

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Владимир 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель	<b>Кобзев Александр Архипович</b> доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Мехатроника и электронные системы автомобилей» ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Официальные оппоненты:	<b>Афонин Вячеслав Леонидович</b> доктор технических наук, профессор главный научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва <b>Гнездов Николай Евгеньевич</b> кандидат технических наук, доцент инженер-программист ПАО «НИПТИЭМ», г. Владимир
Ведущая организация	ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ"» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится 22 марта 2016 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.025.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru/index.php?id=130>.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ученому секретарю совета Д 212.025.05 Новиковой Е. А.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к. т. н., доцент



Новикова Е. А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Одной из перспектив автоматизации оптических установок является использование в их составе мехатронных систем. В спектре оптических установок одни из наиболее сложных задач решаются в установках с набором излучателей. Это объясняется тем, что процесс поочередной коммутации излучателей на общую оптическую ось осложняется возникающими разъюстировками – флуктуациями положения оптических осей излучателей под влиянием негативных факторов.

Коммутация излучения традиционными методами не в состоянии компенсировать разъюстировки, что вызывает необходимость введения в установку дополнительной юстирующей оптики, неизбежно снижающей эффективность. Поэтому актуальным направлением повышения эффективности оптических установок с набором излучателей является разработка мехатронной системы, способной синергетически объединить в себе функции коммутации и автоюстировки излучения, позволяя тем самым исключить излишнюю юстирующую оптику и повысить общую эффективность установки.

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». Однако существующие на данный момент коммутаторы представляют собой одноосевые приводы зеркала или призмы, не способные выполнять юстировку положения оптической оси.

Предлагаемый в работе подход к решению данной проблемы подразумевает использование мехатронных принципов. В противовес традиционным методам предлагается:

1. Перенос функциональной нагрузки с механических и оптических узлов к электронным и компьютерным компонентам.
2. Синергетическое объединение производимых операций.
3. Снижение влияния оператора на процесс функционирования системы и общее повышение её автоматизации.

В условиях повышенного интереса к преимуществам установок с набором излучателей возрастает актуальность разработки мехатронных систем в их составе, позволяющих (в отличие от традиционных систем) одновременно решать проблемы повышения эффективности работы и устойчивости к влиянию негативных факторов.

Практическая необходимость реализации автоюстировки в системах коммутации с одной стороны, и отсутствие соответствующих мехатронных

систем с другой стороны, обуславливает актуальность темы данной диссертационной работы.

### **Цель диссертационной 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.

### **Основные задачи**

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, с целью подтверждения достижения поставленных технических требований.

### **Научная новизна**

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**

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 установ-

ках 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 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 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 приводной группы, а также анализ параметров и характеристик приводов проводился в пакете Simotion Scout.

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

### **Реализация и внедрение результатов работы**

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

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 имени 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 результатов 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, из них 3 в журналах из перечня ВАК.

## **Структура и объем 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована основная цель и задачи, научная новизна и практическая значимость, описаны методы исследования, реализация и апробация результатов диссертационной работы.

**В первой главе** проводится общий анализ устройств управления положением оптической оси и формулируется концепция разрабатываемой мехатронной системы - оптического коммутатора.

В первой части главы дается обзор и классификация приводов в оптических системах, а также рассматриваются системы управления положением оптической оси. Обзор включает в себя описания запатентованных устройств, потенциально способных выполнять функции оптического коммутатора. Обзор устройств показал, что юстирующие устройства, характеризующиеся наличием нескольких степеней подвижности, не обладают пределами перемещений и скоростью, необходимыми для выполнения коммутации. Кроме того, устройства, пригодные для задач коммутации, со значительными пределами перемещения оптических элементов, не обладают требуемым набором степеней подвижности и не пригодны для задач юстировки. Обзор выявил широкое применение механизмов с параллельной кинематикой в оптомеханике.

Во второй части главы проводится обзор механизмов с параллельной кинематикой, приводятся их достоинства и характерные недостатки.

В третьей части главы формулируются общая концепция коммутатора и технические требования к нему. Поскольку излучатели оптических установок могут быть подвержены влиянию различных негативных факторов, их оптические оси могут претерпевать разъюстировки – угловые смещения относительно эталонного положения. Основными негативными факторами, вызывающими разъюстировку, являются:

1. Динамика климатических условий - приводит к тепловому расширению оптических элементов излучателя.

2. Вибрация - приводит к нарушениям конструкции излучателя.
3. Интенсивный процесс работы - приводит к нагреву оптических элементов излучателя и их тепловому расширению.

Разъюстировки излучателей приводят, в частности, 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. Недостатками данного подхода являются:

1. Снижение эффективности излучения вследствие рассеяния его части на юстирующих устройствах (до 5-20% энергии излучения).
2. Усложнение установки прямо пропорционально количеству излучателей вследствие наличия юстирующих устройств на каждом излучателе.
3. Значительные затраты времени на юстировку излучателей.

Актуальной задачей является перенос функции компенсации разъюстировок в оптический коммутатор. Поскольку коммутируемые оси расположены в соответствии с рис. 1, компенсация разъюстировок должна достигаться своеобразным позиционированием призмы, при котором входная грань располагается перпендикулярно оси излучателя, а сама призма ориентируется таким образом, чтобы отраженная ею оптическая ось пролегла через целевую точку – точку, в которую требуется попадание оптического излучения. Примеры позиций призмы при компенсации разъюстировок показаны на рис. 2.

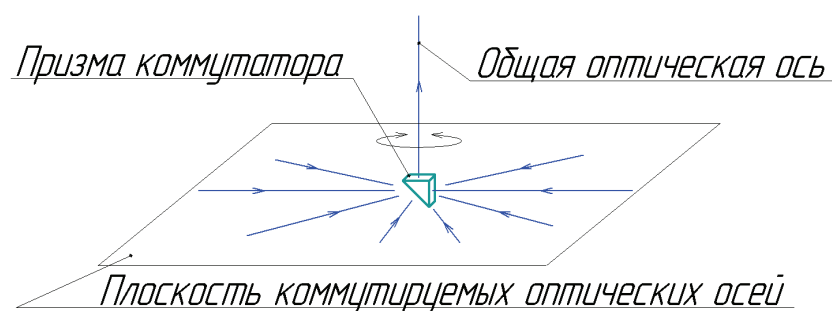


Рис. 1. – Расположение коммутируемых осей

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 ско

Наличие набора излучателей в системе и потенциальная вероятность разъюстировки каждого из них на случайный угол в произвольной плоскости диктует необходимость базирования коммутатора



рости позиционирования призмы, было принято решение о базировании оптического коммутатора на механизме с параллельной кинематикой, причем на его подвижной платформе располагается обособленный привод призмы.

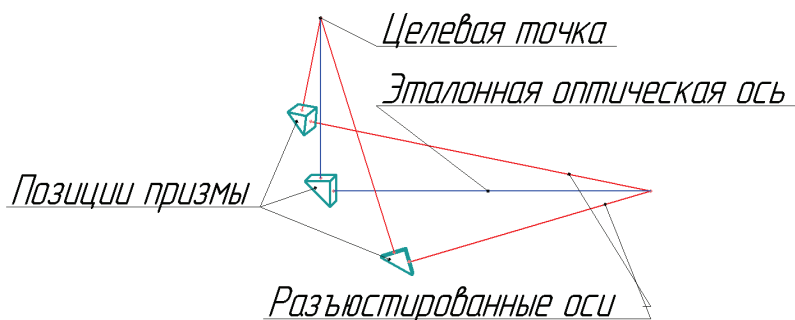


Рис. 2. – Позиции призмы при компенсации разъюстировок

Предлагаемая структура оптической установки с разрабатываемым оптическим коммутатором приведена на рис. 3.

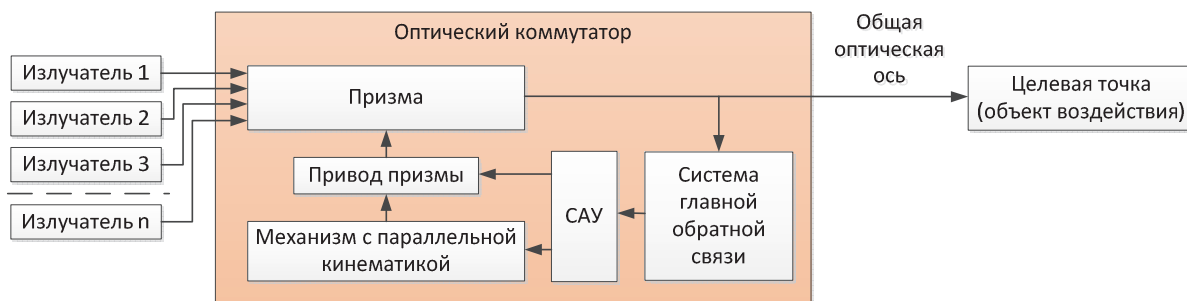


Рис. 3 – Структура разрабатываемого оптического коммутатора

Функции коммутации и автоюстировки в коммутаторе синергетически объединяются 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 необходимую 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 негативных факторов.

В части технических параметров для коммутации оптических осей устанавливается требование превышения частоты 20 Гц. Требуемая точность автоюстировки принимается на уровне  $3 \cdot 10^{-4}$  рад (половина угла расходимости используемых излучателей). Предельные компенсируемые угловые разъюстировки оптической оси принимаются на уровне 5 угл.

мин. Для программного обеспечения ставится условие временных затрат на получение и обработку информации не более 60 секунд.

**Во второй главе** выбирается структура механизма коммутатора, анализируется его кинематика и динамика, а также проводится моделирование.

В первой части главы, на основе классификации параллельнокинематических механизмов И.Н. Егорова, выбирается кинематическая структура коммутатора. В итоге выбирается гексапод с разнесенными шарнирами и линейными приводами штанг.

Во второй части главы для выбранной кинематической структуры решается обратная задача кинематики, представляющая собой систему уравнений (1):

$$\begin{cases} q_i = \sqrt{(x_{ai} - x_{bi})^2 + (y_{ai} - y_{bi})^2 + (z_{ai} - z_{bi})^2}, i \in [1,2,3,4,5,6]; \\ q_7 = \gamma. \end{cases} \quad (1)$$

где  $q_i$  – длина  $i$ -й штанги гексапода;  $(x_{ai}, y_{ai}, z_{ai})$  – координаты  $i$ -го шарнира основания, определяемые геометрией гексапода;  $(x_{bi}, y_{bi}, z_{bi})$  – координаты  $i$ -го шарнира платформы в произвольный момент времени;  $q_7$  – угол поворота призмы;  $\gamma$  – угол поворота обособленного привода призмы.

Координаты  $i$ -го шарнира платформы в произвольный момент времени  $(x_{bi}, y_{bi}, z_{bi})$  определяются уравнением (2):

$$\begin{pmatrix} x_{bi} \\ y_{bi} \\ z_{bi} \\ 1 \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} x_{0bi} \\ y_{0bi} \\ z_{0bi} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $M$  – матрица однородных преобразования;  $(x_{0bi}, y_{0bi}, z_{0bi})$  – начальные координаты  $i$ -го шарнира платформы, определяемые геометрией гексапода.

Ключевой особенностью здесь является отказ от описания ориентирующих степеней подвижности гексапода через углы Эйлера. В данной работе применен следующий подход: ориентирующие степени подвижности представлены в виде угла поворота платформы  $\beta$  вокруг некоторого вектора  $PR$  с координатами  $(x_{pr}, y_{pr}, z_{pr})$ . Поэтому матрица преобразований имеет вид (3):

$$M = \begin{pmatrix} \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot x_{pr}^2 & (1 - \cos \beta) \cdot x_{pr} \cdot y_{pr} - \sin \beta \cdot z_{pr} & (1 - \cos \beta) \cdot x_{pr} \cdot z_{pr} + \sin \beta \cdot y_{pr} & x_{pr} \\ (1 - \cos \beta) \cdot y_{pr} \cdot x_{pr} + \sin \beta \cdot z_{pr} & \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot y_{pr}^2 & (1 - \cos \beta) \cdot y_{pr} \cdot z_{pr} - \sin \beta \cdot x_{pr} & y_{pr} \\ (1 - \cos \beta) \cdot z_{pr} \cdot x_{pr} - \sin \beta \cdot y_{pr} & (1 - \cos \beta) \cdot z_{pr} \cdot y_{pr} + \sin \beta \cdot x_{pr} & \cos \beta + (1 - \cos \beta) \cdot z_{pr}^2 & z_{pr} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Используя матрицу (3) в выражении (2) и уравнения координат шарниров платформы в выражении (1), получено решение обратной задачи кинематики для оптического коммутатора (4):

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

В третьей части главы анализируется динамика коммутатора. Применение уравнения Лагранжа второго рода и методики расчета работы на элементарных приращениях позволяет получить уравнения динамики коммутатора.

В четвертой части главы проводится моделирование и визуализация (рис.4) движения коммутатора в среде MatLab и SimMechanics. В результате абсолютные погрешности линейного позиционирования платформы не превышают  $5 \cdot 10^{-5}$  мм, а абсолютные погрешности элементов матрицы поворота не превышают  $5 \cdot 10^{-7}$ . Полученные результаты говорят о корректности решения обратной задачи кинематики, а трехмерная визуализация гексапода позволяет наблюдать процесс его движения и убедиться в отсутствии ошибок.

**В третьей главе** разрабатывается структура системы и алгоритмы управления оптическим коммутатором.

В первой части главы, в соответствии с разработанной концепцией, предлагается структура коммутатора, приведенная на рис. 5.

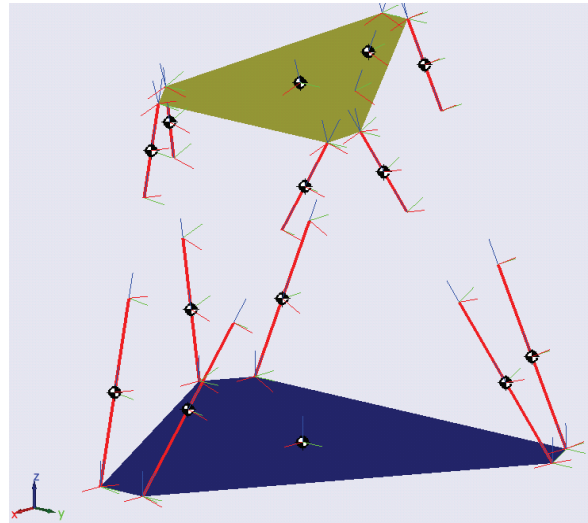


Рис. 4 – 3D-визуализация гексапода

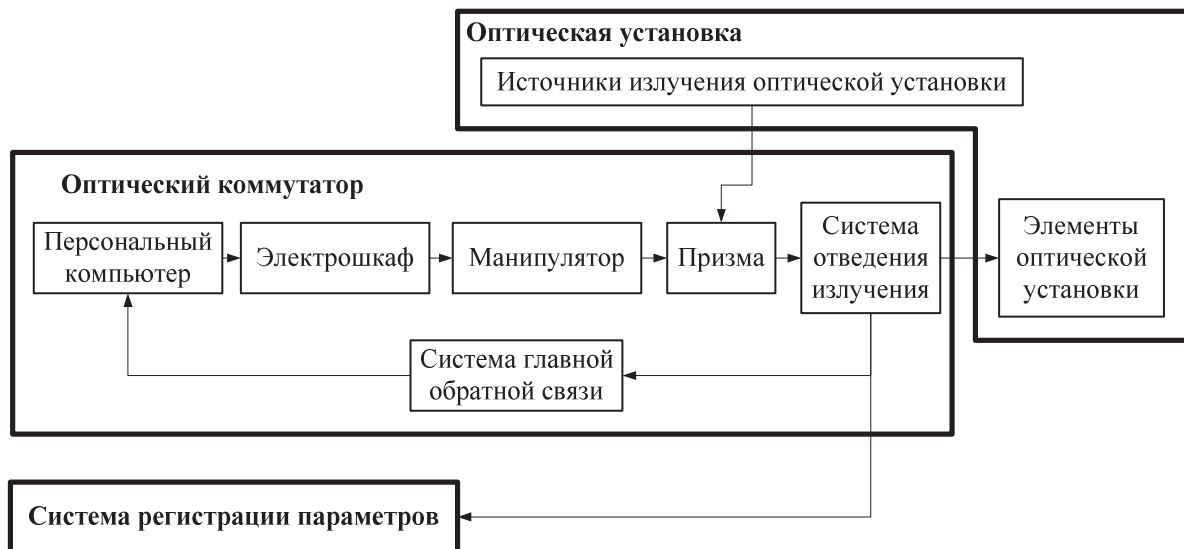


Рис. 5 – Структура оптического коммутатора

В составе оптической установки коммутатор функционирует в соответствии с последовательностью действий, приведенной на рис. 6.

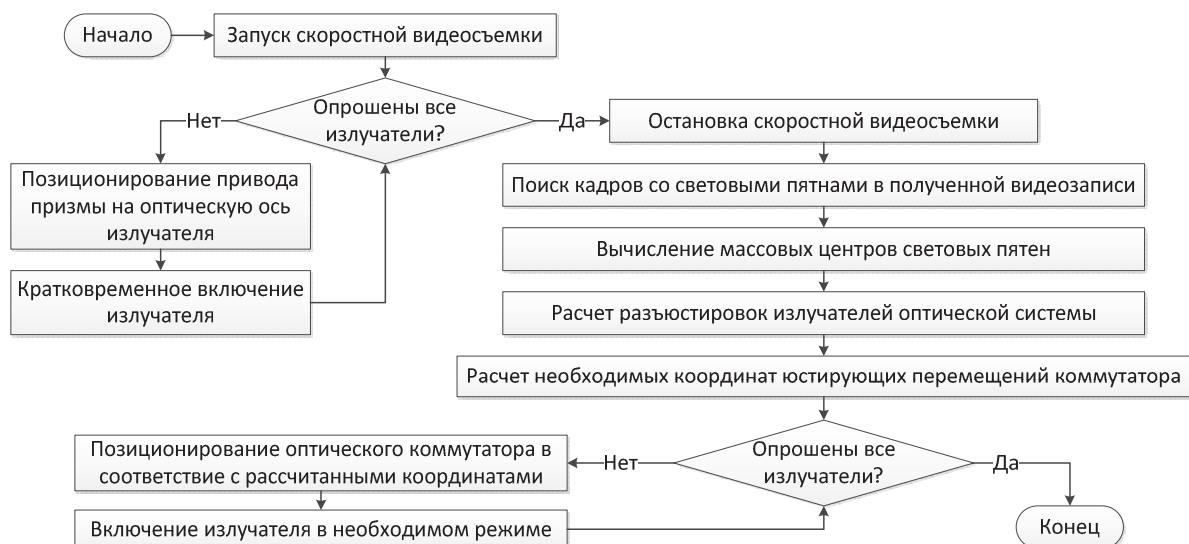


Рис. 6 – Последовательность действий коммутатора в составе оптической установки

Во второй части главы разрабатываются алгоритмы управления коммутатором, позволяющие определять степень разъюстировки излучения и автоматически компенсировать её. Данная возможность обеспечивается введением главной обратной связи по положению оптической оси на основе визуальной сенсорной системы (системы скоростной видеозаписи).

Расположение элементов оптической установки показано на рис. 7.

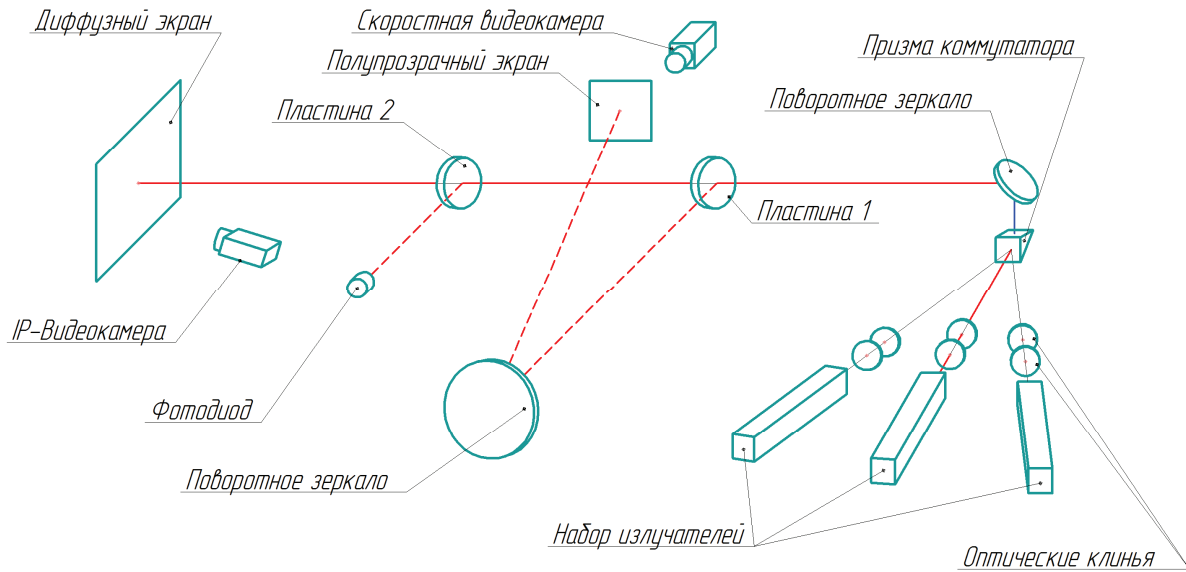


Рис. 7 – Расположение элементов оптической установки

Разъюстировки излучателей, имитируемые в данной работе оптическими клиньями, определяются следующим образом: коммутатор дискретно опрашивает излучатели, в то время, как скоростная камера записывает видеофайл со световыми пятнами на полупрозрачном экране. 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: нахождение засвеченных пикселей на кадре; вычисление весовых центров световых пятен в соответствии с системой уравнений (5):

$$\begin{cases} x(Z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w(p_i); \\ y(Z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h(p_i), \end{cases} \quad (5)$$

где  $x(Z)$ ,  $y(Z)$  – координаты центра светового пятна по горизонтали и вертикали видеокадра соответственно;  $w(p_i)$ ,  $h(p_i)$  – координаты  $i$ -го пикселя по горизонтали и вертикали соответственно;  $n$  – количество засвеченных пикселей. Применение системы (5) позволяет анализировать данные от видеокамеры и получать видеокадры с указанием центра пятна (рис. 8). Поскольку излучатели расположены в единой плоскости (рис. 1), при повороте призмы на угол  $\alpha$  для опроса очередного излучателя, локаль-

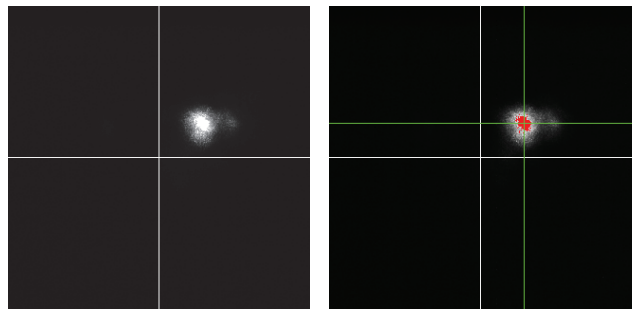


Рис. 8 – Видеокадр до и после определения центра светового пятна

ная система координат пятна на полупрозрачном экране также совершит поворот на угол  $\alpha$ . Данный поворот учитывается при расчетах системой уравнений (6), а разбюстировки рассчитываются по системе уравнений (7):

$$\begin{cases} \Delta x = x(Z) \cdot \cos \alpha + y(Z) \cdot \sin \alpha; \\ \Delta y = -x(Z) \cdot \sin \alpha + y(Z) \cdot \cos \alpha, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A_V = \arctan\left(\frac{\Delta x}{L_e}\right); \\ A_H = \arctan\left(\frac{\Delta y}{L_e}\right), \end{cases} \quad (7)$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – отклонения светового пятна от центра области кадра по горизонтали и вертикали соответственно с учетом угла поворота призмы  $\alpha$ ;  $A_V$ ,  $A_H$  – вертикальная угловая и горизонтальная угловая разбюстировки соответственно;  $L_e$  – расстояние от излучателя до полупрозрачного экрана.

Для дальнейших расчетов вводятся условные точки пространства:

- точка М ( $x_m, y_m, z_m$ ) – положение источника излучения, определяемое конфигурацией оптической системы;
- точка Р ( $x_p, y_p, z_p$ ) – требуемое положение призмы;
- точка Т ( $x_t, y_t, z_t$ ) – положение целевой точки.

В соответствие с разработанной концепцией коммутатора, его целью является позиционирование призмы со следующими условиями:

- призма должна позиционироваться в такую точку пространства Р, чтобы разбюстированная ось излучателя проходила через неё и являлась прямой МР;
- оптическая ось излучателя МР должна быть перпендикулярна входной грани призмы, а отраженное призмой излучение должно лежать на оси, проходящей через целевую точку Т и являющейся прямой РТ.

Для излучателя с разбюстировками  $A_V$ ,  $A_H$ , и соответствующего угла поворота призмы  $\alpha$ , поставленная цель достигается в три этапа:

1. Позиционирование призмы в точку Р ( $x_p, y_p, z_p$ ).
2. Поворот призмы с платформой вокруг некоторого вектора  $\overline{PR}$  на такой угол  $\beta$ , чтобы нормаль выходной грани прошла через точку Т.
3. Вращение призмы вокруг прямой РТ на такой угол  $\tau$ , чтобы входная грань стала перпендикулярна оси излучения (прямой РМ).

Проведенные расчеты показали, что координаты точки Р ( $x_p, y_p, z_p$ ) определяются по системе (8), а требуемый параметр  $t$  – по выражению (9).

$$\begin{cases} x_p = x_m + t; \\ y_p = y_m - \operatorname{tg}(\alpha - A_H) \cdot t; \\ z_p = z_m + \operatorname{tg}(A_V) \cdot t, \end{cases} \quad (8)$$

$$t = \frac{-x_m + \operatorname{tg}(\alpha - A_H) \cdot y_m - \operatorname{tg}(A_V) \cdot z_m + \operatorname{tg}(A_V) \cdot L_{PT}}{1 + \operatorname{tg}(\alpha - A_H)^2 + \operatorname{tg}^2(A_V)}, \quad (9)$$

где  $L_{PT}$  – расстояние от эталонного положения призмы до целевой точки, определяемое конфигурацией оптической системы.

Координаты вектора  $\overline{PR}$  ( $x_{pr}$ ,  $y_{pr}$ ,  $z_{pr}$ ) определяются по выражению (10), а требуемый угол поворота  $\beta$  – по выражению (11).

$$\overline{PR} = \overline{N} \times \overline{PT} = \begin{pmatrix} 0 \cdot (L_{PT} - z_p) - 1 \cdot (-y_p) \\ 1 \cdot (-x_p) - 0 \cdot (L_{PT} - z_p) \\ 0 \cdot (-y_p) - 0 \cdot (-x_p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_p \\ -x_p \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\beta = \arccos \left( \frac{\overline{N} \cdot \overline{PT}}{|\overline{N}| \cdot |\overline{PT}|} \right) = \arccos \left( \frac{z_{PT}}{\sqrt{x_{PT}^2 + y_{PT}^2 + z_{PT}^2}} \right), \quad (11)$$

где  $\overline{N}$  - орт оси Z.

Требуемый угол поворота призмы  $\tau$  определяется по выражению (12):

$$\tau = \arccos \left( \frac{\overline{OM}_1 \cdot \overline{PM}}{|\overline{OM}_1| \cdot |\overline{PM}|} \right) = \arccos \left( \frac{x_{om1} \cdot x_{pm} + y_{om1} \cdot y_{pm} + z_{om1} \cdot z_{pm}}{\sqrt{x_{om1}^2 + y_{om1}^2 + z_{om1}^2} \sqrt{x_{pm}^2 + y_{pm}^2 + z_{pm}^2}} \right), \quad (12)$$

где ( $x_{om1}$ ;  $y_{om1}$ ;  $z_{om1}$ ) – координаты вектора нормали входной грани призмы после поворота призмы с платформой на угол  $\beta$ , определяемые по выражению (2), причем в правой части подставляются начальные координаты ( $x_{om}$ ;  $y_{om}$ ;  $z_{om}$ ), определяемые положением излучателя в системе.

Разработанный алгоритм, включающий в себя вычисление координат точки положения призмы P, координат вектора  $\overline{PR}$ , угла наклона платформы  $\beta$  и угла поворота призмы  $\tau$  был смоделирован в пакете MatLab. Моделирование показало, что алгоритм автоюстировки верен и позволяет добиться угла между входящей и отраженной осями  $90^\circ$ , при этом отраженная ось пролегает через целевую точку при любых величинах разъюстировок (рис. 9). Многократное моделирование позволило получить поверхность, образованную множеством точек положений призмы при различных величинах разъюстировки, представляющую собой фрагмент сферы с большим кругом, образованным целевой точкой, точкой эталонного положения призмы и точкой положения излучателя (рис. 10).

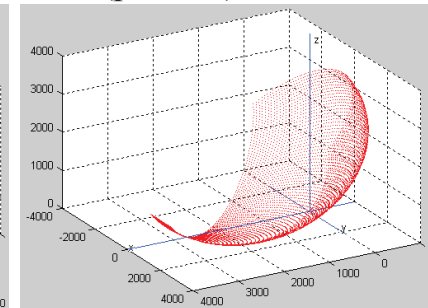
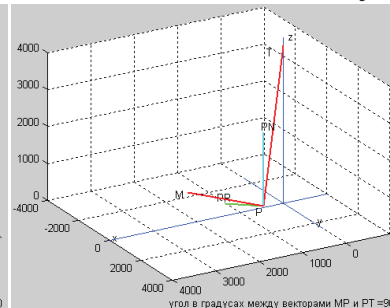
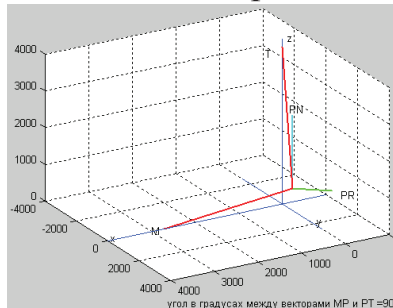


Рис. 9 – Визуализация результатов моделирования алгоритма автоюстировки

Рис. 10 – Фрагмент сферической поверхности

Исследование точности предложенной системы обратной связи проводилось системно, для всех элементов, показанных на рис. 7. Для этого один из излучателей монтировался на электропривод и в ходе исследования задавались угловые перемещения оси излучения. Абсолютная погрешность

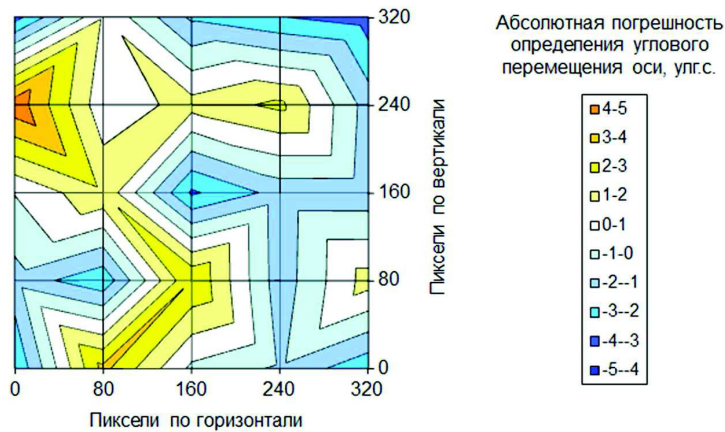


Рис. 11 – Диаграмма абсолютной погрешности системы обратной связи

по площади сенсора скоростной видеокамеры (рис. 11). Максимально значение погрешности обратной связи составило величину 4,68 угл.с, что на порядок меньше приемлемой погрешности оптического коммутатора, поэтому применение предложенной системы главной обратной связи признано адекватным в данной работе.

В третьей части главы проектируется система приводов оптического коммутатора с применением пакета проектирования Siemens Sizer, а также разрабатывается программа пользователя приводного контроллера Siemens Simotion D. При разработке используется модульный подход, позволяющий создавать программу на языке МСС в виде блок-схемы.

В четвертой части главы разрабатывается программа управления оптическим коммутатором, устанавливаемая на персональный компьютер. Разработка ведется в среде программирования Borland Delphi 7. Разработанная программа обеспечивает все требуемые функции коммутатора; реализует в себе алгоритм автоюстировки; предоставляет интерфейс оператора; обеспечивает связь и управление всеми элементами коммутатора.

Разработанное программное обеспечение позволило автоматизировать процесс юстировки излучателей. По сравнению с существующим лазерным комплексом «Тандем» время получения и обработки информации снизилось на 97% (с 900 до 20,041 секунд).

**В четвертой главе** работы проводятся исследования разработанного образца коммутатора в составе созданного экспериментального стенда.

ность рассчитывалась как разница заданного приводу перемещения и перемещения, определенного системой обратной связи.

С помощью юстировочного столика, на котором располагался привод, ось излучения направлялась в различные позиции на полупрозрачном экране, что позволило получить диаграмму абсолютной погрешности



В первой части главы описывается созданный экспериментальный стенд, включающий в себя образец разработанного оптического коммутатора, показанный на рис. 12. Приводятся фотографии, охватывающие весь стенд, а также его отдельные элементы, и даются необходимые пояснения их функций.

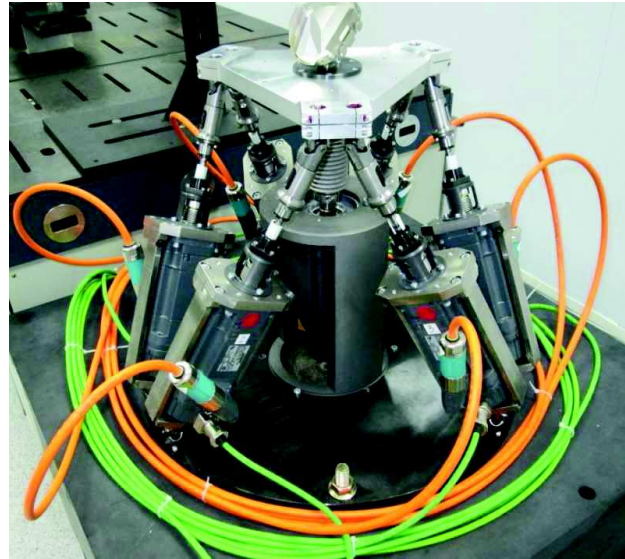


Рис. 12 – Оптический коммутатор

Во второй части главы приводятся результаты экспериментальных исследований, проводившихся по специально разработанной методике.

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

Проведенные испытания режима автоустойчивки показали, что при различных имитируемых разъюстировках излучателя, коммутатор успешно их компенсировал. Наблюдение за световыми пятнами на диффузном экране (миллиметровая бумага, расположенная на расстоянии 6990 мм от излучателя) с помощью IP-камеры позволило получить видеокadres, подтверждающие работоспособность коммутатора, т.к. пятна до автоустойчивки не попадали в центр экрана (рис. 13), а после автоустойчивки – находились в его центре (рис. 14).

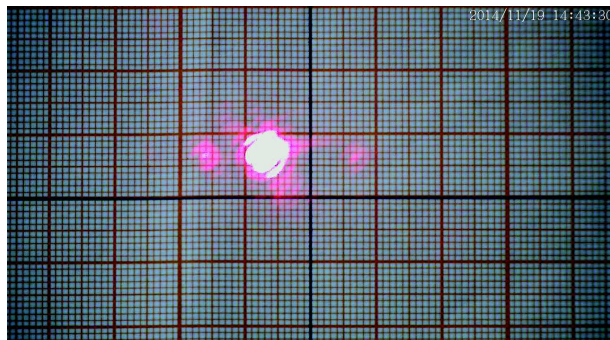


Рис. 13 – Световое пятно разъюстированного излучателя

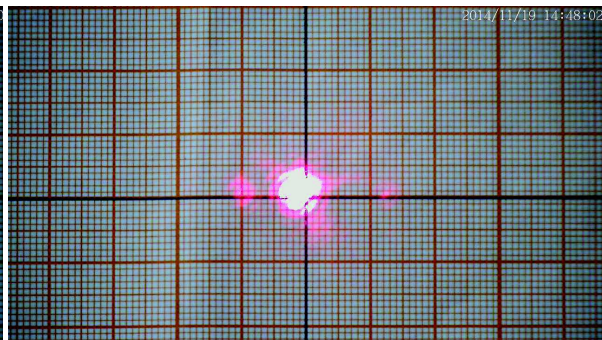


Рис. 14 – Световое пятно после автоустойчивки коммутатором

На протяжении девяти экспериментов имитировались различные разъюстировки, приводившие к смещению светового пятна от центра диффузного экрана (условная целевая точка). При работе оптического комму-

татора в режиме автоюстировки наблюдалась устойчивая компенсация разъюстировок излучателей и попадание световых пятен в центр экрана. Вертикальные и горизонтальные разъюстировки излучателей, наблюдавшиеся до и после автоюстировки, приведены на рис. 15 в виде сравнительных графиков.

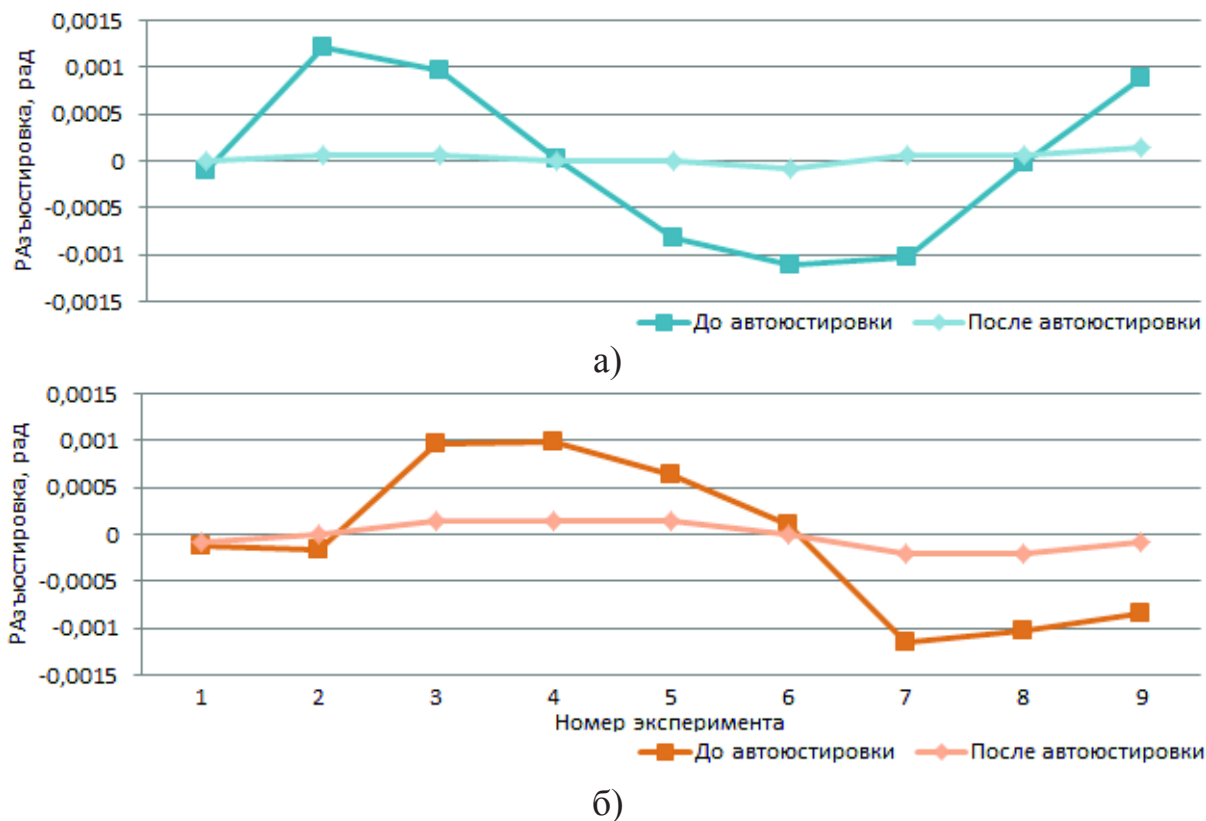


Рис. 15 – Сравнительные графики разъюстировок: а) – горизонтальная; б) – вертикальная

По итогам девяти опытов была получена средняя абсолютная погрешность автоюстировки 0,00015671 рад при наибольшей компенсируемой разъюстировке 5,2895 угл.мин., что удовлетворяет техническим требованиям. В результате проведенного исследования была показана принципиальная возможность переноса в коммутатор функции автоюстировки.

Эксперименты по поднятию частоты опроса излучателей, позволили достигнуть частоты коммутации 23,15 Гц, при этом ограничивающим фактором послужила недостаточная прочность карданных шарниров гексапода. Их замена на более прочные является одним из направлений модернизации коммутатора.

Исследование повышения эффективности работы оптической системы сводилось к сравнению интенсивности световых пятен, получаемых при наличии в системе дополнительной юстирующей оптики и при её отсутствии и применении автоюстировки оптическим коммутатором.

При коммутации излучателей были получены пары световых пятен, для которых, в дальнейшем, были построены объемные диаграммы интенсивности (рис.16). Кроме того были построены сравнительные диаграммы интенсивности пятен, иллюстрирующие сумму интенсивностей пикселей пятна (рис.17).

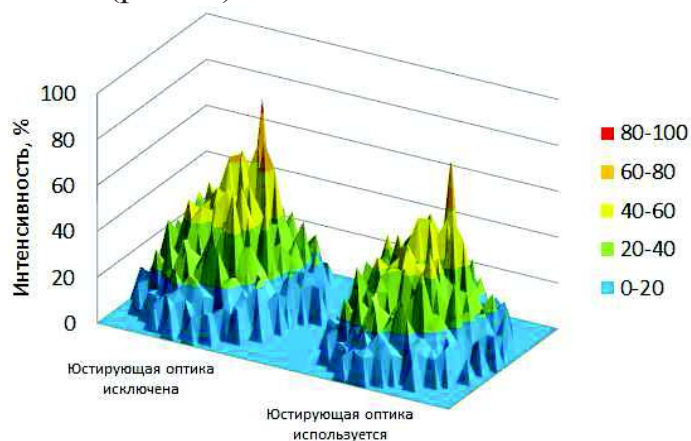


Рис. 16 – Объемная диаграмма интенсивности световых пятен

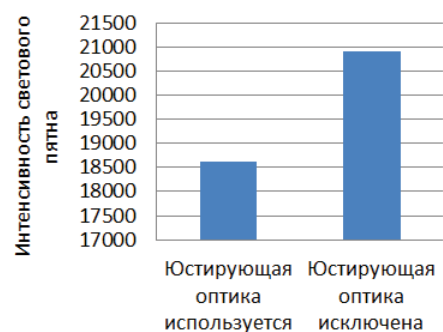


Рис. 17 – Сравнительная диаграмма интенсивности пятен

Сравнительные диаграммы показали, что применение оптического коммутатора и исключение дополнительной юстирующей оптики дает прирост эффективности оптической установки в среднем на 12,91%, что является основной целью данной диссертационной работы.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Сформулирована общая концепция разрабатываемой мехатронной системы и выбрана кинематическая структура исполнительного механизма на основе анализа имеющихся структур.

2. Решена обратная задача кинематики для исполнительного механизма с параллельной кинематикой с учетом процесса автоюстировки. Принципиальная особенность состоит в исключении угла собственного вращения платформы из степеней подвижности гексапода и замене 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.

3. Разработан алгоритм автоюстировки излучения, позволяющий системе приводов исполнительного механизма компенсировать разъюсти-

ровки излучателей оптической установки, а также предложена система главной обратной связи, базирующаяся на скоростной видеосистеме.

4. Показано, что для видеоанализа, определения разъюстировок, расчета и осуществления необходимых юстирующих перемещений разработанное программное обеспечение затрачивает 20,041 с, что на 97% меньше времени, затрачиваемого в существующем лазерном комплексе. Спроектирована система приводов в среде разработки Siemens Sizer, позволившей максимально эффективно подобрать и скомпоновать составные элементы, а также провести необходимые расчеты производительности.

5. Проведено моделирование уравнений кинематики и алгоритма автоюстировки оптического коммутатора в среде MatLab и Simulink с применением 3D-визуализации результатов. Подтверждена корректность и работоспособность разработанных уравнений и алгоритма.

6. В процессе испытаний разработанной мехатронной системы 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 Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, что подтверждается актами внедрения, приведенными в приложении Е и приложении Ж соответственно.

**Приложения** включают в себя материалы, не вошедшие в основные разделы диссертационной работы ввиду значительного объема.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Кобзев, А.А. Формирование главной обратной связи в системе автостировки на базе оптического коммутатора для многоканальных лазерных комплексов / А.А. Кобзев, Ю.С. Потанин // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9–2. – с. 262-266. (5 с./4 с.)

2. 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](http://www.science-education.ru/117-13641) (дата обращения: 25.02.2015). (8 с./8 с.)

3. Потанин, Ю.С. Испытания оптического коммутатора на базе привода с параллельной кинематикой / Ю.С. Потанин, А.А. Кобзев, А.Г. Сеньюшкин // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 6. URL: [www.science-education.ru/120-17088](http://www.science-education.ru/120-17088) (дата обращения: 25.02.2015). (8 с./7 с.)

**В прочих изданиях:**

4. Кобзев, А.А. Анализ вариантов кинематики привода оптического коммутатора многоканальных лазерных систем / А.А. Кобзев, Ю.С. Потанин // *Молодежь. Техника. Космос: труды V Общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 20-22 марта 2013 года*. – СПб.: БГТУ, 2013. – с.146-148. (3 с./2 с.)

5. Кобзев, А.А. Привод перспективного оптического коммутатора многоканальных лазерных систем / А.А. Кобзев, Ю.С. Потанин // *Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники: материалы III всероссийской научно-технической конференции, Владимир, 14-16 ноября 2013 г.* – М.: Издательство РАН, 2012. – с. 99-101. (3 с./2 с.)

6. Потанин, Ю.С. Моделирование оптического коммутатора на базе привода с параллельной кинематикой / Ю.С. Потанин // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 16–17 октября 2014 г.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – с. 177. (1 с./1 с.)

7. Потанин, Ю.С. Перспективный модуль коммутации оптического излучения на базе гексапода / Ю.С. Потанин, А.А. Кобзев // *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 30-31 октября 2012 г.* – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – с. 162. (1 с./0,5 с.)

Подписано в печать 26.01.16.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 70 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.