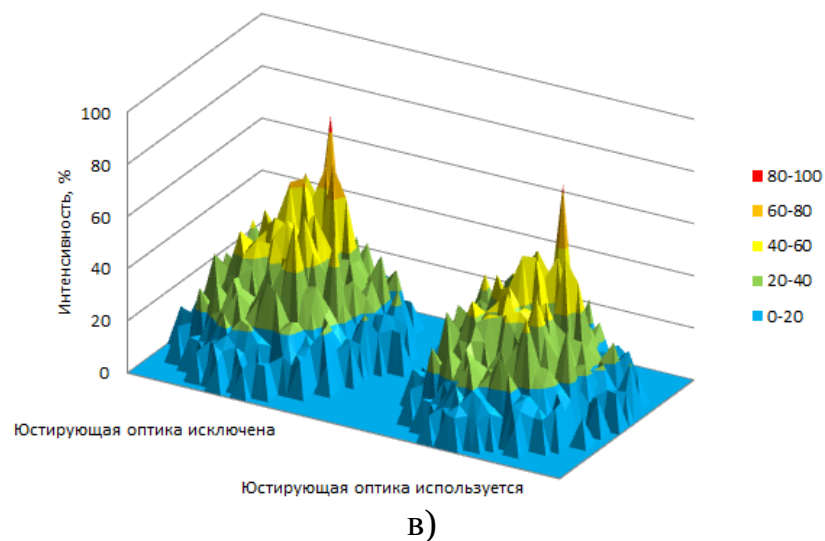
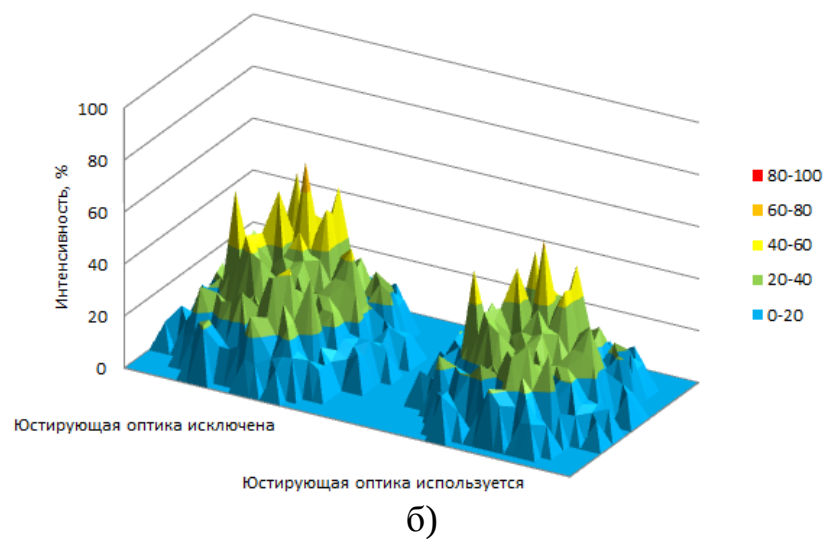
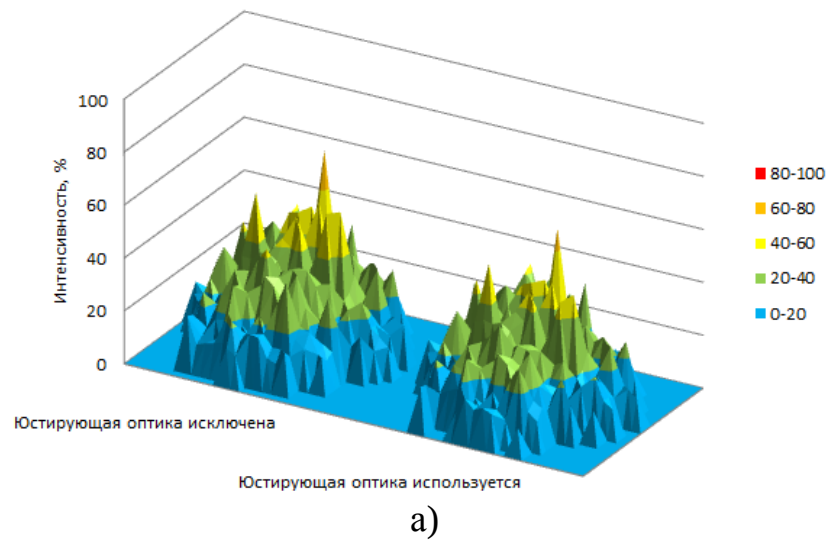


Рисунок 73 – Диаграммы интенсивности световых пятен при исключении юстирующей оптики и её использовании: а – первый излучатель; б – второй излучатель; в – третий излучатель

Полученные кадры видеозаписи анализировались программой Komt.exe и на всех видеокдрах с засвеченными пикселями производилось суммирование яркостей (интенсивностей) пикселей в пределах светового пятна. Суммарная яркость (интенсивность) светового пятна, состоящего из n пикселей, определялась по формуле (63):

$$f_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n f_i(p), \quad (63)$$

где $f_i(p)$ – яркость i -го пикселя;

$f_{\text{сум}}$ – суммарная яркость (интенсивность) светового пятна.

Сравнение суммарной интенсивностей пятен при использовании юстирующей оптики и при её исключении позволяют количественно определить рост эффективности работы оптической установки. Вычисленные суммарные интенсивности световых пятен приведены на сравнительных диаграммах на рисунке 74.

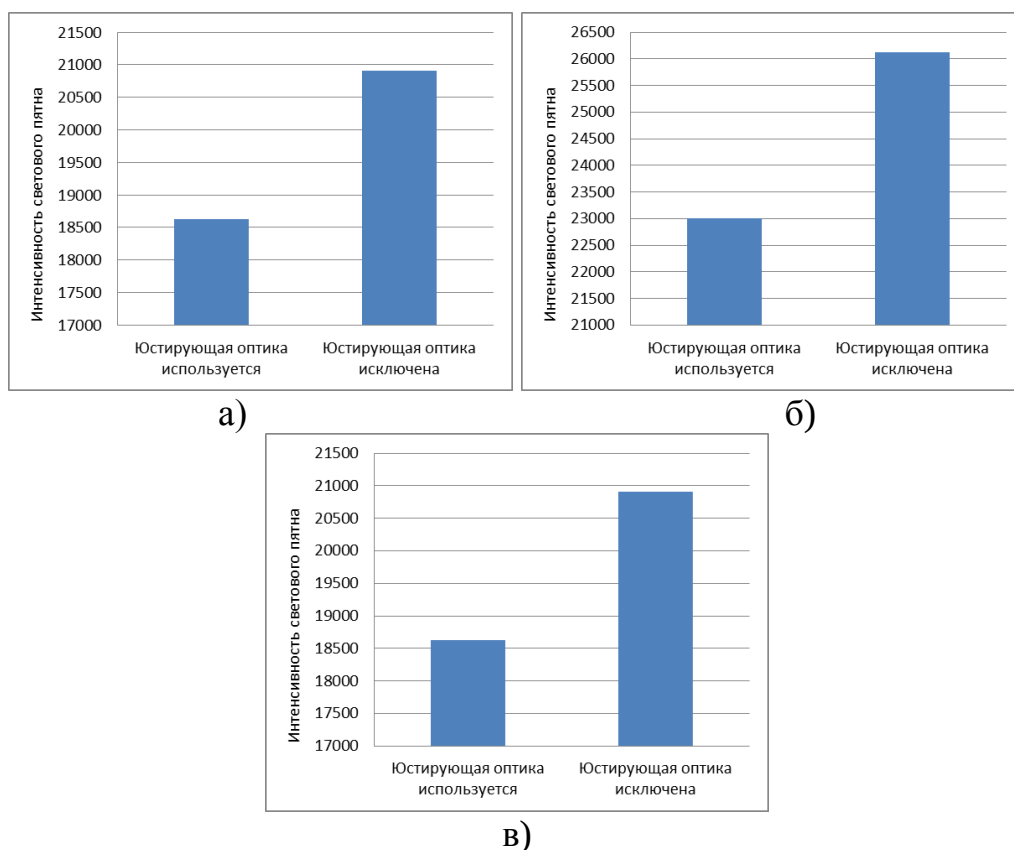


Рисунок 74 – Сравнительные диаграммы интенсивности световых пятен при использовании и исключении юстирующей оптики: а – первый излучатель; б – второй излучатель; в – третий излучатель

Для трех излучателей, использовавшихся в системе, исследование показало, что при исключении юстирующей оптики суммарная интенсивность световых пятен повысилась на 12,26%, 12,94% и 13,52% соответственно.

По итогам проведенного исследования можно сделать следующий вывод: исключение юстирующей оптики вследствие применения оптического коммутатора позволяет повысить эффективность в среднем на 12,91% (в случае применения в качестве юстирующей оптики двух оптических клиньев). Таким образом, применение разработанного коммутатора в оптической установке с набором излучателей позволяет повысить эффективность работы установки без увеличения мощности отдельных излучателей. Достижение данной цели является основной задачей данной диссертационной работы.

4.2.3 Эксперименты по поднятию частоты коммутации излучения

Помимо описанных выше опытов, так же проводились эксперименты по поднятию частоты коммутации. Целью данного исследования являлось определение возможности достижения частоты коммутации свыше 20 Гц. Основой для поднятия частоты коммутации было повышение предельных значений характеристик приводов манипулятора коммутатора, таких как скорость, ускорение и рывок. Как показала практика, основной вклад во время позиционирования привносит переходный процесс приводов штанг гексапода. Поскольку в штангах применялись ШВП с шагом 12 мм, а максимальные перемещения штанг в рабочем режиме оставляют ± 5 мм, от приводов требовалось скоростное перемещение на углы не более 150° . При высоких ускорениях перемещения носили ударный характер, поэтому эксперимент проходил в несколько этапов с постепенными поднятием предельных значений характеристик перемещения приводов штанг.

Изменяемые характеристики (скорость, ускорение и рывок) приводов штанг для рабочего режима являются переменными, заложенными в программе пользователя контроллера и именуются `leg_fast_speed`, `leg_fast_acceleration`, `leg_fast_jerk` соответственно. Данные переменные используются в командах перемещения в submodule Operating Mode модуля Module Main, описанного в

третьей главе настоящей работы и полностью приведенного в приложении В. В команде перемещения задается трапецеидальная форма скорости привода при переходном процессе и предельные значения скорости, ускорения и рывка.

В начальном варианте программы были заданы переменные: скорость – 300 мм/с, ускорение – 3000 мм/с², рывок – 10000 мм/с³. Соответствующая осциллограмма коммутации была приведена на рисунке 68, а частота коммутации составила 5,05 Гц.

Во втором варианте программы рывок был увеличен до 50000 мм/с³, а достигнутая частота коммутации повысилась до 8,06 Гц.

В третьем варианте программы рывок был увеличен до 100000 мм/с³, а достигнутая частота коммутации повысилась до 9,61 Гц. В этом эксперименте серьезное влияние на частоту оказывает длительность импульса излучения источников равная 20 мс. Длительность устанавливается в соответствующей команде управления логическим выходом контроллера, который, в свою очередь, управляет излучателем.

В четвертом варианте программы было увеличено ускорение до 10000 мм/с², рывок увеличен до 500000 мм/с³, а длительность импульса излучения источников снижена до 5 мс. Достигнутая частота коммутации повысилась до 16,89 Гц.

В пятом варианте программы рывок был увеличен до 1000000 мм/с³, а достигнутая частота коммутации повысилась до 21,19 Гц. В этом эксперименте сработала отсечка по установленному значению ускорения (10000 мм/с²), что вынудило поднять его в следующем эксперименте.

В шестом варианте программы скорость была увеличена до 500 мм/с, а ускорение - до 20000 мм/с². Достигнутая частота коммутации составила 23,15 Гц.

По результатам шести проведенных экспериментов был построен график роста частоты коммутации, представленный на рисунке 75.

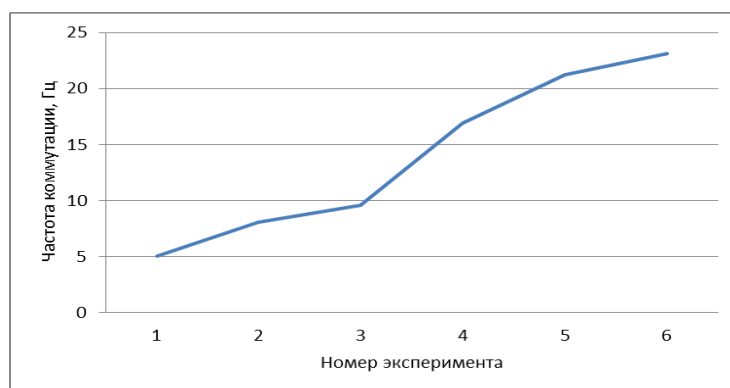


Рисунок 75 – Частота коммутации излучения в ходе шести экспериментов

Стоит отметить, что предел быстродействия приводов достигнут не был, а ограничивающим фактором являлась прочность карданных шарниров штанг. Примененные шарниры, показанные на рисунке 76, имели стальные цементированные оси диаметром порядка 3 мм и по итогам эксперимента были признаны наименее надежным узлом, подлежащим в будущем замене на более прочный аналог.



Рисунок 76 – Примененные карданные шарниры, признанные недостаточно прочными

По итогам проведенного исследования можно сделать следующий вывод:

1. Достигнутое значение частоты коммутации 23,15 Гц подтвердило способность разработанного оптического коммутатора осуществлять коммутацию на частотах свыше 20 Гц. Полученное значение соответствует условию, заданному в требованиях к оптическому коммутатору в первой главе настоящей работы.

2. Примененные карданные шарниры Antrieb 03G были признаны недостаточно прочными в условиях ударных нагрузок при работе оптического коммутатора.

4.3. Результаты и выводы

По итогам четвертой главы диссертации, могут быть сделаны следующие выводы:

- созданный экспериментальный стенд включает в себя все элементы, необходимы для проведения различных исследования оптического коммутатора и располагает всеми требуемыми средствами измерения;

- проведенные исследования режима автоюстировки показали, что полученные результаты в части максимальной компенсируемой разъюстировки 5,29 угл.мин и наибольшей погрешность юстировки 0,00029 рад соответствуют заданным техническим требованиям;

- проведенные исследования режима автоюстировки показали его корректное функционирование, т.е. применение разработанного коммутатора позволяет исключить из установки излишнюю юстирующую оптику, т.к. её функция успешно выполняется коммутатором;

- проведенные исследования показали, что разработанное устройство способно коммутировать источники излучения на частотах свыше 20 Гц (а именно – 23,15 Гц), что отвечает заданным техническому требованию;

- проведенные исследования показали, что применение оптического коммутатора повысило эффективность оптической установки в среднем на 12,91% за счет исключения излишней юстирующей оптики, что является основной задачей данной диссертационной работы.

Заключение

В заключение данной работы можно сделать следующие общие выводы:

1. Сформулирована общая концепция разрабатываемого коммутатора и выбрана его кинематическая структура на основе анализа спектра имеющихся устройств позиционирования оптических элементов.

2. Решена обратная задача кинематики. Ключевой особенностью явилось исключение угла собственного вращения платформы из степеней подвижности гексапода и замена его углом вращения обособленного привода призмы, а также отказ от представления ориентирующих степеней подвижности в виде углов Эйлера в пользу представления в виде угла наклона платформы вокруг некоторого вектора. Данный подход позволил упростить уравнения для обобщенных координат штанг гексапода и максимально упростить уравнение собственного вращения рабочего органа. Моделирование разработанных законов движения оптического коммутатора показало их корректность, а 3D-визуализация его перемещений позволила подтвердить это.

3. Разработан алгоритм автоюстировки излучения, позволяющий компенсировать разъюстировки излучателей оптической установки, а также предложена система главной обратной связи, базирующаяся на скоростной видеосистеме.

4. Разработана программа управления оптическим коммутатором и программа пользователя контроллера Siemens Simotion D. Время получения и обработки информации для данного программного обеспечения составило 20,041 с, что на 97% меньше времени, затрачиваемого в существующем лазерном комплексе. Спроектированы системы приводов в среде разработки Siemens Sizer, позволившей максимально эффективно подобрать и скомпоновать составные элементы, а также провести необходимые расчеты производительности.

5. Разработанные уравнения кинематики и алгоритмы функционирования оптического коммутатора были смоделированы в пакете MatLab и среде Simulink с применением 3D-визуализации результатов. Моделирование алгоритма

автоюстировки и движения коммутатора позволило убедиться в корректности и работоспособности разработанных алгоритмов.

6. В заключение работы были проведены испытания оптического коммутатора на базе созданного экспериментального стенда. В процессе исследований были получены следующие практические результаты:

- максимальная достигнутая частота коммутации составила 23,15 Гц, что соответствует выдвинутому требованию, однако предел быстродействия приводов достигнут не был, а ограничивающим фактором явилась прочность карданных шарниров штанг;

- максимальная компенсируемая разъюстировка составила 5,29 угл.мин, что превышает заданное требование (5 угл. мин);

- среднее значение погрешности по итогам девяти опытов составило 0,00015 рад при максимальной погрешности 0,00029 рад. Полученные значения средней и максимальной погрешностей автоюстировки соответствуют заданному требованию на предельную погрешность автоюстировки 0,0003 рад;

- проведенные исследования режима автоюстировки показали, что применение разработанного коммутатора позволяет исключить из установки излишнюю юстирующую оптику, т.к. её функция успешно выполняется коммутатором;

- применение оптического коммутатора повысило эффективность оптической установки в среднем на 12,91% за счет исключения излишней юстирующей оптики, т.е. была достигнута основная цель диссертационной работы.

7. Результаты данной диссертационной работы были внедрены в практику научно-технической деятельности ФКП «ГЛП «Радуга» (г. Радужный) и в учебный процесс кафедры «МиЭСА» Владимирского Государственного Университета имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, что подтверждается актами внедрения, приведенными в приложении Е и приложении Ж соответственно.

Список литературы

1. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
2. Афонин, В.Л. Обработывающее оборудование на основе механизмов параллельной структуры / В.Л. Афонин, П.В. Подзоров, В.В. Слепцов. – М.: МГТУ Станкин, 2006. – 449 с.
3. Беспрозванных, В.Г. Нелинейная оптика: учебное пособие / В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 200 с.
4. Вайнштейн, И.В. Станки для высокоскоростной обработки деталей и перспективы их развития в машиностроении / И.В. Вайнштейн, Н.А. Серков, Р.О. Сироткин // Авиационная промышленность. – 2006. – № 3. – с. 49-55.
5. Вайнштейн, И.В. Экспериментальное исследование статической жесткости 5-ти координатного фрезерного станка с параллельной кинематикой / И.В. Вайнштейн, Н.А. Серков, Р.О. Сироткин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – № 5. – с. 102-109.
6. Василенко, Н.В. Основы робототехники / Н.В. Василенко, К.Д. Никитин, В.П. Пономарёв, А.Ю. Смолин. – Томск: МГП «РАСКО», 1993. – 475 с.
7. Волоконный лазер – экономическая оценка // Компания «Интерлазер»: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: <http://interlaser.ru/lazernaya-rezka-metalla/362-volokonnyj-lazer-ekonomicheskaya-otsenka> (дата обращения: 10.02.2015).
8. Гапоненко, Е.В. Динамика управляемого движения робота-трипода с шестью степенями подвижности: дис. канд. тех. наук: 01.02.06: защищена 25.12.14: утв. 27. 12. 14 / Яцун Сергей Федорович. – Курск, 2014. – 219 с.
9. Глазунов, В.А. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой / В.А. Глазунов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – №1. – с. 41–49.
10. Глазунов, В.А. Разработка манипуляционных механизмов с параллельно-перекрестной структурой / В.А. Глазунов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – №2. – с. 90-100.

- 11.Гофман, В.Э. Delphi 6 в подлиннике / В.Э. Гофман, А.Д. Хомоненко. – СПб.: БХВ, 2001. – 1152 с.
- 12.ГОСТ 2.701 – 2008 Единая система конструкторской документации. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – М.: Стандартинформ, 2009. – 13 с.
- 13.ГОСТ Р 15.011–96 Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 18 с.
14. Гриб, Б. Н. Электрооптические дефлекторы света / Б.Н. Гриб, И.И. Кондиленко, П. А. Короткое, Ю. П. Цященко. – Киев: Техника, 1980. – 206 с.
- 15.Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами : монография / И.Н. Егоров. – Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 192 с.
- 16.Зариктуев В.Ц. К проблеме создания мехатронных станочных систем (информационный аспект) / В.Ц. Закритуев // Мехатроника. – 2000. – № 4. – с.23-27.
- 17.Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода / Н. Ф. Ильинский. – М.: МЭИ. – 225 с.
- 18.Каганов, Ю.Т. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «гексапод» / Ю.Т. Каганов, А.П. Карпенко // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2009. – № 10; URL: <http://technomag.edu.ru/doc/133731.html> (дата обращения: 11.02.2015).
- 19.Каганов, Ю.Т. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «трипод» / Ю.Т. Каганов, А.П. Карпенко // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2009. – №10; URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/133262.html> (дата обращения: 06.02.2015).

- 20.Кирилловский, В.К. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его / В.К. Кирилловский. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 67 с.
- 21.Климчик, А.С. Разработка управляющих программ промышленных роботов: курс лекций / А.С. Климчик, Р.И. Гомолицкий, Ф.В. Фурман, К.И. Сёмкин. – Минск.: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2008. – 131 с.
- 22.Кобзев, А.А. Формирование главной обратной связи в системе автоюстировки на базе оптического коммутатора для многоканальных лазерных комплексов / А.А. Кобзев, Ю.С. Потанин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–2. – с. 262-266.
- 23.Линейные двигатели 1FN3 // Департамент DF&PD Siemens в России: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: http://dfpd.siemens.ru/products/motors_drives/motors/Dir_drives/1FN3/ (дата обращения: 16.03.2015).
- 24.Лурье, А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 824 с.
- 25.Магдич, Л.Н. Акустооптические устройства и их применения / Л.Н. Магдич, В.Я. Молчанов. – М.: Сов. радио, 1978. – 112 с.
- 26.Мусатов, А.К. Силовой расчёт, уравнивание, проектирование механизмов и механика манипуляторов / А.К. Мусатов. – М.: МГТУ, 1990. – 76 с.
- 27.Напартович, А.П. Справочник по лазерной технике / А.П. Напартович; пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 554 с.
- 28.ООО «Лапик» // ООО «Лапик»: офиц. сайт. Саратов, 2015. URL: <http://www.lapic.ru> (дата обращения: 17.03.2015).
- 29.Парр, Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера / Э. Парр. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 516 с.
- 30.Патент 2019013 Российская Федерация, МПК⁶ Н 01 S 3/025. Оптический передающий модуль / Беляев А.А., Дураев В.П., Сапожников С.М., Сумароков М.А., Швейкин В.И.; заявитель и патентообладатель Беляев А.А., Дураев В.П.,

- Сапожников С.М., Сумароков М.А., Швейкин В.И. – № 5059725/25; заявл. 02.06.92; опубл. 30.08.94. – 5 с.: ил.
31. Патент 2073901 Российская Федерация, МПК⁶ G 02 В 26/10. Сканирующее устройство / Бабинцев В.Ф., Кощавцев Н.Ф., Соловьева Т.Г.; заявитель и патентообладатель СКБ техники ночного видения НПО «Орион». – № 93002864/28; заявл. 15.01.93; опубл. 20.02.97. – 4 с.: ил.
32. Патент 2116179 Российская Федерация, МПК⁶ В 23 К 26. Многопостовый лазерный технологический комплекс / Забелин А.М., Сафонов А.Н.; заявитель и патентообладатель АОЗТ «ТехноЛазер». – № 97109583/02; заявл. 05.06.97; опубл. 27.07.98. – 3 с.: ил.
33. Патент 2205439 Российская Федерация, МПК⁷ G 02 В 26/08, G 02 F 1/29. Устройство для пространственного отклонения луча / Михеев Г.М., Калюжный Д.Г.; заявитель и патентообладатель Михеев Г.М., Калюжный Д.Г. – № 2001113391/28; заявл. 15.05.01; опубл. 27.05.03. – 4 с.: ил.
34. Патент 2369887 Российская Федерация, МПК⁷ G 02 В 26/10. Лазерное сканирующее устройство / Калюжный Д.Г.; заявитель и патентообладатель Институт Прикладной Механики Уральского отделения Российской Академии Наук. – № 2008109119/28; заявл. 07.03.08; опубл. 10.10.09. – 5 с.: ил.
35. Патент на полезную модель 52201 Российская Федерация, МПК⁷ G 02 В 5/06. Устройство для отклонения светового пучка / Барков В.П., Мурашев В.М., Романенко О.Н., Свиридов К.Н., Чередников О.Р.; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПО Астрофизика». – № 2005133686/22; заявл. 31.10.05; опубл. 10.03.06. – 6 с.: ил.
36. Патент на полезную модель 56076 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 S 3/03, Н 01 S 3/08. Оптический коммутатор / Барков В.П., Мурашев В.М., Мызников А.Н., Романенко О.Н., Свиридов К.Н., Чередников О.Р.; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПО Астрофизика». – № 2005139900/22; заявл. 20.12.05; опубл. 27.08.06. – 9 с.: ил.
37. Патент на полезную модель 59332 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/08. Твердотельный лазерный излучатель / Князев Д.А., Лямец Н.А.; заявитель и

- патентообладатель ФГУП «Центральное конструкторское бюро точного приборостроения». – № 2006126038/22; заявл. 17.07.06; опубл. 10.12.06. – 7 с.: ил.
38. Патент на полезную модель 62254 Российская Федерация, МПК⁷ G 02 B 7/00. Система для отклонения светового пучка / Барков В.П., Барщевский Д.В., Мурашев В.М., Романенко О.Н., Свиридов К.Н.; заявитель и патентообладатель ФГУП «НПО Астрофизика». – № 2006127078/22; заявл. 25.07.06; опубл. 27.03.07. – 5 с.: ил.
39. Патент US 20030106230 A1 США. Parallel kinematic micromanipulator, МПК B 25 J 7/00, H 01 L 41/09, B 25 J 17/02 / Hennessey С.; заявитель и патентообладатель Hennessey С. – № US 10/014,956; заявл. 10.12.01; опубл. 12.06.01. – 12 с.: ил.
40. Патент US 20070284502 A1 США. Hexapod kinematic mountings for optical elements, and optical systems comprising same, МПК A 47 G 1/24 / Yi-Ping Hsin, Hideyuki Hashimoto, Jin Nishikawa, Scott Coakley, Kunitomo Fukai, Wen-Hou Ma, Bausan Yuan; заявитель и патентообладатель Nikon Corporation. – № US 11/644,467; заявл. 21.12.06; опубл. 13.12.07. – 20 с.: ил.
41. Патент US 20130182344 A1 США. Systems for aligning an optical element and method for same, МПК G 02 B 5/08 / Boaz Pnini-Mittler; заявитель и патентообладатель Carl Zeiss Smt Gmbh. – № US 13/788,147; заявл. 7.03.13; опубл. 18.07.13. – 30 с.: ил.
42. Патент US 5585707 A США. Tendon suspended platform robot, МПК B 25 J 1/00, B 25 J 5/00, B 25 J 9/10, B 25 J 17/02 / C.J. Thompson, P.D. Campbell; заявитель и патентообладатель Mcdonnell Douglas Corporation. – № US 08/204,023; заявл. 28.02.94; опубл. 17.12.96. – 10 с.: ил.
43. Патент US 8179621 B2 США. Apparatus for manipulation of an optical element, МПК G 02 B 7/02, G 03 F 7/20, G 02 B 7/182 / Muehlbeyer M., Lippert J.; заявитель и патентообладатель Carl Zeiss Smt Gmbh. – № US 12/716,357; заявл. 3.03.10; опубл. 15.05.12. – 18 с.: ил.

- 44.Переносной компьютер iROBO-4000-90i6R // Компания IPC2U: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: <http://ipc2u.ru/catalog/irobo-4000-90i6r.html> (дата обращения: 14.02.2015).
- 45.Письменный, Д.Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс / Д.Т. Письменный. – 9-е изд. – М.: Айрис-пресс, 2009. – 608 с.
- 46.Подураев Ю.В. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем / Ю.В. Подураев, В.С. Кулешов // Мехатроника. – 2000. – №1. – с.5-10.
- 47.Подураев, Ю.В. Основы мехатроники: учебное пособие / Ю.В. Подураев. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2000. – 80 с.
- 48.Потанин, Ю.С. Испытания оптического коммутатора на базе привода с параллельной кинематикой / Ю.С. Потанин, А.А. Кобзев, А.Г. Сенюшкин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. URL: www.science-education.ru/120-17088 (дата обращения: 25.02.2015).
- 49.Потанин, Ю.С. Математический алгоритм работы оптического коммутатора многоканальных лазерных систем / Ю.С. Потанин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. URL: www.science-education.ru/117-13641 (дата обращения: 25.02.2015).
- 50.Потапов, В.А. Возможен ли успех станков новой концепции? / В.А. Потапов // СТИН. – 1996. – № 4. – с. 40-45.
- 51.Потапов, В. А. Прецизионное оборудование нового поколения / В.А. Потапов // СТИН. – 1999. – № 1. – с. 28-32.
- 52.Преобразователи Sinamics // Департамент DF&PD Siemens в России: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: http://dfpd.siemens.ru/products/motors_drives/converters/ (дата обращения: 14.03.2015).
- 53.Продукция – Лазерные модули // ЗАО «Кантегир»: офиц. сайт. Саратов, 2015. URL: http://www.kantegir.com/ru/product/laser_module/ (дата обращения: 27.02.2015).
- 54.Родионов, С.А. Основы оптики: конспект лекций / С.А. Родионов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2000. – 167 с.

55. Система проектирования Sinamics Micromaster Sizer // Департамент DF&PD Siemens в России: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: http://dfpd.siemens.ru/products/motors_drives/tools/Sizer/ (дата обращения: 26.02.2015).
56. Система управления перемещением Simotion // Департамент DF&PD Siemens в России: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: http://dfpd.siemens.ru/products/motors_drives/simotion/ (дата обращения: 14.03.2015).
57. Скоростная камера Fastvideo-500E стандарта PCI-Express // ООО «НПО Астек»: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: <http://www.fastvideo.ru/products/vga/fv500e.htm> (дата обращения: 14.03.2015).
58. Скороходов, Е. А. Общетехнический справочник / Е. А. Скороходов. – М.: Машиностроение, 1982. – 416 с.
59. Сравнительная таблица лазерных систем маркировки // ООО «Миксис»: офиц. сайт. Москва, 2015. URL: http://www.micsys.ru/laser_choice.php (дата обращения: 10.02.2015).
60. Фу, К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
61. Хольшев, И.Г. Проектирование структуры станков типа «гексапод»: автореф. дис. Канд. тех. Наук. – М.: 2001. – 28 с.
62. Шалобаев Е.В. Теоретические и практические проблемы развития мехатроники / Е.В. Шалобаев // Современные технологии. – 2001. – с.46-67.
63. Щепетильников, В.А. Уравновешивание механизмов / В.А. Щепетильников. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.
64. Юревич, Е.И. Управление роботами и робототехническими системами / Е.И. Юревич. – СПб.: СПбГТУ, 2000. – 171 с.
65. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – 8-е изд., перераб. и испр. – М.: ООО «Издательство Оникс», 2006. – 1056 с.

- 66.ABB IRB Packaging Robots // RobotWorx: a Scott Technology Ltd. Company: офиц. сайт. 2015. URL: <http://www.robots.com/abb/series/irb-packaging> (дата обращения: 21.12.2014).
- 67.Berner, P. Orientation, Rotation, Velocity and Acceleration, and the SRM / P. Berner // Technical Concepts, SEDRIS. – 2008. – pp. 33-34.
- 68.Brandt, G. A compact robot for image guided orthopedic surgery / G. Brandt // In First Joint Conf. of Computer Vision, Virtual Reality and Robotics (CRVMED) II and Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (MRCAS) III in Grenoble, March, 19-22. – 1997. – p.126.
- 69.Flinders University in Adelaide // Flinders University: офиц. сайт. 2014 URL: <http://www.flinders.edu.au/> (дата обращения: 02.02.2015).
- 70.Gough, V.E. Universal tire test machine / V.E. Gough, S.G. Whitehall // In Proceedings 9th Int. Technical Congress F.I.S.I.T.A. – 1962. – V.117. – pp. 117-135.
- 71.Huang, Z. Some Novel Minor-Mobility Parallel Mechanisms / Z. Huang, Q.C. Li // Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics: Proceedings of the 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. – 2002. – pp. 895–905.
- 72.Koeevermans, W.P. Design and performance of the four d.o.f. motion system of the NLR research flight simulator / W.P. Koeevermans // In AGARD Conf. Proc. No 198, Flight Simulation. – 1975. – pp. 1-11.
- 73.Merlet, J.P. Parallel Robots. Solid mechanics and its applications / J. P. Merlet. – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 394 p.
- 74.Neugebauer, R. Interaction between machine-tool and process: modelling, simulation of miling operations on hexapod 6X Hexa / R. Neugebauer // In 2nd NCG Application Conf. on Parallel Kinematics Machine, Chemnitz, 23-25 Avril. – 2002. – pp 833-841.
- 75.Neugebauer, R. Structure Optimization of Machine Tools with Parallel Kinematics / R. Neugebauer, F. Weidemann // Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics: Proceedings of the 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. – 2002. – pp. 105–118.

76. Nguyen, C.C. Adaptive control of a Stewart platformbased manipulator / Nguyen C.C. // J. of Robotic Systems. – 1993. – № 10. – pp. 657-687.
77. Our solutions: The SURGISCOPE // ISIS-robotics: офиц. сайт. 2015. URL: <http://www.isis-robotics.com/en/surgiscope-solution.html> (дата обращения: 03.02.2015).
78. S-334 Piezo Tip Mirror // Physik Instrumente GmbH & Co: офиц. сайт. 2015. URL: <http://www.physikinstrumente.com/product-detail-page/s-334-300710.html> (дата обращения: 16.03.2015).
79. Standa products // Standa ltd: офиц. сайт. Вильнюс, 2015. URL: <http://www.standa.lt/products/catalog> (дата обращения: 16.03.2015).
80. Stewart, D. A platform with six degrees of freedom / D. Stewart // Proceedings of the Institution of mechanical engineers. – 1965. – V.180, pt.1, №15. – pp. 371-385.
81. Tour vertical V100 // INDEX Corporation: офиц. сайт. 2015. URL: http://www.index-werke.de/if/franzoesisch/546_fra_html.htm (дата обращения: 02.02.2015).
82. Wendlandt, J.M. Design and control of a simplified Stewart platform for endoscopy / J.M. Wendlandt, S. S. Sastry // In 33rd Conf. on Decision and Control in Lake Buena Vista, December, 14-16. – 1994. – pp.357–362.
83. What we can learn from elephants // Fraunhofer-Gesellschaft: офиц. сайт. 2015 URL: <http://www.archiv.fraunhofer.de/archiv/pi-en-2004-2008/EN/press/pi/2007/07/Mediendienst72007Thema6.html> (дата обращения: 02.02.2015).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Исходный текст программы PreLoad.m

```

format long          %установка формата отображения чисел в командной
строке

X_plat=0;            %начальная координата X верхней платформы
Y_plat=0;            %начальная координата Y верхней платформы

Between_plat=353.93;    %расстояние меж платформами
Upper_universal=12;    %высота установки верхнего кардана
Lower_universal=12;    %высота установки нижнего кардана
Z_plat=Between_plat-Upper_universal-Lower_universal;    %начальная
координата Z верхней платформы (реальная высота)

r_base=255;          %радиус окружности шарниров станины
r_plat=140;          %радиус окружности шарниров платформы

a_base=12.6/180*pi;    %угол между соседними шарнирами нижней
платформы в радианах
a_plat=13.95/180*pi;    %угол между соседними шарнирами верхней
платформы в радианах

for i=1:3,

    A(:,2*i-1)=[r_base*cos((i-1)*(2*pi/3)-a_base/2);    r_base*sin((i-1)*(2*pi/3)-
a_base/2); 0];    %вычисление координат 1,3,5 шарниров станины
    A(:,2*i)=[r_base*cos((i-1)*(2*pi/3)+a_base/2);    r_base*sin((i-
1)*(2*pi/3)+a_base/2); 0];    %вычисление координат 2,4,6 шарниров станины

    B(:,2*i-1)=[r_plat*cos((i-1)*(2*pi/3)-a_plat/2+pi/3); r_plat*sin((i-1)*(2*pi/3)-
a_plat/2+pi/3); Z_plat];    %вычисление координат 1,3,5 шарниров платформы
    B(:,2*i)=[r_plat*cos((i-1)*(2*pi/3)+a_plat/2+pi/3);    r_plat*sin((i-
1)*(2*pi/3)+a_plat/2+pi/3); Z_plat];    %вычисление координат 2,4,6 шарниров
платформы

end

%на данный момент порядок карданов не соответствует схеме, так как
%полученный первый шарнир занимает реальную позицию B2. Для этого
переставим
%полученный шестой на первое место, полученный первый на второе место
и
%т.д.

```

$B=[B(:,6),B(:,1:5)];$ %установка шарниров платформы так, чтобы первый шарнир платформы соединялся с первым шарниром станины

$leg_vector=B-A;$ %штанги гексапода в векторном представлении
(векторы штанг)

$l=leg_vector.^2;$ %поэлементное возведение в квадрат матрицы leg_vector для дальнейшего вычисления длин штанг

for i=1:6,

$leg_length(i)=sqrt(l(1,i)+l(2,i)+l(3,i));$ %вычисление длин штанг
 $leg_norm(:,i)=leg_vector(:,i)/leg_length(i);$ %единичные вектора,
коллинеарные векторам штанг (единичные вектора штанг, нормированные вектора штанг)

end

for i=1:6,

$rev1(:,i) = cross(leg_norm(:,i), [1;0;0])/norm(cross(leg_norm(:,i), [1;0;0]));$
%1-я ось вращения нижнего шарнира, найденная как векторное произведение единичного вектора штанги на орт оси X (и деленная на длину полученного вектора для получения единичного вектора)

$rev2(:,i) = (- cross(rev1(:,i), leg_norm(:,i)))/norm(- cross(rev1(:,i), leg_norm(:,i)));$ %2-я ось вращения нижнего шарнира, найденная как векторное произведение вектора 1-й оси и единичного вектора штанги (взято со знаком минус для получения правой системы координат: X - 1-я ось, Y - 2-я ось, Z - единичный вектор штанги)

$prism1(:,i) = leg_norm(:,i);$ %ось линейного линейных перемещений штанги

$rev3(:,i) = rev1(:,i);$ %1-я ось вращения верхнего шарнира,
параллельная 1-й оси нижнего шарнира

$rev4(:,i) = rev2(:,i);$ %2-я ось вращения верхнего шарнира,
параллельная 2-й оси нижнего шарнира

end

for i = 1:6,

base_leg_cg(:,i)= A(:,i) + (2/8)*leg_vector(:,i); %центр тяжести нижней
полуштанги (привод+винт ШВП)

base_leg_end(:,i)= A(:,i) + (4/8)*leg_vector(:,i); %конец нижней
полуштанги (её верхняя точка - самая нижняя позиция нижнего среза гайки)

plat_leg_cg(:,i)= B(:,i) - (1/8)*leg_vector(:,i); %центр тяжести верхней
полуштанги (привод+винт ШВП)

plat_leg_end(:,i)= B(:,i) - (2/8)*leg_vector(:,i); %конец верхней
полуштанги (её нижняя точка - нижний срез гайки)

end

base_leg_sys_1 = [rev1(:,1), rev2(:,1), prism1(:,1)]; %система координат
точек нижней 1-й штанги

plat_leg_sys_1= [rev1(:,1), rev2(:,1), prism1(:,1)]; %система координат
точек верхней 1-й штанги

base_leg_sys_2 = [rev1(:,2), rev2(:,2), prism1(:,2)]; %система координат
точек нижней 2-й штанги

plat_leg_sys_2= [rev1(:,2), rev2(:,2), prism1(:,2)]; %система координат
точек верхней 2-й штанги

base_leg_sys_3 = [rev1(:,3), rev2(:,3), prism1(:,3)]; %система координат
точек нижней 3-й штанги

plat_leg_sys_3= [rev1(:,3), rev2(:,3), prism1(:,3)]; %система координат
точек верхней 3-й штанги

base_leg_sys_4 = [rev1(:,4), rev2(:,4), prism1(:,4)]; %система координат
точек нижней 4-й штанги

plat_leg_sys_4= [rev1(:,4), rev2(:,4), prism1(:,4)]; %система координат
точек верхней 4-й штанги

base_leg_sys_5 = [rev1(:,5), rev2(:,5), prism1(:,5)]; %система координат
точек нижней 5-й штанги

plat_leg_sys_5= [rev1(:,5), rev2(:,5), prism1(:,5)]; %система координат
точек верхней 5-й штанги

base_leg_sys_6 = [rev1(:,6), rev2(:,6), prism1(:,6)]; %система координат
точек нижней 6-й штанги

plat_leg_sys_6= [rev1(:,6), rev2(:,6), prism1(:,6)]; %система координат
точек верхней 6-й штанги

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Исходный текст программы AutoAlign.m

```

format long
clc;
%START VALUES-----
a = -2.994;          %grad

A_H = (360/(2*pi))*0.00086526;    %grad
A_V = (360/(2*pi))*0.00011450;    %grad

Lmp = 2700;          %mm
Lpt = 4290;          %mm

%RECOUNT-----
a = 2*pi *a/360;
A_H = 2*pi *A_H/360;
A_V = 2*pi *A_V/360;

%MAIN-----
tx = 0;   %T target point
ty = 0;
tz = Lpt;
% tx
% ty
% tz

mx = Lmp * cos (a);    %M module point
my = -Lmp * sin (a);
mz = 0;
% mx
% my
% mz

t=(-mx + tan(a - A_H)*my - tan(A_V)*mz + tan(A_V)*Lpt)/(1 + tan(a -
A_H)*tan(a - A_H) + tan(A_V)*tan(A_V));    %t time moment of crossing of two
lines (MP and PT)
% t

px = mx + t;          %P PRISM point
py = my - tan(a - A_H) * t;
pz = mz + tan(A_V) * t;
% px

```

```

% py
% pz

Nx=0;    %vector N - vertical vector
Ny=0;
Nz=1;
% Nx
% Ny
% Nz

PTx = tx - px;    %vector PT
PTy = ty - py;
PTz = tz - pz;
PTx;
PTy;
PTz;

b=acos((Nx*PTx + Ny*PTy + Nz*PTz)/(sqrt(Nx*Nx + Ny*Ny + Nz*Nz)*sqrt(PTx*PTx + PTy*PTy + PTz*PTz)));    %b-angle of turning platform
trought vector PR
% bg = 360*b/(2*pi) %recount to grad

PRx = Ny*PTz - Nz*PTy;    %PR - vector of rotation N to PT (received as
vector multiplication of N and PT)
PRy = Nz*PTx - Nx*PTz;
PRz = Nx*PTy - Ny*PTx;

PRl=sqrt(PRx*PRx + PRy*PRy + PRz*PRz);
if PRl~=0
    PRx = PRx / PRl;
    PRy = PRy / PRl;
    PRz = PRz / PRl;
end
% PRx
% PRy
% PRz

OMx = mx;    %OM - start vector of "enter edge" of prism
OMy = my;
OMz = mz;
OM=[OMx;OMy;OMz];
% OMx
% OMy
% OMz

```

```

m11= cos(b)+(1-cos(b))*PRx*PRx;          m12=(1-cos(b))*PRx*PRy-
sin(b)*PRz;    m13=(1-cos(b))*PRx*PRz+sin(b)*PRy;

```

```

m21= (1-cos(b))*PRy*PRx+sin(b)*PRz;          m22= cos(b)+(1-
cos(b))*PRy*PRy;    m23=(1-cos(b))*PRy*PRz-sin(b)*PRx;

```

```

m31= (1-cos(b))*PRz*PRx-sin(b)*PRy;          m32=(1-
cos(b))*PRz*PRy+sin(b)*PRx;    m33=cos(b)+(1-cos(b))*PRz*PRz;

```

```

m=[m11 m12 m13;m21 m22 m23;m31 m32 m33];    %m - matrix or rotation
around PR on angle b

```

```

%Gexapod's leg's coordinates

```

```

OM1=m*OM;    %OM1 - vector received from rounding vector OM on angle
b around vector PR

```

```

%OM1

```

```

PM=[mx-px; my-py; mz-pz];    %PM - vector connecting module and
platform

```

```

g=acos((PM(1)*OM1(1)          +          PM(2)*OM1(2)          +
PM(3)*OM1(3))/(sqrt(PM(1)*PM(1)          +          PM(2)*PM(2)          +
PM(3)*PM(3))*sqrt(OM1(1)*OM1(1) + OM1(2)*OM1(2) + OM1(3)*OM1(3))));

```

```

%g - angle of turning prism trough vector PG

```

```

gg = 360*g/(2*pi) %recount to grad

```

```

PGx = OM1(2)*PM(3) - OM1(3)*PM(2);    %PG - vector of rotation OM1 to
PM (received as vector multiplication of OM1 and PM)

```

```

PGy = OM1(3)*PM(1) - OM1(1)*PM(3);

```

```

PGz = OM1(1)*PM(2) - OM1(2)*PM(1);

```

```

qqq=((PGx*PTx + PGy*PTy + PGz*PTz)/(sqrt(PGx*PGx + PGy*PGy +
PGz*PGz))*sqrt(PTx*PTx + PTy*PTy + PTz*PTz));    %qqq - cosinus of angle
between vectors PT and PG

```

```

if qqq>0

```

```

    gg=-1*abs(gg);

```

```

end

```

```

if qqq<0

```

```

    gg=abs(gg);

```

```

end

```

```

gg

```

```

%PREDRAW-----

```



```

clf;
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('z');
view([150 32]);
hold on;
set(0,'DefaultAxesFontSize',14,'DefaultAxesFontName','Times New Roman');
grid on;
axis on;

plot3([4000 -1000],[0 0],[0 0],'blue');
plot3([0 0],[2500 -2500],[0 0],'blue');
plot3([0 0],[0 0],[0 4500],'blue');

text(3900,-100,0,'x');
text(-100,1900,0,'y');
text(-100,0,3900,'z');

%DRAW-----
%plot3(mx,my,mz,'red');
%plot3(mx + t_line, my - tan(a-A_H)*t_line, mz + tan(A_V)*t_line,px +
px*l_line, py + py*l_line, pz+(pz-Lpt)*l_line);

plot3([mx px],[my py],[mz pz],'red');    %vector PM
plot3([tx px],[ty py],[tz pz],'red');    %vector PT
plot3([px px],[py py],[pz pz+2000],'blue');    %vector n (vertical)

plot3([px px+PRx*1000],[py py+PRy*1000],[pz pz+PRz*1000],'green');

```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Программа пользователя контроллера системы приводов

MCC_test_main.mcc

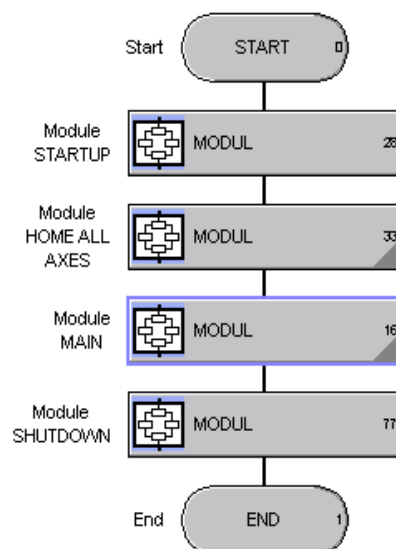


Рисунок В.1 – Программа пользователя контроллера

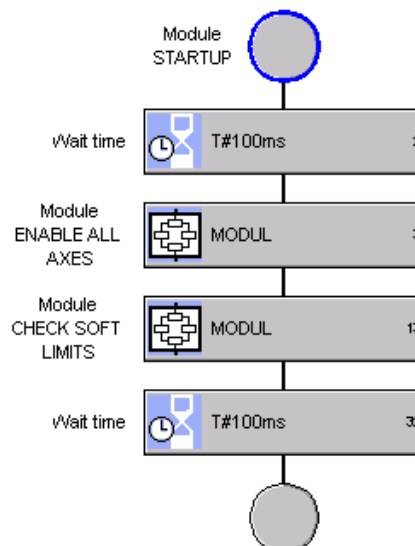


Рисунок В.2 – Модуль Module Startup

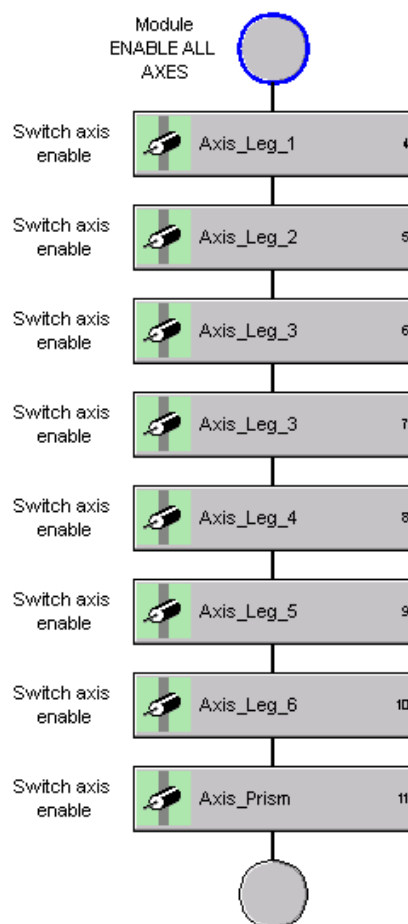


Рисунок В.3 – Модуль Module Enable all axes

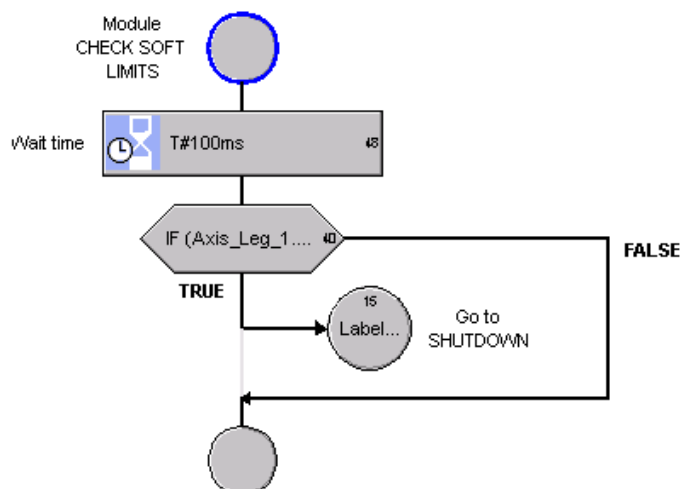


Рисунок В.4 – Модуль Module Check soft limits

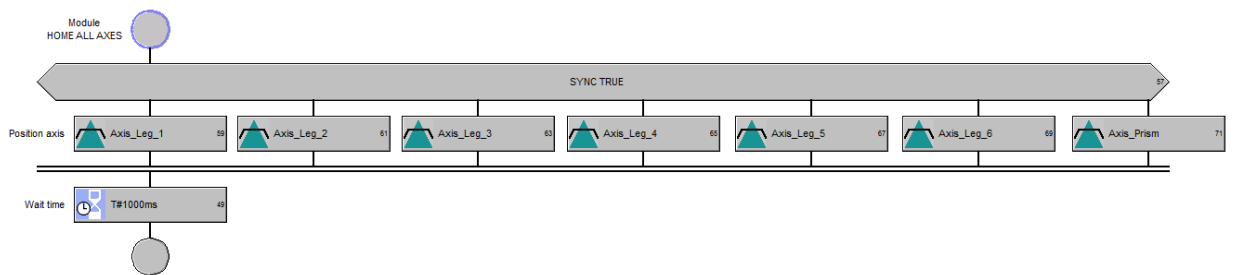


Рисунок В.5 – Модуль Module Home all axes

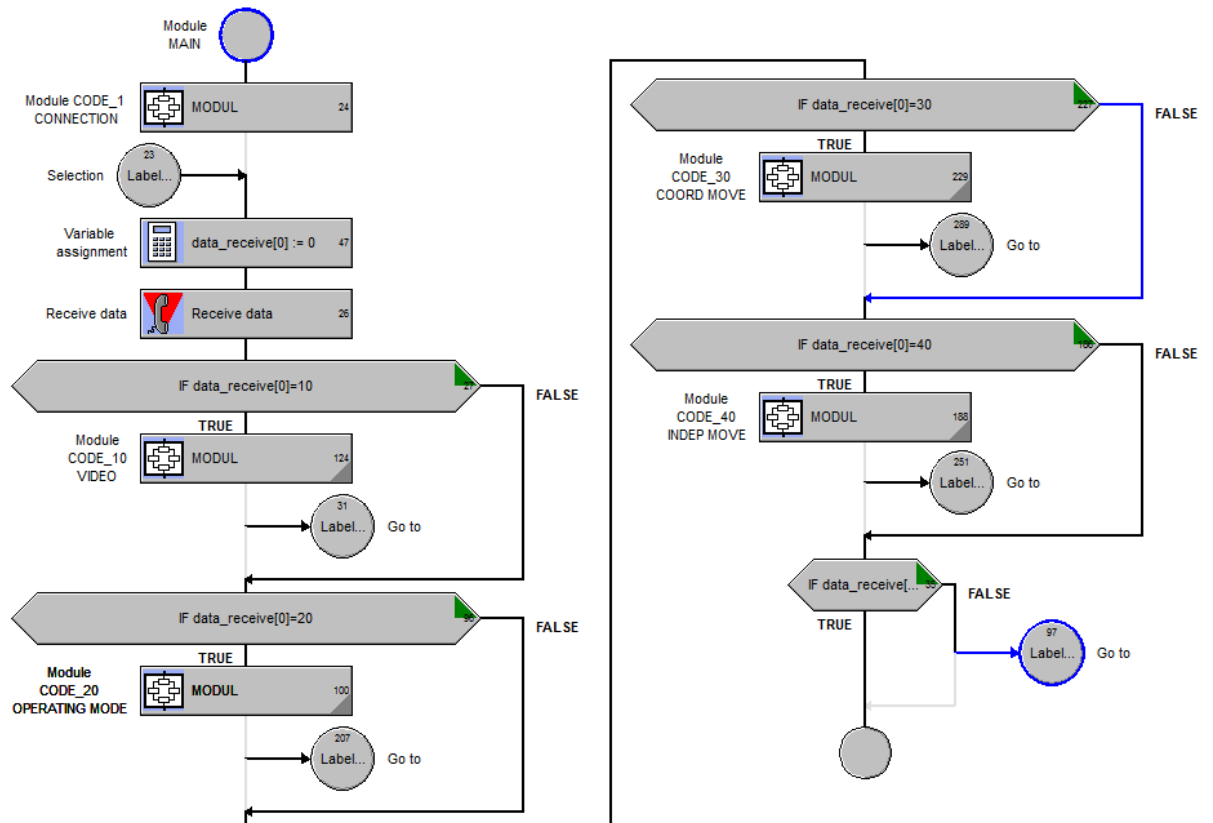


Рисунок В.6 – Модуль Module Main

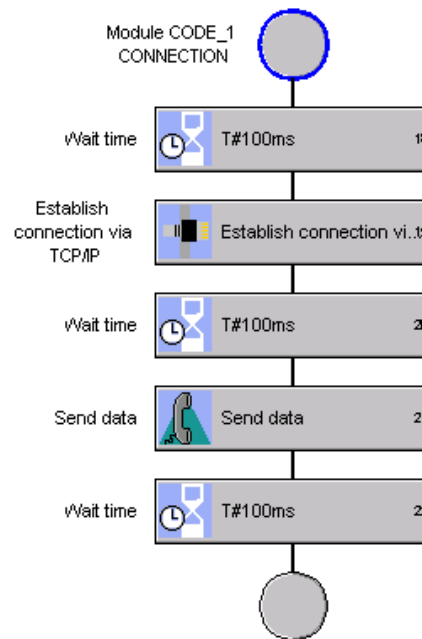


Рисунок В.7 – Модуль Module Code_1 Connection

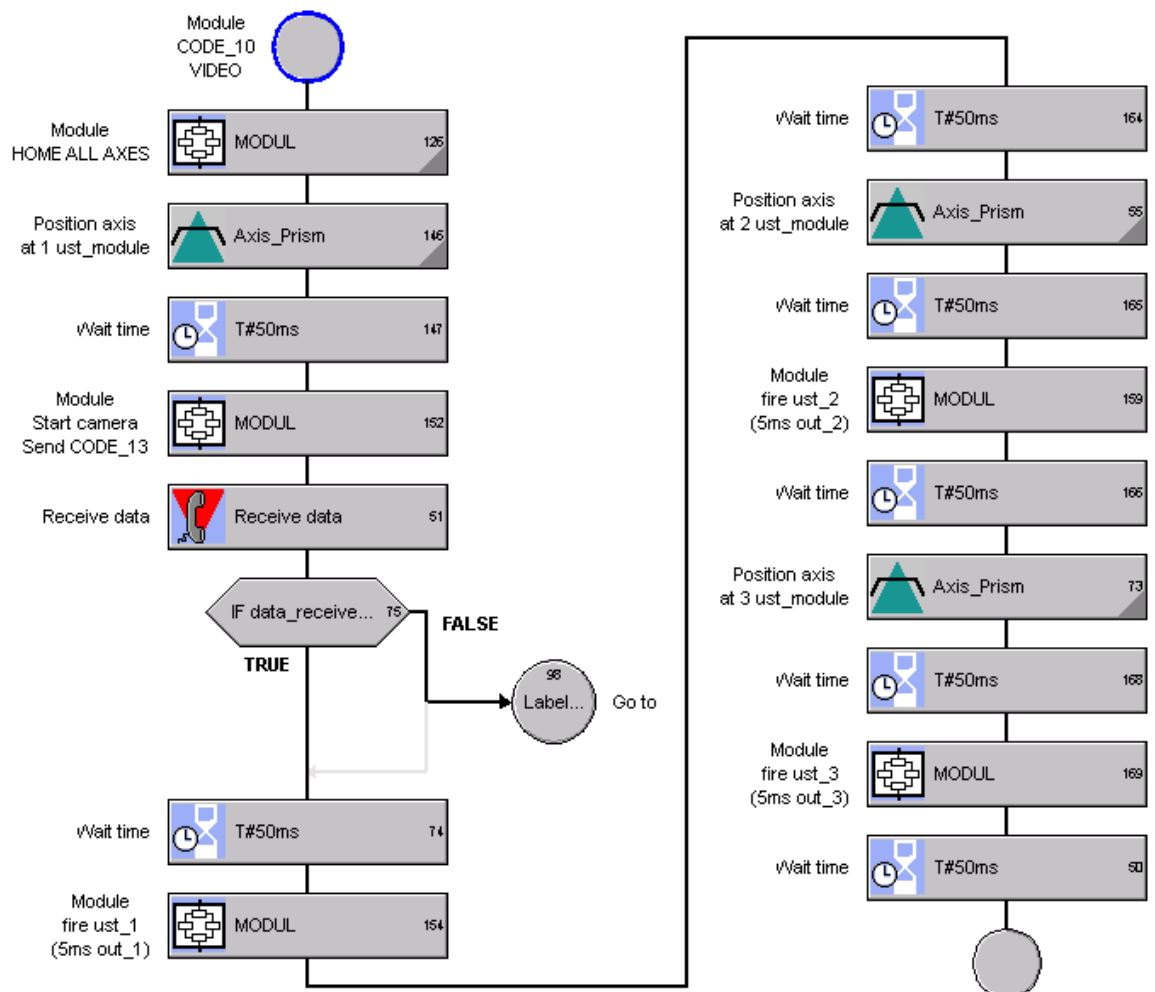


Рисунок В.8 – Модуль Module Code_10 Video

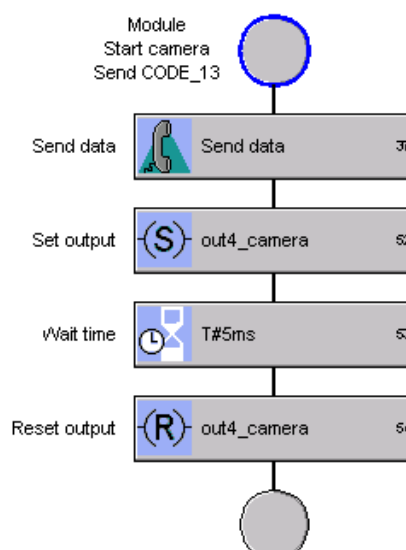


Рисунок В.9 – Модуль Module Start camera send code_13

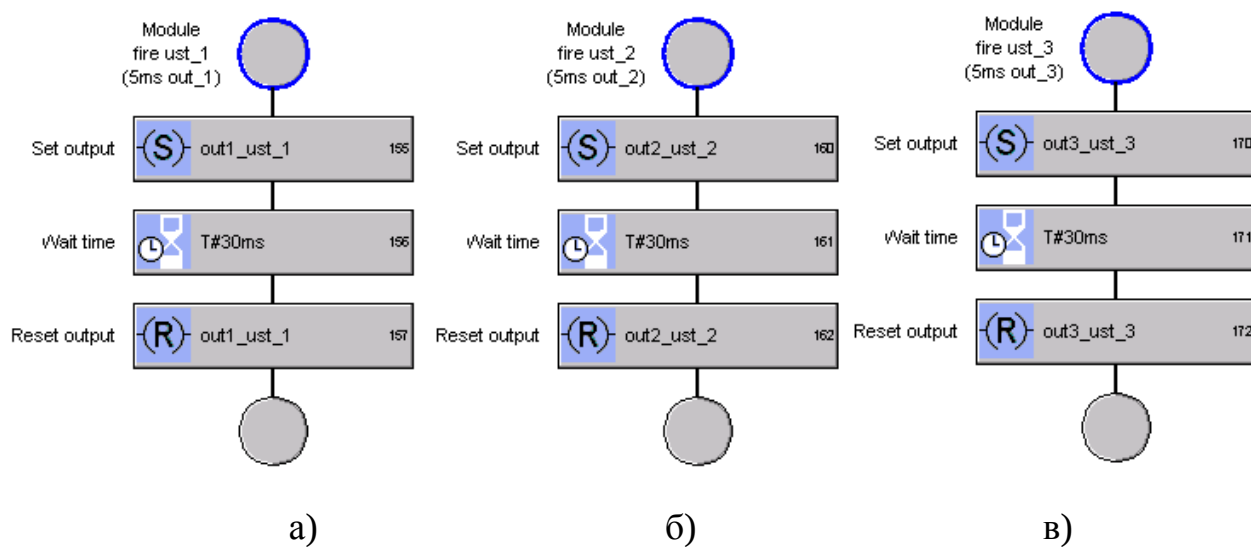


Рисунок В.10 – Модули Module fire ust:

а – Модуль Module fire ust_1 (5ms out_1);

б – Модуль Module fire ust_2 (5ms out_2);

в – Модуль Module fire ust_3 (5ms out_3)

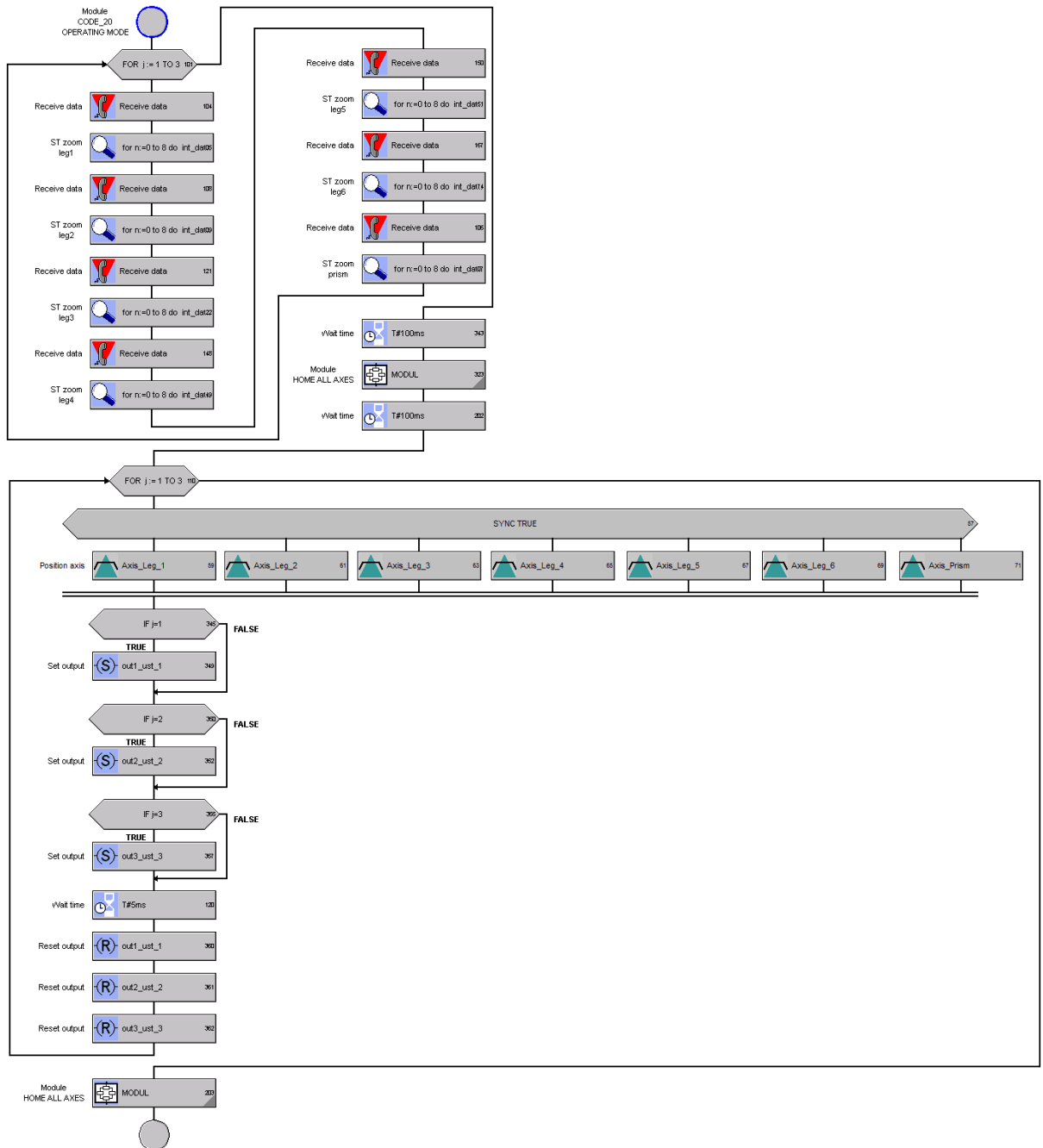


Рисунок В.11 – Модуль Module Code_20 Operating mode

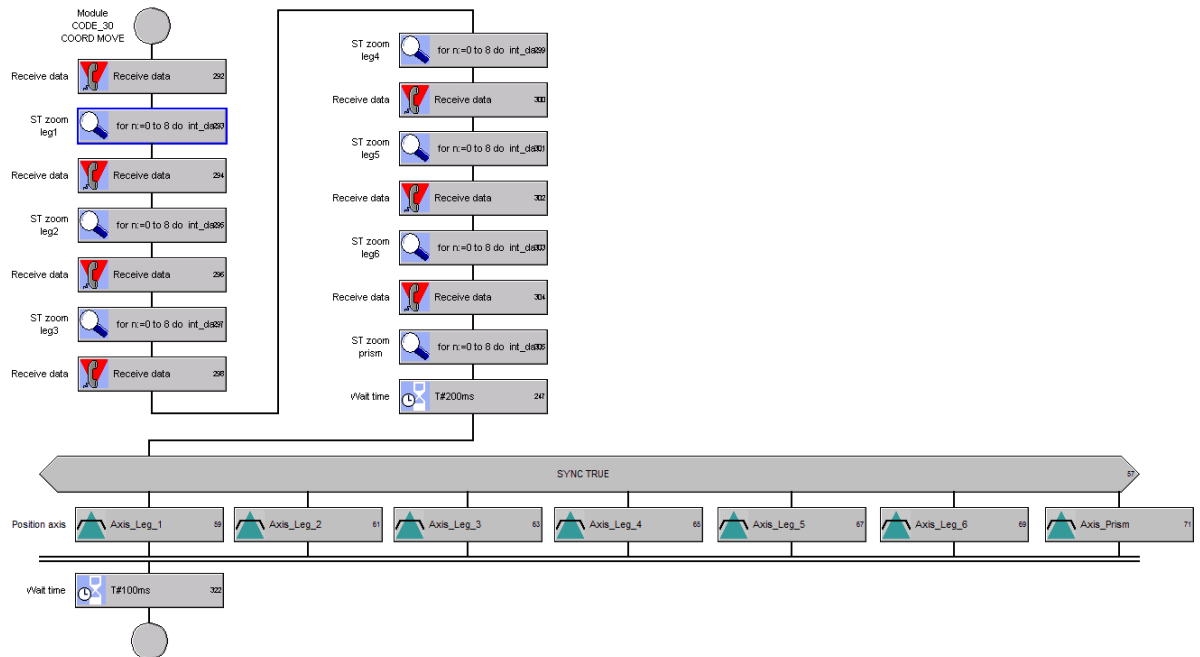


Рисунок В.12 – Модуль Module Code_30 Coord move

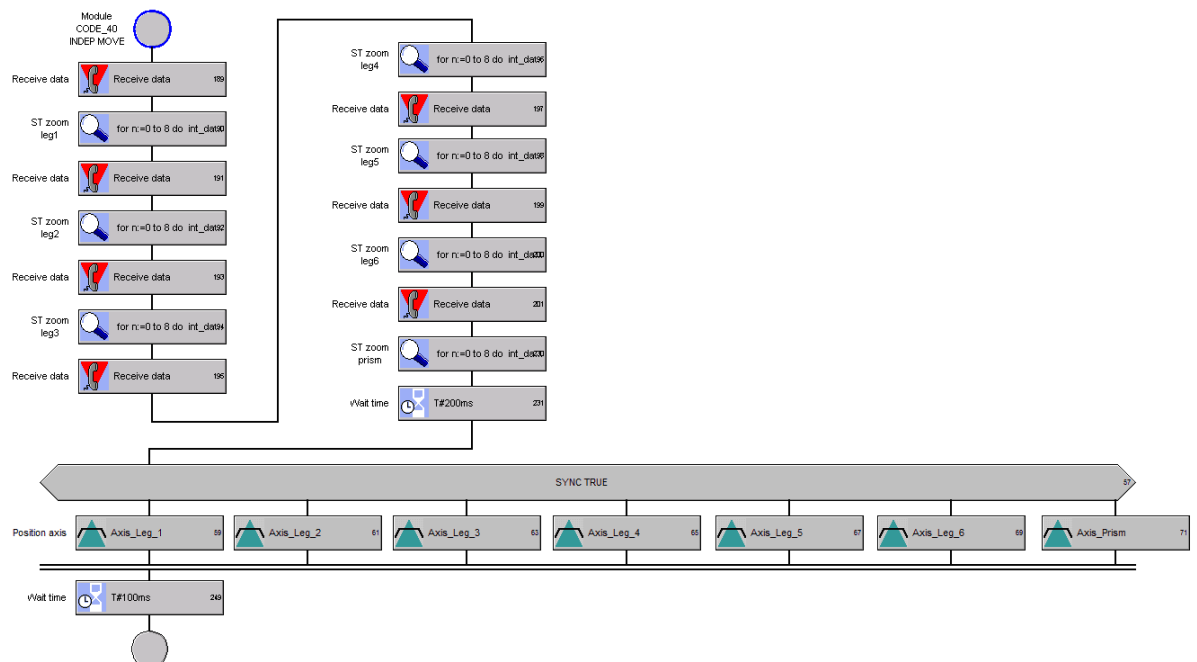


Рисунок В.13 – Модуль Module Code_40 Indep move

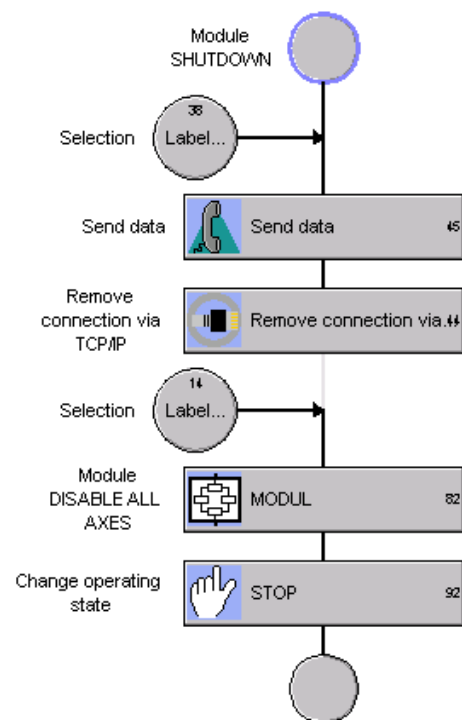


Рисунок В.14 – Модуль Module Shutdown

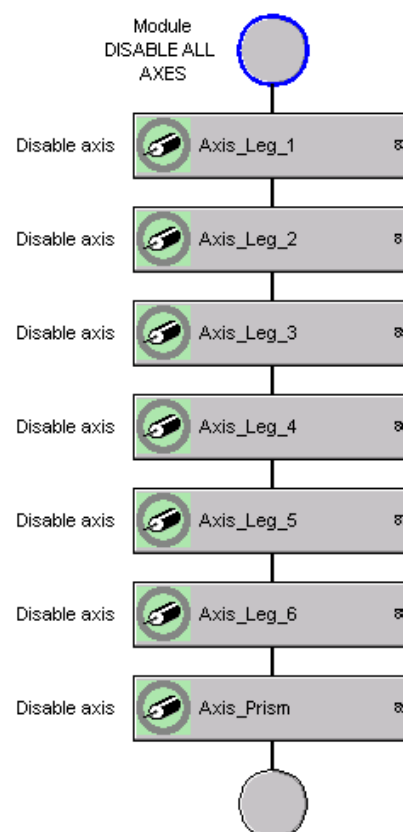


Рисунок В.15 – Модуль Module Disable all axes

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Методика испытаний оптического коммутатора

Объектом испытаний является оптический коммутатор на базе привода с параллельной кинематикой, установленный на экспериментальном стенде.

Целью экспериментальных исследований оптического коммутатора было доказательство его работоспособности и возможности достижения заявленных технических параметров. Определения измеряемых параметров приведены ниже:

- частота коммутации – физическая величина, являющаяся обратной по отношению к сумме времени позиционирования призмы и времени её стояния. Имеет размерность Гц (герц);

- компенсируемая разъюстировка – физическая величина, характеризующая угловое отклонение оптической оси, которое компенсируется оптическим коммутатором. Имеет размерность рад (радианы);

- погрешность угловой юстировки - физическая величина, характеризующая максимальное угловое отклонение съюстированной коммутатором оси в ряде экспериментов. Имеет размерность рад (радианы).

Кроме того, в процессе испытаний фиксируются следующие параметры электроприводов: положение, скорость и ускорение.

Испытания на соответствие параметров установленным величинам основано на прямом и косвенном методе измерений. Для положения привода, при котором координата считывается фотоэлектрическим датчиком положения, имеет место прямой метод. Для скорости, ускорения и рывка привода, при котором координата считывается фотоэлектрическим датчиком положения и дифференцируется по времени контроллером, имеет место косвенный метод. Для измерения линейного и углового отклонения оптической оси используется косвенный метод, являющий собой расчеты на основе положения световых пятен на диффузном экране. Оцениваемые характеристики приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Параметры коммутатора, оцениваемые в порядке испытаний

Параметр	Обозначение и единица измерения	Диапазон изменения параметра	Допускаемая погрешность
Частота коммутации	ν , Гц	От 1 до 100	± 1
Компенсируемая разъюстировка	A , угл.мин	От 0 до 5	$\pm 0,1$
Погрешность угловой юстировки	ΔA , рад	От 0 до 10^{-3}	$\pm 10^{-4}$
Положение электропривода линейное (угловое)	x (α), мм (угл.град)	От -10^6 до 10^6	$\pm 0,001$
Скорость электропривода линейная (угловая)	V (ω), мм/с (угл.град/с)	От -10^6 до 10^6	± 1
Ускорение электропривода линейное (угловое)	a (ϵ), мм/с ² (угл.град/с ²)	От -10^6 до 10^6	± 1

Частота коммутации определяется по формуле (Г.1):

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad (\text{Г.1})$$

где T – период следования импульсов излучения, регистрируемых фотодиодом ФД-7К и осциллографом Rigol DS1204B.

Пример осциллограммы дан на рисунке Г.1.

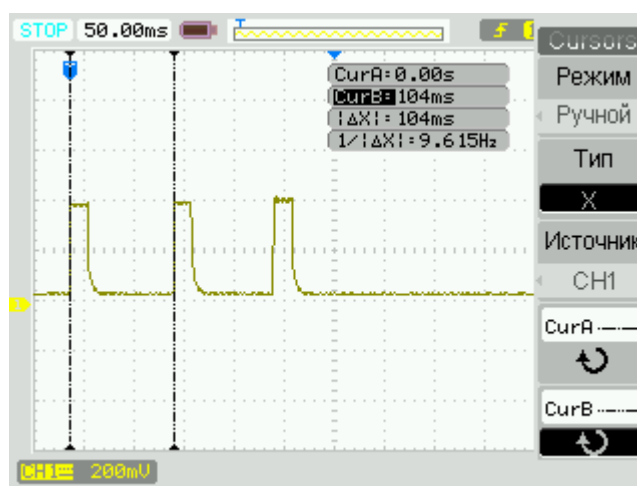


Рисунок Г.1 – Осциллограмма импульсов излучения, регистрируемых фотодиодом

Период следования импульсов, как и частота могут быть вычислены посредством встроенных функций осциллографа – «курсоров», при расположении которых на передних фронтах импульсов, происходит автоматическое вычисление частоты и периода.

Компенсируемая разъюстировка включает в себя горизонтальную (A_H) и вертикальную (A_V) составляющие, определяемые программой Komm.exe на этапе анализа видеозаписей скоростной камеры и отображаемая на вкладке «Видеоанализ».

Характерный вид кадра IP-камеры со световым пятном до юстировки показан на рисунке Г.2.

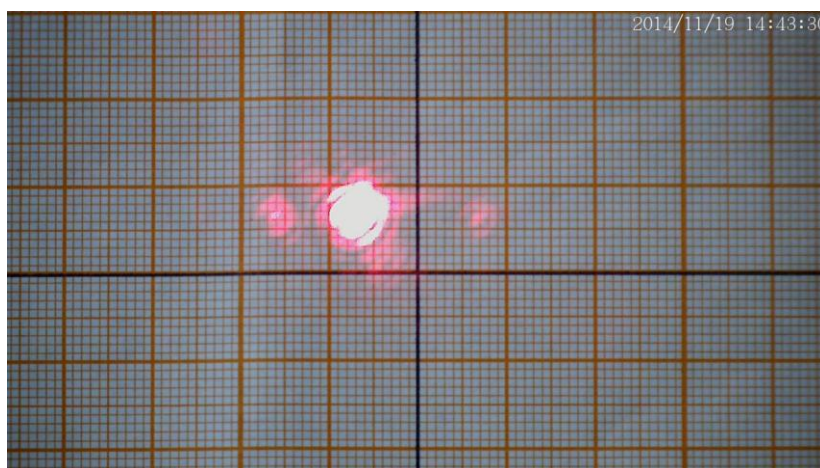


Рисунок Г.2 – Видеокадр со световым пятном на диффузном экране до юстировки

Погрешность угловой юстировки включает в себя горизонтальную (ΔA_x) и вертикальную (ΔA_y) составляющую и определяется по системе (Г.2):

$$\begin{cases} \Delta A_x = \arctan \frac{y_a}{L}; \\ \Delta A_y = \arctan \left(-\frac{x_a}{L} \right), \end{cases} \quad (\text{Г.2})$$

где y_a и x_a – соответственно вертикальное и горизонтальное отклонение светового пятна от центра диффузного экрана после юстировки оси;

L – расстояние от излучателя до диффузного экрана.

Отклонения пятна после юстировки определяется по соответствующему кадру видеозаписи, сделанной IP-камерой. Определение отклонения осуществляется по миллиметровой бумаге диффузного экрана. Видеокадр IP-камеры со световым пятном на диффузном экране показан на рисунке Г.3.

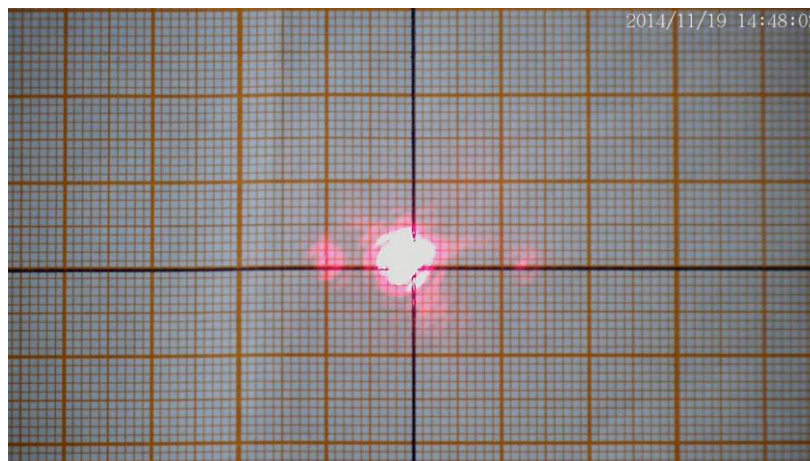


Рисунок Г.3 – Видеокадр со световым пятном на экране после юстировки

Параметры приводов определяются по осциллограмме внутреннего программного осциллографа Simotion System Trace, встроенного в инженеринговый пакет Simotion Scout. Измерение осуществляется при помощи измерительных курсоров. Например, характерная осциллограмма скорости привода штанги гексапода, а также измерительные курсоры, установленные в позиции двух первых максимумов скорости, показаны на рисунке Г.4.

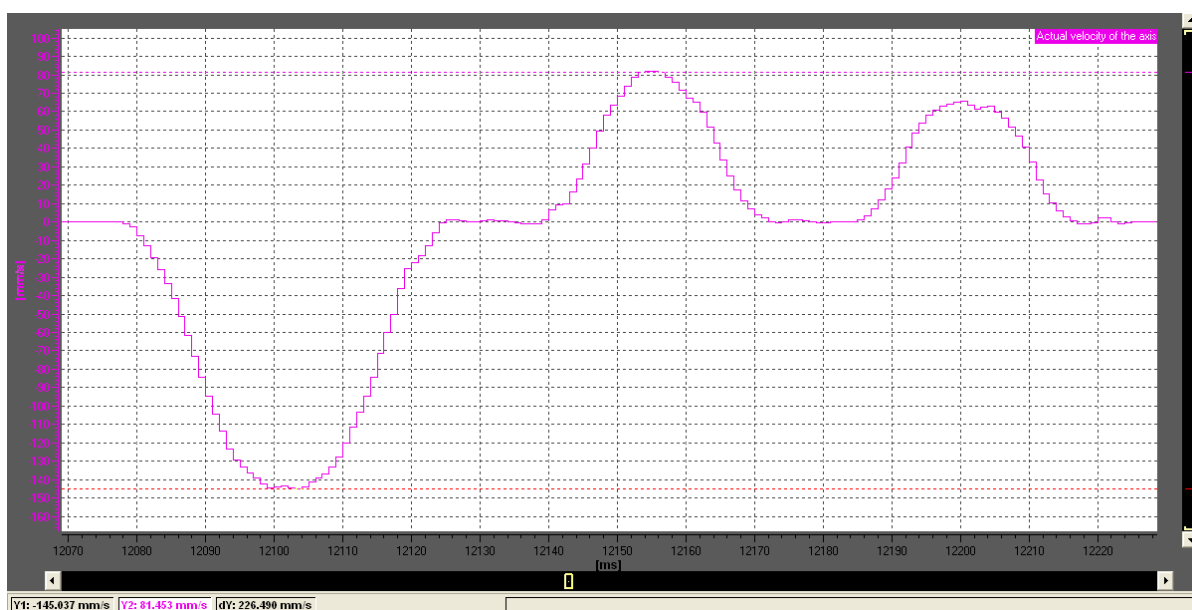


Рисунок Г.4 – Осциллограмма скорости привода штанги

Для положения и ускорения привода определение происходит по аналогичной осциллограмме. Для удобства три графика (положение, скорость и ускорение) могут быть выведены на одной осциллограмме, пример которой показан на рисунке Г.5.

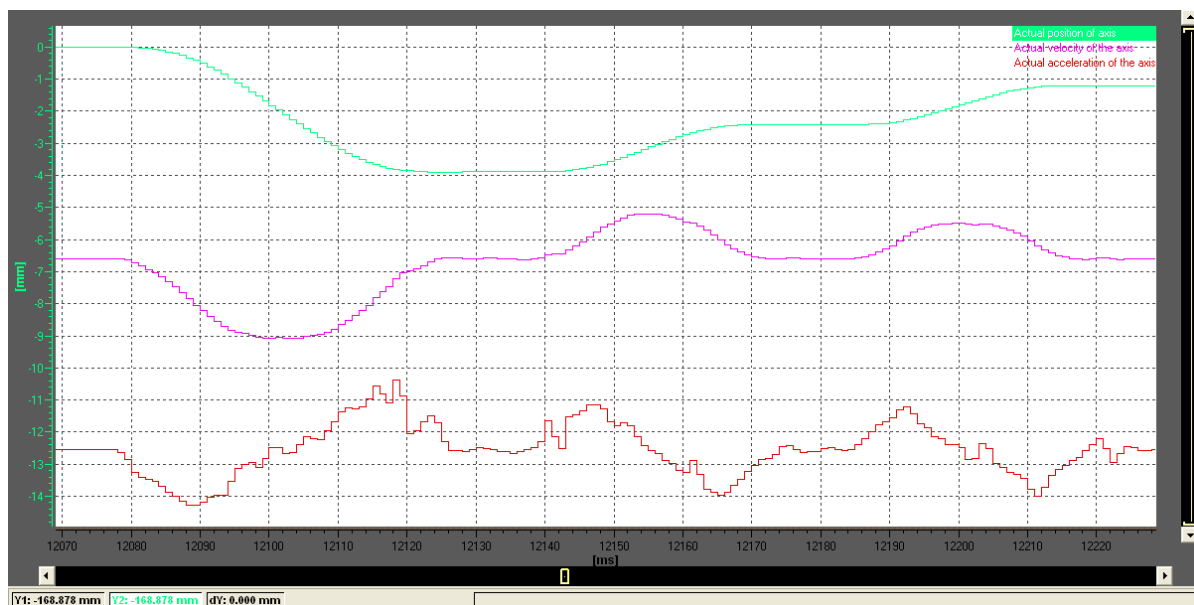


Рисунок Г.5 – Осциллограмма, включающая в себя графики положения, скорости и ускорения привода штанги гексапода

Испытания коммутатора проводятся при нормальных климатических условиях:

- температура окружающей среды $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- относительная влажность воздуха $(60 \pm 20) \%$;
- атмосферное давление $(96 \pm 10) \text{ кПа}$.

Испытания проводятся на базе экспериментального стенда в специально подготовленном помещении.

Испытания продолжаются в течение времени, необходимого для получения результатов измерений.

Структура и соединение используемых средств измерения показаны на рисунке Г.6.

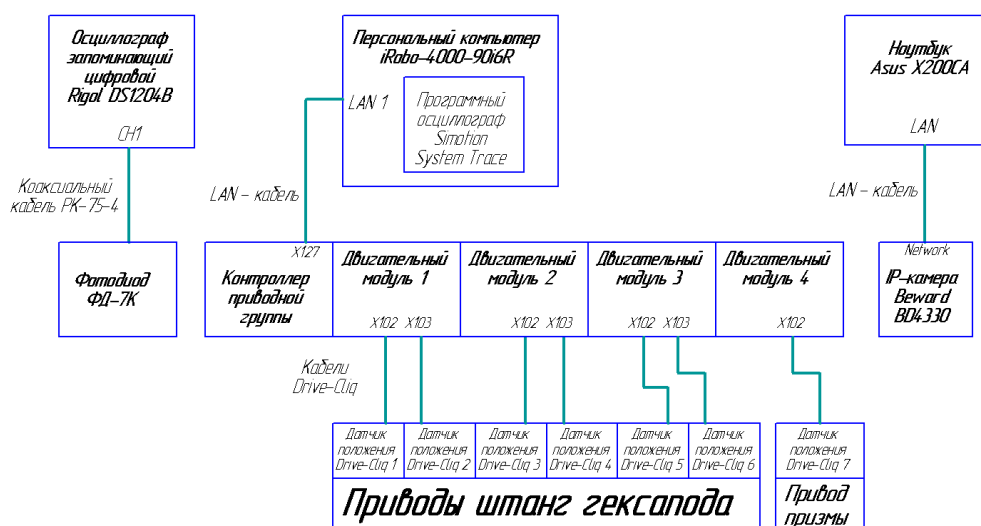


Рисунок Г.6 – Структура и соединения используемых средств измерения

Подготовка к проведению испытаний включает в себя следующие мероприятия:

- подключить коаксиальный кабель к фотодиоду ФД-7К и входу CH1 осциллографа Rigol;
- подключить кабели датчиков Drive-Cliq 1-6 к соответствующим разъемам X102 и X103 модулей системы приводов;
- подключить кабель датчика Drive-Cliq 7 к разъему X102 соответствующего модуля системы приводов;
- соединить ПК и контроллер LAN-кабелем, стандартизированным под интерфейс Ethernet, подключив его к разъемам LAN1 и X127 соответственно;
- подключить разъем Network IP-камеры Beward BD4330 LAN-кабелем к разъему LAN ноутбука Asus X200CA;
- подготовить средства измерений и вспомогательные устройства к работе согласно инструкциям по эксплуатации;
- на осциллографе Rigol DS1204B установить необходимые настройки для регистрации частоты следования импульсов излучения: выбрать CH1 активным каналом, при вертикальной развертке 200 мВ/дел и горизонтальной развертке 50 мс/дел (или меньше). Ввести режим работы Single с запуском по внешнему сигналу. Каналом триггера задать CH1 с уровнем запуска 200 мВ по

нарастающему фронту. Режим должен быть однократным. Позицию «нуля» отсчета сдвинуть на необходимое время для удобного наблюдения серии импульсов.

- на осциллографе Rigol DS1204B установить параметры курсоров: режим – ручной, тип – X, источник – канал CH1. Необходимые перемещения производятся выбором активного курсора и вращением ручки Intensity;

- на ПК запустить программный осциллограф Simotion System Trace;

- в программном осциллографе Simotion System Trace установить предпочитаемые настройки развертки (в дальнейшем могут быть гибко изменены на любом этапе работы): в поле Signals выбрать требуемые для отображения сигналы (позиция, скорость и ускорение). Установить режим ограничения захвата сигнала по времени (Time-limited trace) и длительность (Duration) порядка 1000 мс при времени предзахвата (Pretrigger) порядка 10 мс. Источником запуска здесь служит сигнал скорости, заданный в поле Variable поля Trigger при уровне более 1 град/с (Upper threshold val.). Нажать кнопку Start для активации режима ожидания сигнала.

- на ноутбуке Asus X200CA в браузере Internet Explorer обратиться к IP-адресу <http://192.168.0.99/> для подключения к камере и запуска фоновой видеозахвата.

Испытания проходят в 3 этапа

- 1-й этап – опрос излучателей системы с целью определения разбюстировок и расчета поправочных перемещений коммутатора;

- 2-й этап – опрос излучателей системы в рабочем режиме (с применением автоюстировки).

- 3-й этап – анализ полученных данных.

На 1-м этапе испытаний в программе управления коммутатором Komm.exe запускается режим определения разбюстировок. Одновременно с этим кнопкой «Запись» на web-странице IP-камеры начинается запись видео на жесткий диск ноутбука, а по окончании опроса запись останавливает повторным нажатием кнопки. Кроме того в фоновом режиме происходит запись заданных параметров

приводов в программном осциллографе на ПК. Также автоматически происходит запись осциллограммы частоты следования импульсов излучения осциллографом. Полученные видеозаписи IP-камеры и осциллограммы параметров приводов сохраняются на ноутбуке и ПК соответственно. Осциллограмма частоты следования импульсов излучения сохраняется на флеш-карте, подсоединенной к осциллографу посредством нажатия кнопки «Print».

На 2-м этапе на основе полученных данных, программа Komm.exe проводит видеоанализ и рассчитывает необходимые поправочные движения манипулятора коммутатора. Оператор запускает рабочий режим опроса излучателей. По аналогии с первым этапом происходит запись положения световых пятен на диффузном экране IP-камерой, частоты коммутации осциллографом и параметров приводов программным осциллографом. Все полученные данные сохраняются.

На 3-м этапе полученные видеозаписи открываются на ноутбуке в программе Media Pleer Classic. По кадрам видеозаписей, полученных на первом этапе, определяются компенсируемые разъюстировки в соответствии с описанной выше методикой и формулой (Г.3). По кадрам видеозаписей, полученных на втором этапе, определяются погрешности угловой юстировки в соответствии с описанной выше методикой и формулой (Г.2). На основе формулы (Г.1) или встроенными методами осциллографа Rigol DS1204B определяются частоты следования импульсов излучения.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Световые пятна, наблюдавшиеся IP-камерой на диффузном экране

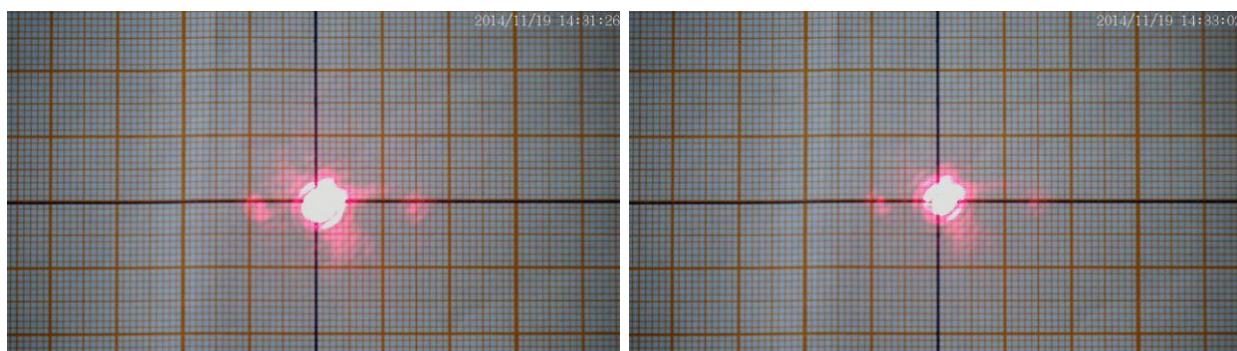


Рисунок Д.1 – Первый излучатель до и после юстировки (первый опыт)

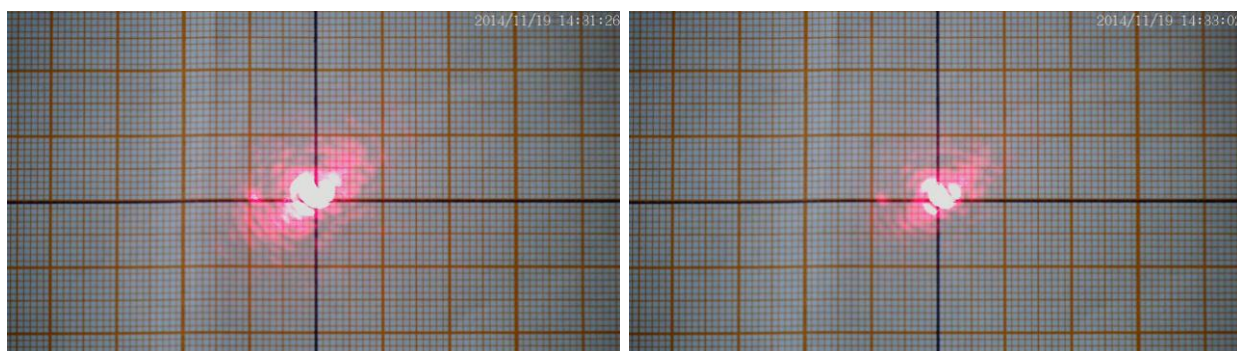


Рисунок Д.2 – Второй излучатель до и после юстировки (первый опыт)

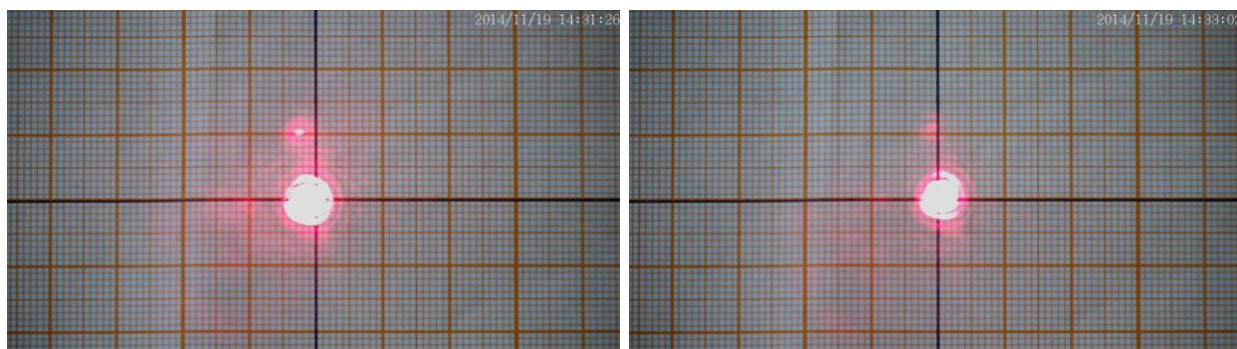


Рисунок Д.3 – Третий излучатель до и после юстировки (первый опыт)

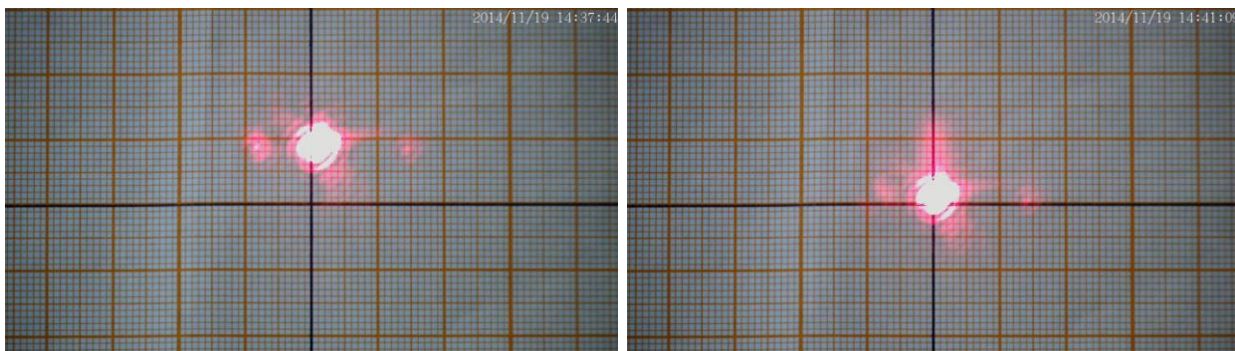


Рисунок Д.4 – Первый излучатель до и после юстировки (второй опыт)

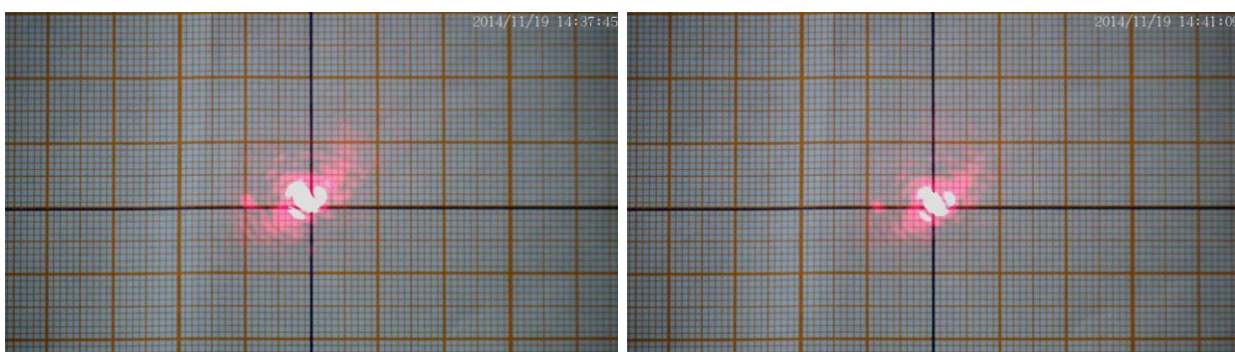


Рисунок Д.5 – Второй излучатель до и после юстировки (второй опыт)

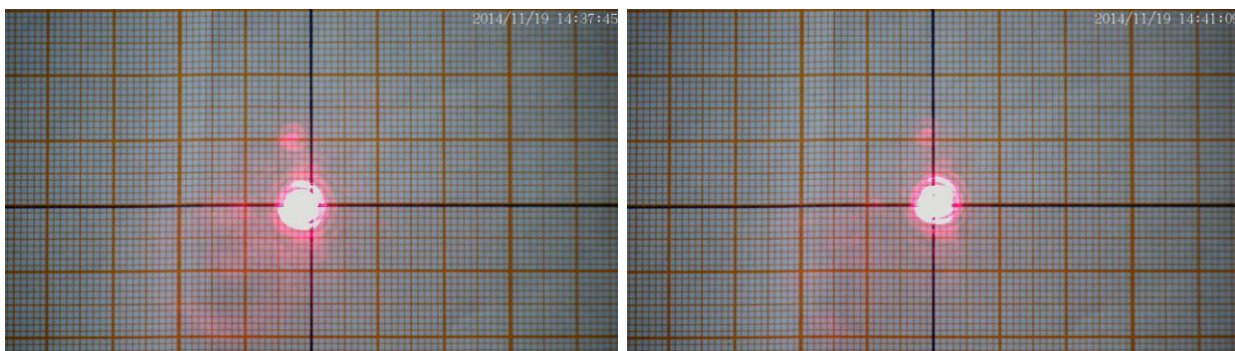


Рисунок Д.6 – Третий излучатель до и после юстировки (второй опыт)

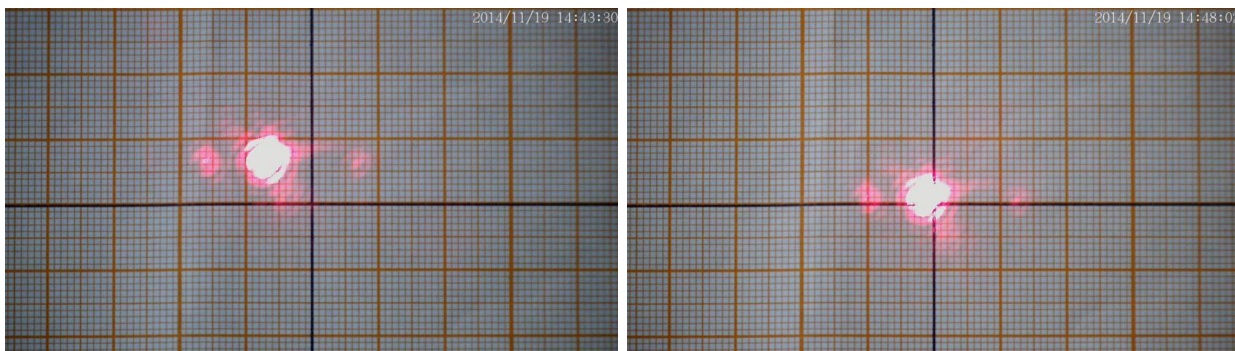


Рисунок Д.7 – Первый излучатель до и после юстировки (третий опыт)

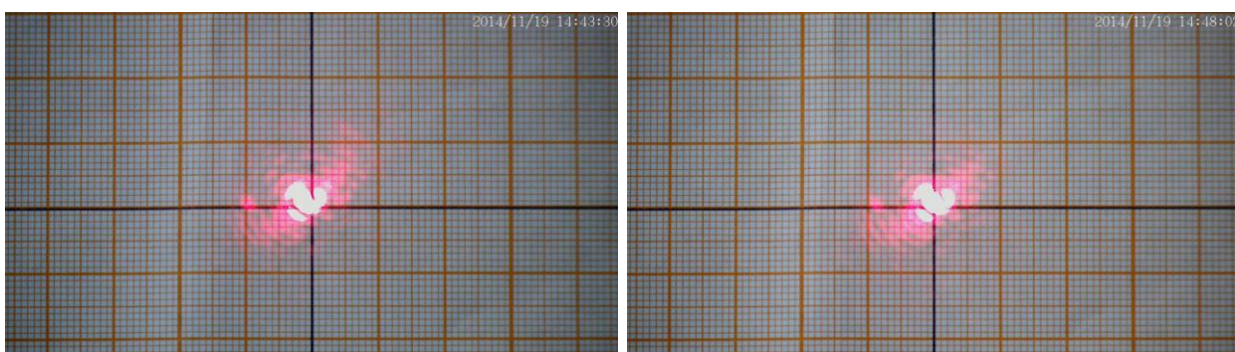


Рисунок Д.8 – Второй излучатель до и после юстировки (третий опыт)

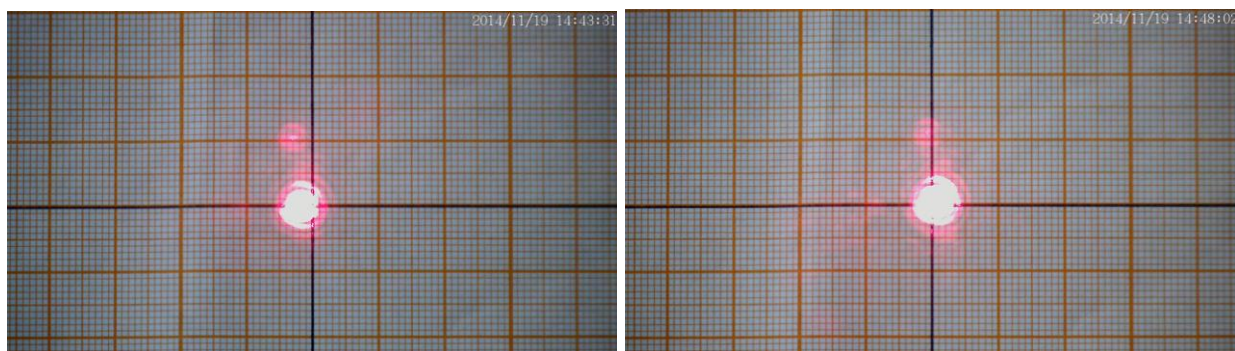


Рисунок Д.9 – Третий излучатель до и после юстировки (третий опыт)

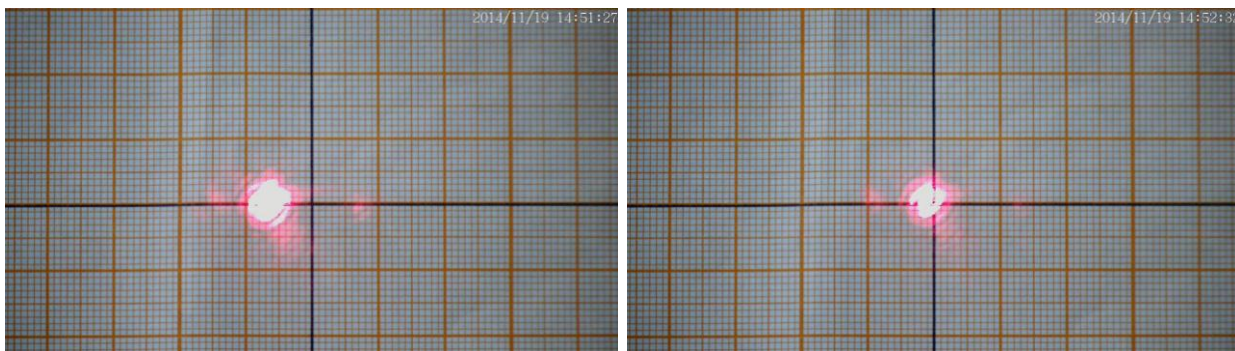


Рисунок Д.10 – Первый излучатель до и после юстировки (четвертый опыт)

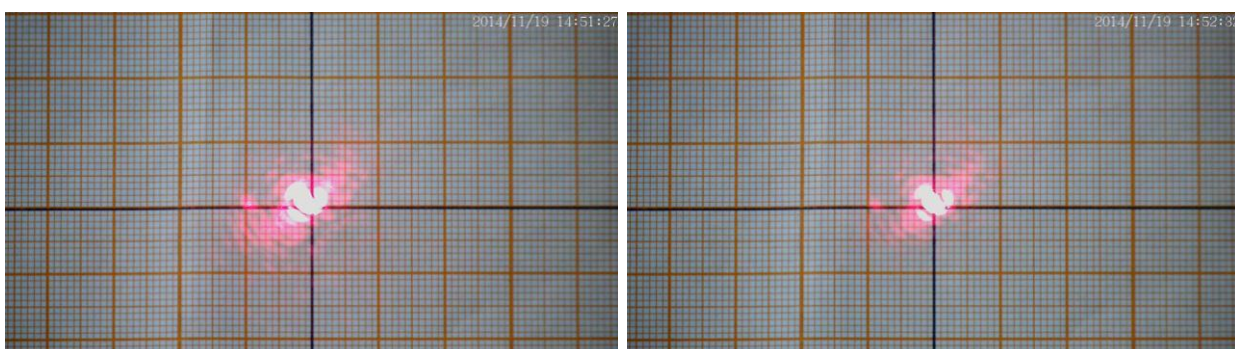


Рисунок Д.11 – Второй излучатель до и после юстировки (четвертый опыт)

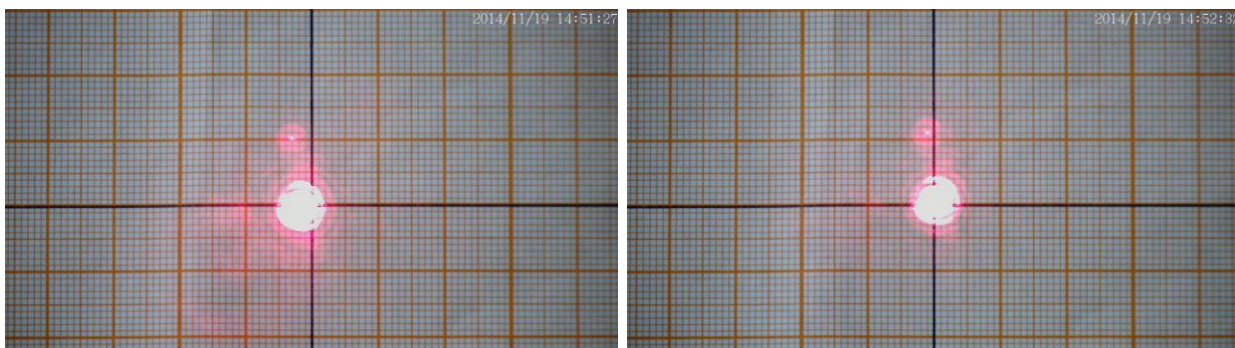


Рисунок Д.12 – Третий излучатель до и после юстировки (четвертый опыт)

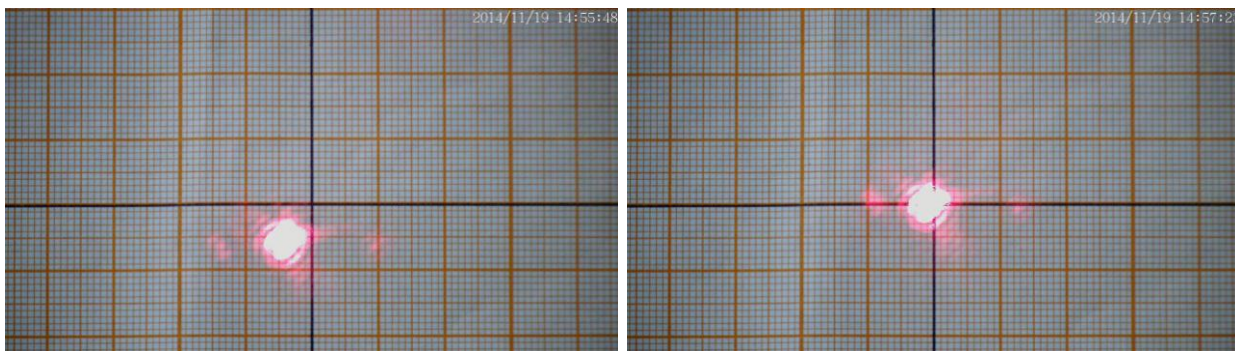


Рисунок Д.13 – Первый излучатель до и после юстировки (пятый опыт)

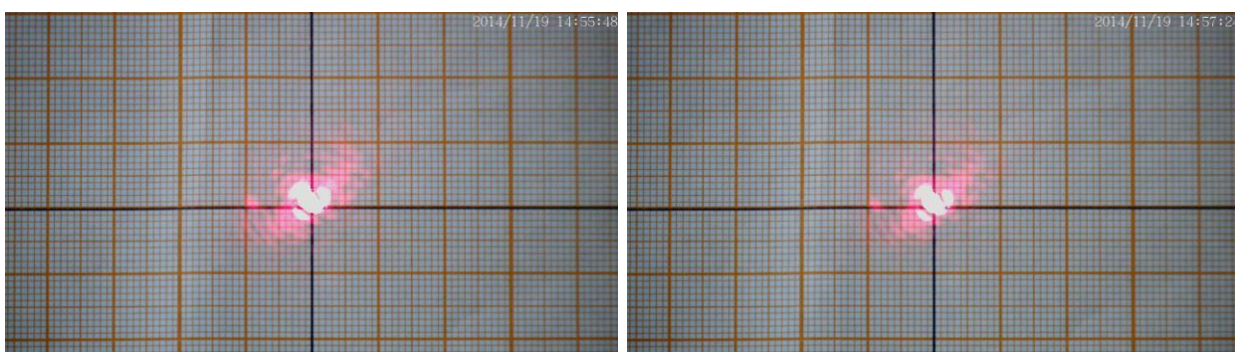


Рисунок Д.14 – Второй излучатель до и после юстировки (пятый опыт)

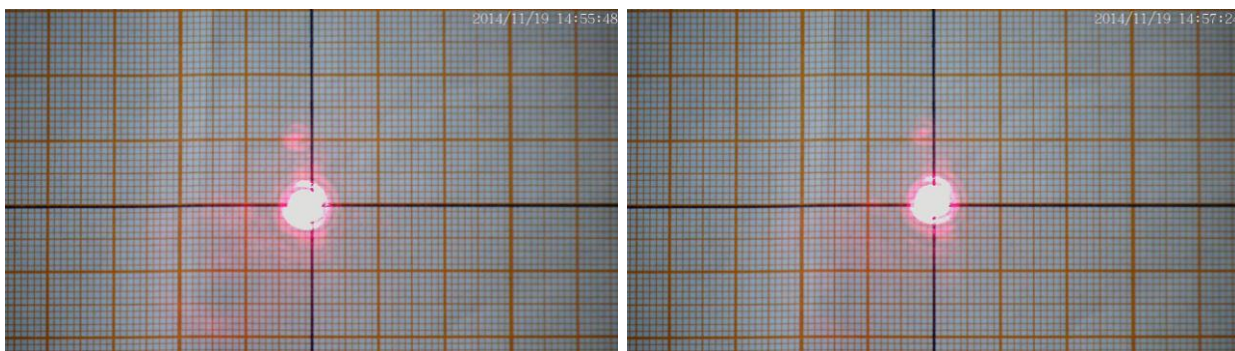


Рисунок Д.15 – Третий излучатель до и после юстировки (пятый опыт)

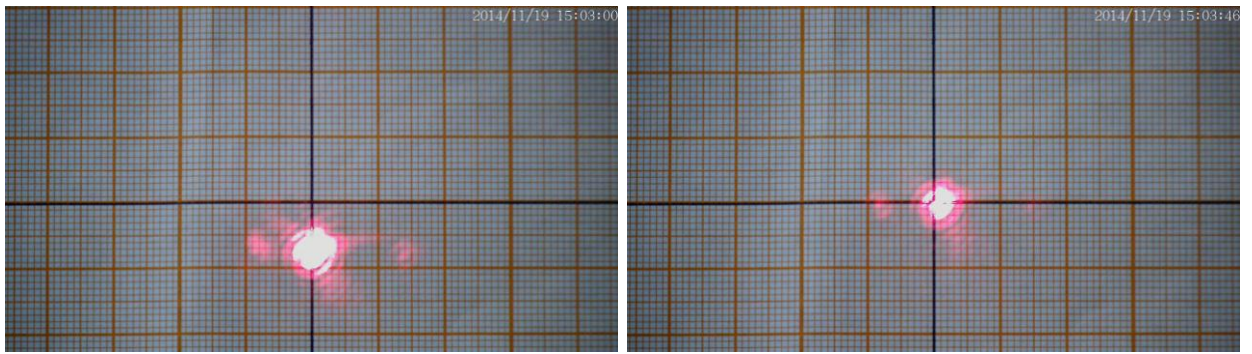


Рисунок Д.16 – Первый излучатель до и после юстировки (шестой опыт)

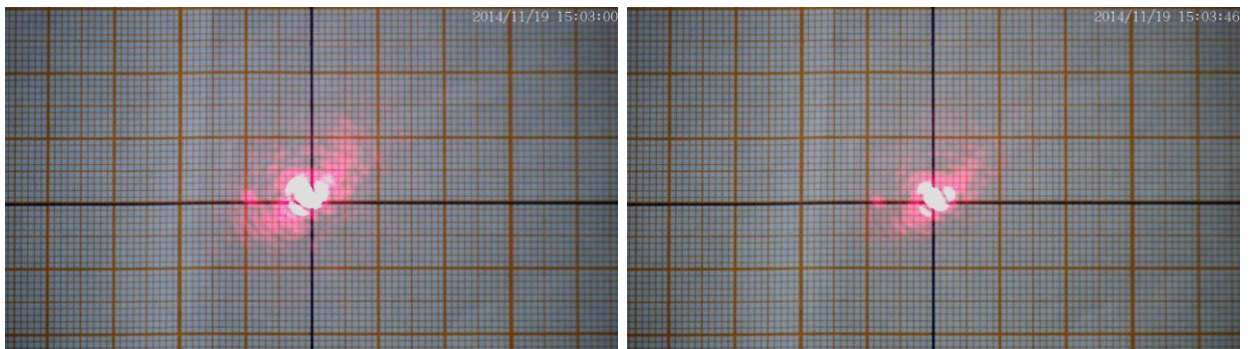


Рисунок Д.17 – Второй излучатель до и после юстировки (шестой опыт)



Рисунок Д.18 – Третий излучатель до и после юстировки (шестой опыт)

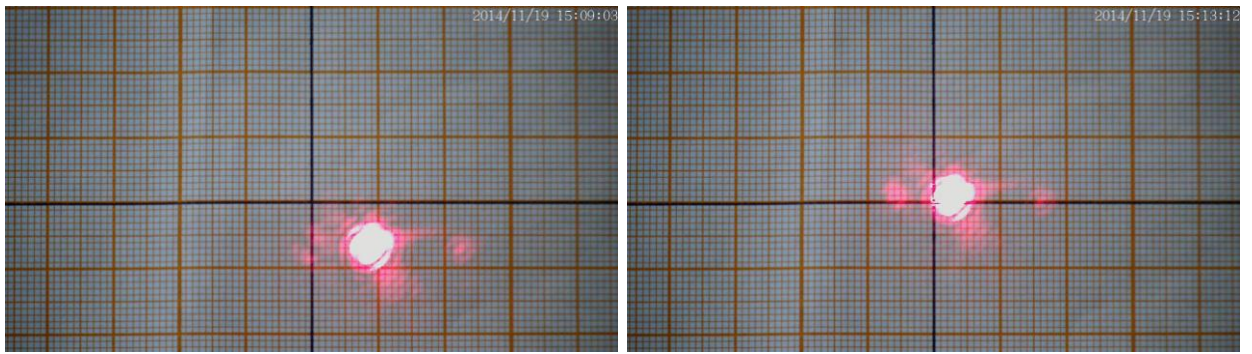


Рисунок Д.19 – Первый излучатель до и после юстировки (седьмой опыт)



Рисунок Д.20 – Второй излучатель до и после юстировки (седьмой опыт)

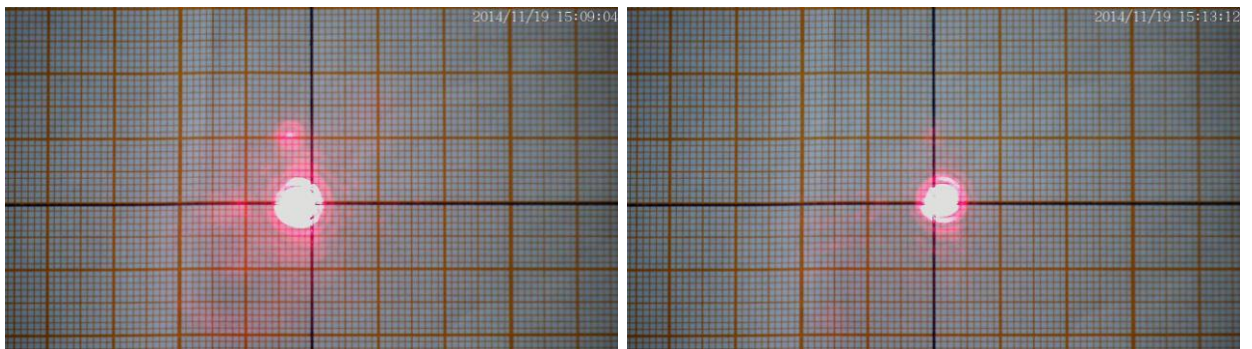


Рисунок Д.21 – Третий излучатель до и после юстировки (седьмой опыт)

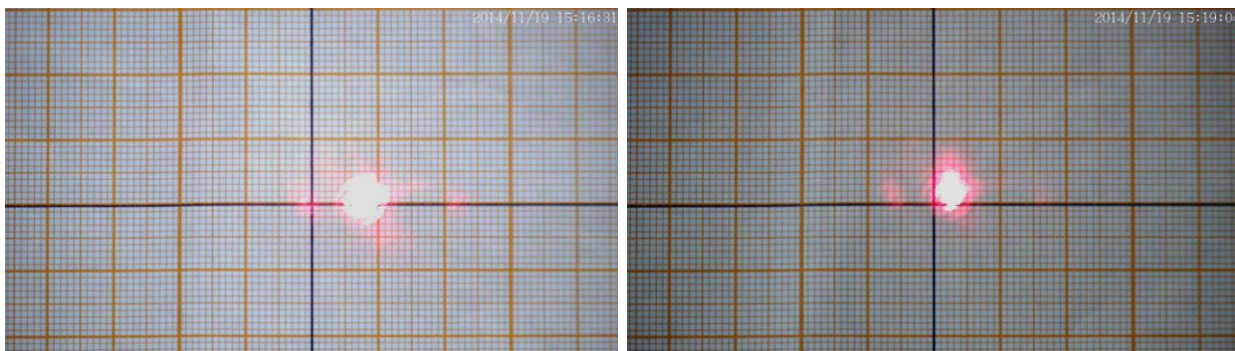


Рисунок Д.22 – Первый излучатель до и после юстировки (восьмой опыт)

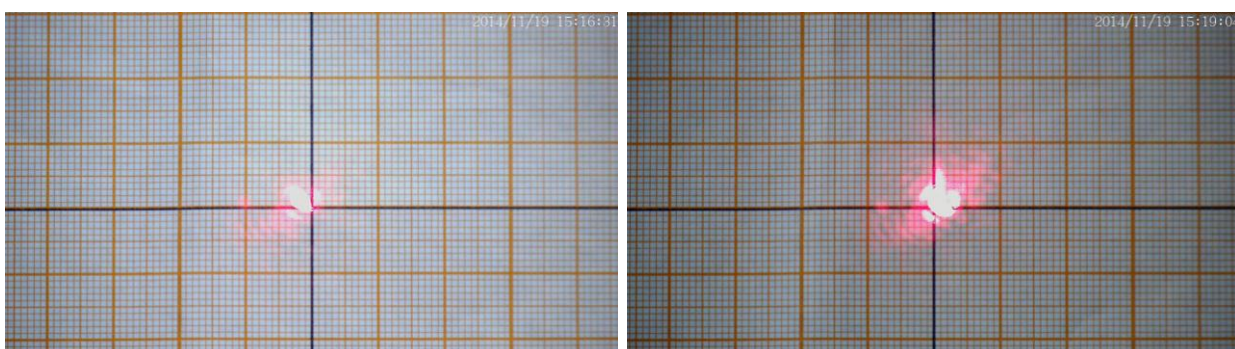


Рисунок Д.23 – Второй излучатель до и после юстировки (восьмой опыт)

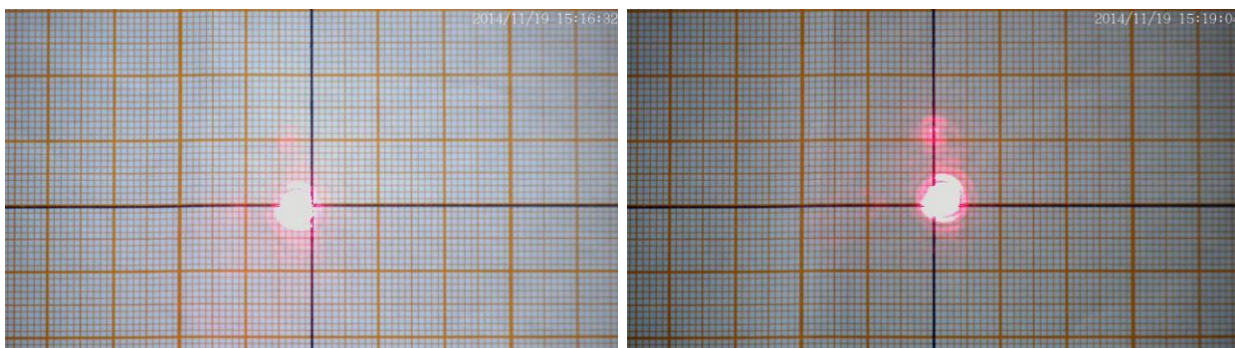


Рисунок Д.24 – Третий излучатель до и после юстировки (восьмой опыт)

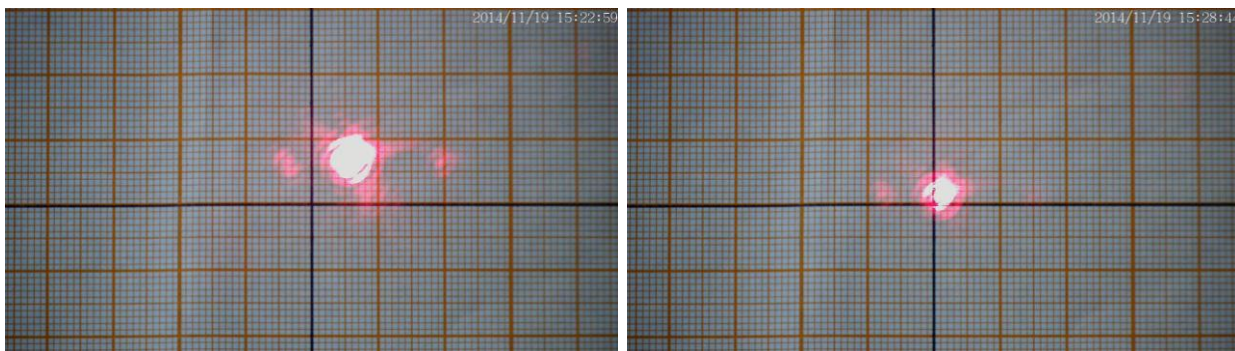


Рисунок Д.25 – Первый излучатель до и после юстировки (девятый опыт)

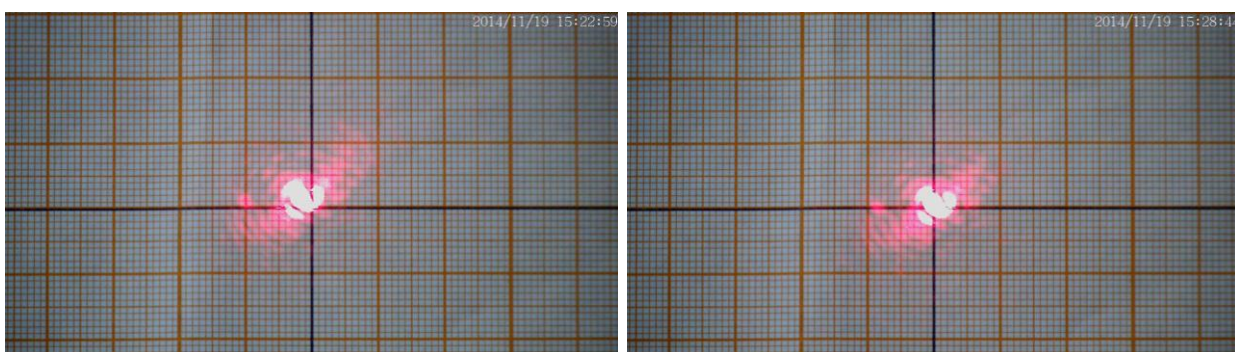


Рисунок Д.26 – Второй излучатель до и после юстировки (девятый опыт)

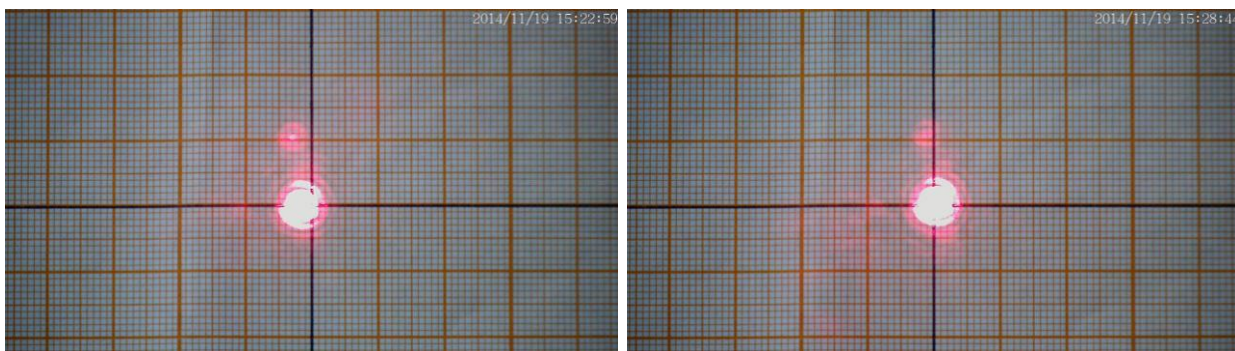


Рисунок Д.27 – Третий излучатель до и после юстировки (девятый опыт)

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
Департамент промышленности обычных вооружений, боеприпасов и спецхимии
Федеральное казенное предприятие "Государственный лазерный полигон "Радуга"

Россия, 600910,
Владимирская обл.,
г.Радужный, а/я 771,
ФКП "ГЛП "Радуга"



Телефон: (49254) 3-30-30
Тел/Факс: (495) 231-42-35
Факс: (4922) 32-39-70
E-mail: raduga@trassa.org
WEB: www.trassa.org

УТВЕРЖДАЮ
ВрИО генерального директора
ФКП «ГЛП «Радуга»
И.В.Панфилов
« 24 » 03 2015 г.
АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Потанина Юрий Сергеевича

Комиссия в составе:

председатель – начальник НИИКО-1 – Чернов А.А.;

члены комиссии:

начальник отдела 6803 НИИКО-1 – Круглов В.П.;

начальник сектора отдела 6802 НИИКО-1 – Нагорнюк Е.В.;

инженер 1-й категории отдела 6802 НИИКО-1 – Сенюшкин А.Г.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Потанина Юрия Сергеевича «Разработка мехатронной системы на базе механизма с параллельной кинематикой с целью объединения функций коммутации и автоюстировки излучения оптических систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в практику научно-технической деятельности на Федеральном казенном предприятии «Государственный лазерный полигон «Радуга», а именно:

1. Программа пользователя контроллера Siemens Simotion D;
2. Компьютерная программа управления оптическим коммутатором.

Использование указанных результатов позволяет реализовать компенсацию разъюстировок оптических излучателей с помощью многоосевых систем перемещения оптических элементов на базе линейки приводов Siemens Sinamics S120 и контроллеров Siemens Simotion D.

Председатель комиссии:

 _____ Чернов А.А.

Члены комиссии:

 _____ Круглов В.П.

 _____ Нагорнюк Е.В.

 _____ Сеньюшкин А.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт о внедрении результатов
диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор,
проректор по научной и
инновационной работе ВлГУ,
д.ф.-м.н., профессор

В.Г. Прокошев
«15» 03 2015 года

АКТ

внедрения в учебный процесс кафедры «Мехатроника и электронные системы автомобилей» Владимирского Государственного Университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых результатов кандидатской диссертации Потанина Ю.С. на тему «Разработка мехатронной системы на базе механизма с параллельной кинематикой с целью объединения функций коммутации и автоюстировки излучения оптических систем»

Комиссия в составе: председатель – начальник учебного управления к.т.н., доцент Шеин И.П.; члены комиссии: заведующий кафедрой «МиЭСА», д.т.н., профессор Кобзев А.А.; к.т.н., доцент Мишулин Ю.Е. составила настоящий акт о том, что в учебном процессе бакалавров и магистров по направлению «Мехатроника и робототехника» используются результаты диссертационной работы Потанина Ю.С. «Разработка мехатронной системы на базе механизма с параллельной кинематикой с целью объединения функций коммутации и автоюстировки излучения оптических систем», а именно:

- анализ кинематики и динамики механизма манипулятора с параллельной кинематикой типа гексапод, основанный на матрицах однородного преобразования для поворота вокруг произвольного вектора;
- принципы разработки программ пользователя контроллеров Siemens Simotion D на языке MCC;
- метод моделирования и 3D-визуализации движения манипуляторов с параллельной кинематикой с применением библиотек simMechanics среды Simulink пакета MATLAB.

Председатель комиссии:

начальник учебного управления к.т.н., доцент

Члены комиссии:

заведующий кафедрой «МиЭСА», д. т. н., профессор

доцент кафедры «МиЭСА», к.т.н., доцент

Шеин И.П.

Кобзев А.А.

Мишулин Е.Ю.