

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова»

На правах рукописи

ЗУБКОВА ЮЛИЯ ВАЛЕРЬЕВНА

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами (в машиностроении и приборостроении)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор  
Турыгин Ю. В.

Ижевск, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Предпосылки развития, современное состояние теории и практики процесса позиционирования электронного луча при ЭЛС.....	13
1.1 Особенности процесса ЭЛС.....	13
1.1.1 Процесс позиционирования электронного луча при ЭЛС.....	15
1.1.2 Системы для совмещения ЭП со стыком свариваемого изделия.....	18
1.1.3 Управление процессом ЭЛС.....	20
1.2 Автоматизированный электронно-лучевой технологический комплекс (АЭЛТК).....	22
1.3 Параметры, влияющие на обеспечение точности позиционирования при ЭЛС.....	26
1.4 Полная погрешность мехатронного модуля движения.....	29
1.5 Постановка задач исследования.....	32
2. Модель процесса позиционирования ЭЛ при ЭЛС.....	35
2.1 Критерии точности позиционирования ЭЛ.....	35
2.2 Обеспечение критериев точности позиционирования ЭЛ.....	37
2.3 Физическая модель управления процессом позиционирования выходного звена АЭЛТК.....	44
2.3.1 Построение кинематической модели многозвенных исполнительных механизмов ММД на основе кинематического инварианта....	46
2.3.2 Построение динамической модели многозвенных исполнительных механизмов ММД на основе динамического инварианта.....	48
2.3.3 Построение динамической модели многозвенных исполнительных механизмов ММД методом Лагранжа – Эйлера.....	50
2.4 Математическая модель процесса позиционирования ЭЛ.....	54
2.5 Формализация задачи управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС.....	59

2.6 Управление процессом позиционирования ЭЛ при ЭЛС на основе учета погрешностей мехатронных модулей АЭЛТК.....	63
2.6.1 Постановка задачи управления процессом позиционирования ЭЛ..	63
2.6.2 Разработка структурной схемы системы управления процессом позиционирования ЭЛ.....	65
2.6.3 Синтез регулятора при управлении процессом позиционирования ЭЛ по стыку.....	71
2.7 Выводы по главе.....	73
3. Экспериментальное исследование точности позиционирования выходного звена мехатронной системы при ЭЛС.....	76
3.1 Методика проведения экспериментального исследования.....	76
3.1.1 Планирование эксперимента.....	79
3.1.2 Используемое оборудование и последовательность проведения эксперимента .....	83
3.1.3 Определение величины полной погрешности выходного звена экс- периментальной установки .....	91
3.2 Обсуждение результатов экспериментов.....	96
3.3 Выводы по главе.....	101
4. Практическая реализация результатов исследования.....	103
4.1 Методика обеспечения точности позиционирования ЭЛ при ЭЛС...	104
4.1.1 Расчет полной погрешности манипулятора ЭЛП.....	104
4.1.2 Определение динамической погрешности исполнительных устройств манипуляторов АЭЛТК.....	111
4.2 Определение параметров, обеспечивающих критерии позиционирования ЭЛ по стыку.....	112
4.3 Выводы по главе.....	115
Основные выводы и результаты.....	116
Литература.....	119
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	132

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного производства требует постоянного повышения качества ответственных изделий, получаемых путём применения технологий электронно-лучевой сварки. Это требование выдвигается с целью, как максимального снижения издержек производства, так и увеличения срока службы данных изделий.

В настоящее время особое внимание уделяется сварке ответственных изделий, силовых и высоконагруженных узлов авиационных и ракетных двигателей, диафрагм паровых турбин, элементов теплообменных установок и т.д. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) нашла широкое применение в таких областях промышленности как авиадвигательная, ракетостроение, судостроение, атомной энергетике, энергетическом машиностроении, электровакуумное, приборное и релейное производство, автомобильная промышленность.

ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями [52,59]. Являясь разновидностью наиболее распространенного в технике способа сварки плавлением, ЭЛС вместе с тем качественно отличается от всех ранее известных методов сварки. Эти отличия обусловлены главным образом применением нового мощного концентрированного источника тепла, практически полным отсутствием газов, окружающих зону сварки, возможностью точной регулировки и управления процессом.

Для получения высококачественных сварных соединений необходимы установки для ЭЛС, представляющие собой сложный комплекс, в который входят прецизионное электромеханическое, высокопроизводительное вакуумное и мощное энергетическое оборудование [8,65]. Электромеханическое оборудование представлено устройствами перемещения электронно-лучевой пушки и заготовки. С целью обеспечения подвижности пушки и заготовки используют различные манипуляторы, являющиеся исполнительными механизмами меха-

тронных модулей движения (ММД) в составе автоматизированного электронно-лучевого технологического комплекса (АЭЛТК).

Широкомасштабные и систематические исследования процесса точного наведения электронного луча на стык при ЭЛС в нашей стране начались ещё в 60-е годы XX-го века, но пик развития ЭЛС в РФ и республиках бывшего СССР пришелся на 80-е годы, когда мощные отраслевые институты НИАТ (авиационной промышленности), НИКИМТ (среднего машиностроения), «Орион», ЦНИИМ, НИТИ «Прогресс» (оборонной промышленности), НИИЭИО (электронной промышленности), ВЭИ, ВНИИЭСО (электротехнической промышленности), НПО «Техномаш» (Москва), ЦНИИ КМ «Прометей» (судостроительной промышленности), ИЭС им. Е.О. Патона АН Украины [64,65], «Steigerwald Strahltechnik» (Германия), ряд академических институтов, ВУЗы (МЭИ, МВТУ, ЛЭТИ, ИЯФ СО РАН г. Новосибирск, СИЦЭЛТ г. Красноярск [93], ЛПИ и др.), заводы в г. Ржев, Казань, Саратов (Россия), Сумы (Украина), Сморгонь (Белоруссия) активно разрабатывали и производили универсальное и специализированное оборудование, исследовали физические процессы при ЭЛС и особенности сварки различных материалов, создавали технологии высокопрецизионной сварки с внедрением мехатронных модулей движения в составе АЭЛТК [76,121,123].

Вопросы технологии ЭЛС рассмотрены в работах отечественных учёных Е. О. Патона, О.К. Назаренко, Н.М. Бронштейн, В.Д. Лаптёнок, В.А. Кривенков, Н.Н. Рыкалин, Е.Л. Мамутов, К.С. Акопьянц, Ю.Н. Пастушенко, А.В. Мурыгин, В.Я. Браверман, Г.А. Спыну, В.М. Язовских и других [7,60,69,77].

Вопросам повышения качества сварных соединений и исследованию точности позиционирования электронного луча при ЭЛС посвящены работы Н.А. Ольшанского, В.Д. Лаптёнка, В.В. Башенко, В.А. Сорокина, В.Я. Беленького, С.Г. Баякина, А.Г. Кроза, Е.Н. Бани, В.В. Башенко, В.Б. Вихмана, В.Н. Смирнова, зарубежных учёных Ф. Карселя, Ж. Анжели, Ж. Делора (Франция), К. Ха-

ра (Япония), Ю. Фрозьен, Х. Решне, Р. Дитрих, К.-Р. Шульце (Германия) и других [9,10,11,44,119,124].

Манипуляционные механизмы электронно-лучевой пушки и заготовки можно отнести к мехатронным модулям движения, исследование точности позиционирования которых основывается на работах Подураева Ю.В., Судника Ю.А., Егорова О.Д., Вострикова А.С., Гуревича Ю.Е., Ющенко А.С., Фролова К.В., Воробьёва Е.И., Юревича Е.И. и др. [41,42,54,79,80,81,107,108,109]. Эти работы легли в основу обоснования выбранных критериев обеспечения точности позиционирования и построения математического аппарата, применяемого при обеспечении заданной точности позиционирования современных ММД.

С развитием технических средств автоматизации производства всё большее внимание уделяется исследованию и обеспечению точности позиционирования манипулятора, с которой он выполняет свою рабочую функцию, например, отработка рабочим органом манипулятора некоторой траектории с заданной степенью точности. Рабочим органом манипулятора является электронно-лучевая пушка и/или свариваемая заготовка.

Под процессом позиционирования в данной работе понимается наведение и перемещение выходного звена мехатронной системы (МС) по заданной траектории. МС компонуется на базе двух и более мехатронных модулей АЭЛТК и представлена совокупностью ММД.

Погрешность отработки траектории – это отклонение фактической траектории рабочего органа от траектории, заданной программой движения. Оработка траектории исполнительным устройством МС может осуществляться по заранее заданной программе без каких-либо корректирующих воздействий. Тем самым достигнуть необходимой точности не всегда удаётся. Применение системы контроля за положением выходного звена [50,62] является обязательным при существенных термических или иных деформациях изделия (в процессе сварки) или когда требуется получить высокую точность позиционирования. Однако применение современных контролирующих систем не всегда позволяет

осуществлять процесс позиционирования выходного звена МС с заданной степенью точности и в реальном масштабе времени. При больших отклонениях рабочего органа ММД от желаемой траектории вследствие разного рода погрешностей система управления позиционированием «не успевает» обрабатывать сигналы рассогласования и осуществлять соответствующие воздействия для коррекции положения рабочего органа, поэтому задача обеспечения высокой точности позиционирования в данном технологическом процессе является актуальной. Этому вопросу и посвящена настоящая диссертационная работа.

Таким образом определена **цель исследования**: развитие алгоритмов управления точностью позиционирования электронного луча как средство повышения качества сварных соединений, получаемых методом ЭЛС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ и обосновать причины возникновения погрешностей в процессе позиционирования электронного луча на основе полной ошибки механических модулей движения, входящих в состав АЭЛТК, и установить критерии обеспечения точности позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС.

2. Разработать математическую модель процесса позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС, учитывающую полную погрешность ММД АЭЛТК и включающую в себя обеспечение критериев позиционирования ЭЛ.

3. Разработать алгоритм управления процессом позиционирования электронного луча при ЭЛС с учётом определяемых кинематических и динамических характеристик технологического оборудования АЭЛТК.

4. Провести экспериментальное исследование проверки работоспособности разработанной модели процесса позиционирования ЭЛ при ЭЛС.

5. Разработать методику обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС.

**Область исследования.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» с пунктами «2. Автоматизация контроля и испытаний», «3. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.», «4. Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация».

**Объектом исследования** является процесс позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС.

**Предметом исследования** является модель управления процессом позиционирования электронного луча при ЭЛС с учётом кинематических и динамических характеристик сварочного технологического оборудования АЭЛТК.

В работе для решения задач использовались **методы исследования**: теория автоматического управления, методы системного анализа, научные основы технологии машиностроения, численные методы решения интегро-дифференциальных уравнений, тензорных исчислений, математическая статистика, теория эксперимента, математического и компьютерного моделирования.

**Методические основы диссертации** базируются на: анализе существующих методов обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС; теоретическом исследовании процесса позиционирования ЭЛ по стыку с учетом геометрии стыка и технических характеристик исполнительных механизмов АЭЛТК; экспериментальном исследовании процесса позиционирования ЭЛ по стыку; вероятностной оценке результатов экспериментального исследования; сравнительной оценке и эффективности применения разработанной модели позиционирования ЭЛ при ЭЛС с целью повышения качества изделий; разработке алгоритма управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку на основе предложенной модели.

### **Научная новизна результатов исследования:**

1. Определены критерии обеспечения точности позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС.
2. Разработана математическая модель процесса позиционирования электронного луча при отработке заданной траектории с учётом кинематических и динамических погрешностей ММД в составе АЭЛТК.
3. Предложен алгоритм управления процессом позиционирования электронного луча при ЭЛС на основе разработанной математической модели, учитывающий кинематические и динамические характеристики электромеханического оборудования АЭЛТК.
4. Разработана структурная схема автоматизированной системы управления при ЭЛС на основе учета погрешностей ММД АЭЛТК, отличающаяся тем, что она замкнута по определяемым критериям обеспечения точности.
5. Экспериментально установлено, что применение предложенной модели позволяет повысить точность позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС. Экспериментальные зависимости показывают закономерности изменения положения ЭЛ от линейной скорости и массы рабочего органа манипулятора с учетом кинематической и динамической погрешностей исполнительных устройств.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Установлены зависимости точности позиционирования ЭЛ от кинематических и динамических характеристик объекта управления. Доказана возможность повышения точности позиционирования на основе учета погрешностей исполнительных устройств АЭЛТК.
2. Предложена методика выбора параметров, определяющих положение электронного луча, на основе разработанной математической модели процесса позиционирования ЭЛ по сварному стыку при ЭЛС, учитывающей кинематические и динамические параметры сварочного технологического оборудования АЭЛТК, что позволяет повысить точность сварочных операций в среднем в 2 раза при ЭЛС в режиме реального времени.

3. Теоретические и практические результаты работы использованы при подготовке методических материалов по дисциплинам «Механика и технологии», «Информационные устройства и системы в мехатронике», «Основы автоматизированного проектирования технических систем», «Механика роботов и мехатронных модулей» в ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенные критерии обеспечения точности позиционирования ЭЛ при перемещении луча по стыку позволяют учитывать особенности объекта исследования и формализовать выводы об обеспечении заданной точности позиционирования ЭЛ при ЭЛС (*соответствуют п. 3 паспорта специальности*).

2. Модель процесса позиционирования электронного луча при отработке заданной траектории сварного стыка как объекта управления может быть построена на основе учета кинематических и динамических характеристик манипуляторов АЭЛТК (*соответствует п. 3 и п. 4 паспорта специальности*).

3. Алгоритм управления процессом позиционирования электронного луча при ЭЛС на основе разработанной математической модели позиционирования с учетом кинематических и динамических погрешностей технологического оборудования АЭЛТК. (*соответствует п. 2 и п. 3 паспорта специальности*).

4. Результаты экспериментального исследования процесса позиционирования ЭЛ при ЭЛС, подтверждающие работоспособность предложенной модели на основе контроля положения ЭЛ на стыке свариваемых изделий с учетом возникающих погрешностей манипуляторов ЭЛП и изделия (*соответствует п. 2 и п. 3 паспорта специальности*).

5. Методика определения полной погрешности электромеханического оборудования АЭЛТК, приведенной к выходному звену манипулятора, для обоснованного выбора параметров, определяющих положение ЭЛ, с целью обеспечения заданной точности позиционирования ЭЛ при ЭЛС (*соответствует п. 3 паспорта специальности*).

**Достоверность научных положений и результатов** обеспечена корректностью постановки задачи, обоснованностью использованных теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов; подтверждается работоспособностью математической модели, сравнительным анализом результатов, полученных при научном обосновании и в результате экспериментальных исследований.

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами» (Уфа, Россия, 2011), XIV и XV Международных конференциях по мехатронике «Mechatronika-2011» и «Mechatronika-2012» (Прага, Чешская республика, 2011-2012), V Всероссийской конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (Санкт-Петербург, Россия, 2012), VII Международной научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли» (Новоуральск, Россия, 2012), II и III Всероссийских научно-технических конференциях аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые учёные – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» (Ижевск, Россия, 2013, 2015), а также на научных семинарах кафедры «Мехатронные системы» ИжГТУ имени М.Т. Калашникова (2009-2015).

**Публикации.** Основные положения, изложенные в диссертации, опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, «Вестник ИжГТУ», «Интеллектуальные системы в производстве» и «Мехатроника, автоматизация, управление».

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка из 131 наименования и приложений. Объём работы составляет 133 страницы, включая 28 иллюстраций и 11 таблиц. В приложениях приведены акты использования результатов работы.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ уровня теории

и прикладных исследований технологии ЭЛС и процесса позиционирования ЭЛ по сварному стыку, выявлены особенности оборудования, используемого при ЭЛС, определены параметры, влияющие на обеспечение точности позиционирования ЭЛ, проведен анализ погрешностей ММД в составе АЭЛТК, сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена выбору и обоснованию критериев обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС, разработке математической модели процесса позиционирования ЭЛ на основе учета кинематической и динамической погрешностей ММД механической части АЭЛТК, особенностям построения кинематической и динамической моделей, а также разработке алгоритма управления процессом позиционирования ЭЛ на основе разработанной модели.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию процесса позиционирования ЭЛ и оценке влияния полной погрешности ММД на точность отработки траектории сварного стыка выходным звеном манипулятора. Проведено планирование экспериментов, оценена их точность и представлены результаты экспериментов. Проведенные исследования подтвердили, что реализация управления процессом позиционирования ЭЛ при ЭЛС на основе разработанной математической модели позволила повысить точность позиционирования ЭЛ по стыку в среднем в 2 раза при сохранении стабильности процесса.

В четвертой главе представлена методика определения полной погрешности электромеханического оборудования АЭЛТК, приведенной к выходному звену манипулятора, для обоснованного выбора параметров, определяющих положение ЭЛ, с целью обеспечения заданной точности позиционирования ЭЛ при ЭЛС. Разработанная методика расчета кинематической и динамической погрешностей реализует результаты проведенных исследований процесса позиционирования ЭЛ по стыку с учетом режимов ЭЛС.

В заключение работы приведена общая характеристика работы и основные выводы по результатам диссертации.

# **1. ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗВИТИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ПРОЦЕССА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ПРИ ЭЛС**

## **1.1 Особенности процесса ЭЛС**

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до 400 мм.

Наиболее перспективным является соединение деталей из термически упрочненных материалов, когда затруднена или не возможна последующая термообработка. Максимальная пластичность и вязкость сварных соединений, минимальные сварочные деформации позволяют также успешно использовать ЭЛС при изготовлении изделий после завершающей механической обработки.

Электронно-лучевые сварочные установки (ЭЛСУ) состоят из двух основных комплексов - энергетического и электромеханического [69,72]. Энергетический комплекс предназначен для формирования пучка электронов с заданными параметрами, которые определяются толщиной, теплофизическими характеристиками свариваемых материалов и требованиями к коэффициенту формы проплавления. Электромеханический комплекс предназначен для герметизации и вакуумирования рабочего объема, обеспечения взаимного перемещения электронного луча и свариваемого изделия и управления всеми этими процессами. Функциональная схема установки для ЭЛС представлена на рисунке 1.1.

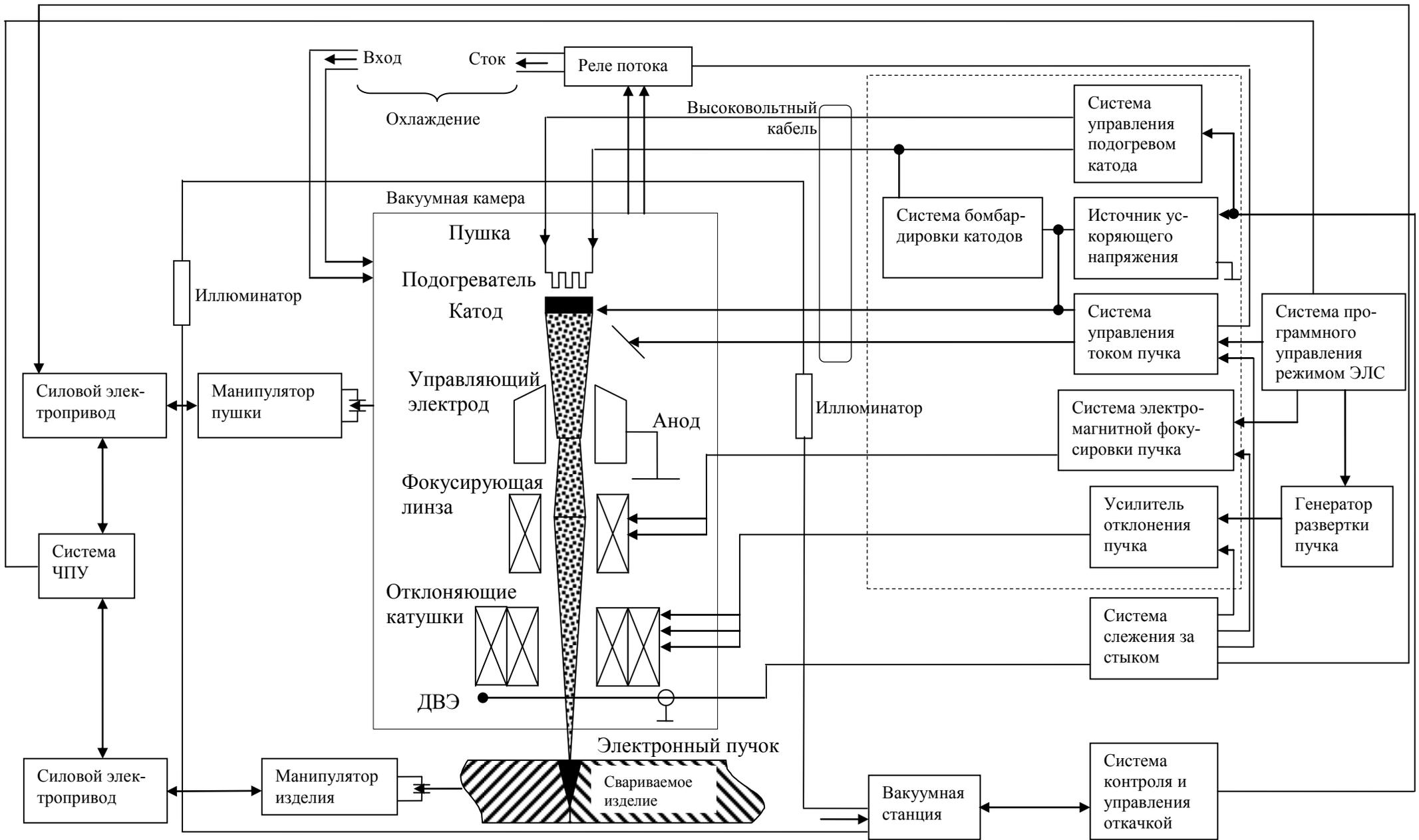


Рисунок 1.1 - Функциональная схема установки для ЭЛС: ЧПУ - числовое программное управление; ДВЭ – датчик вторичных электронов

Процесс ЭЛС характеризуется высоким КПД, достигающим 90%. Аксиально-симметричный электронный пучок (ЭП) имеет высокую концентрацию энергии в поперечном сечении и малый диаметр (0,01–1 мм), а сварные швы соответственно большую глубину и малую ширину. Отношение глубины к ширине шва достигает 50. Сварку выполняют за один проход со сравнительно высокой скоростью. Размеры, конфигурация и качество формирования швов при ЭЛС определяются устойчивостью, формой и размерами парового канала сварочной ванны, которые в свою очередь зависят от мощности, эффективного радиуса, угла сходимости луча, положения фокального пятна луча, пространственного положения стыка, теплофизических свойств металла и скорости сварки.

Электронный луч (ЭЛ) является практически безинерционным источником тепловой энергии. Возможность тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения луча на поверхности изделия позволяет широко использовать системы управления лучом (наведение на стык, слежение за стыком) и программирования режимов сварки.

Однако в настоящее время к точности позиционирования луча по стыку в процессе ЭЛС предъявляются повышенные требования, что связано с требованиями высокого качества и надёжности сварных соединений в ответственных конструкциях, таких как, например, диски с пространственными лопатками (паровые турбины) и т.п. В связи с тем, что качество сварного шва при ЭЛС определяется совокупностью трудноуправляемых технологических и энергетических параметров [52,65,84], всё ещё существует ряд нерешённых задач [52,85] в управлении лучом при слежении за стыком в процессе сварки.

### **1.1.1 Позиционирование электронного луча при ЭЛС**

Малая ширина сварного шва и большое отношение глубины и ширины шва требуют точного совмещения пучка электронов с плоскостью сты-

ка/сварного шва. Погрешность позиционирования зависит от ширины зазора, толщины деталей, ширины шва в его корне и обычно не должна превышать  $\pm 0,1 - 0,2$  мм, а для микросварки – менее  $\pm 0,05$  мм [65].

Процессы, протекающие при ЭЛС, очень сложны. В силу этого полученные различными исследователями модели расчета параметров сварных швов могли быть использованы лишь для ориентировочных расчетов, а выбор параметров процесса осуществлялся на основе экспериментальных исследований [52,59,65,69,84].

Под позиционированием ЭЛ в данной работе понимаем наведение и перемещение луча по стыку в процессе сварки с заданной степенью точности.

Процесс позиционирования электронного луча при ЭЛС можно рассматривать в двух режимах:

1. Обучение: запоминание положения стыка свариваемых изделий перед началом процесса ЭЛС.

2. Слежение за стыком: в процессе ЭЛС в режиме реального времени.

Необходимо различать позиционирование ЭЛ по стыку до начала процесса ЭЛС – точное наведение электронного луча на стык с использованием одной из систем наведения – и непосредственно в процессе сварки – перемещение фокального пятна нагрева ЭЛ по стыку с заданной точностью.

1. Перед началом процесса сварки целесообразно проводить операцию обучения, то есть нахождения опорных точек свариваемого стыка. Реальная траектория луча отслеживается системой управления ещё до начала процесса сварки при предварительном проходе. В автоматическом или полуавтоматическом режиме осуществляется поиск стыка до начала сварки и запоминание опорных точек стыка. Этот метод удобен на всех этапах сварки: прихватке, непосредственно сварке, выполнении косметического шва и последующей термообработке. Такие системы называют *off-line*-системы [65,92,96,125].

Однако подобные системы имеют ряд недостатков. Во-первых, увеличивается общее время сварки изделия за счет обучающего прохода (поиска сты-

ка). Это критично при сварке протяженных швов с низкой скоростью. Во-вторых, при сварке протяженных швов мало жестких конструкций вследствие тепловых деформаций в процессе сварки происходит искажение траектории стыка, поэтому данный подход оказывается не эффективным, так как стык меняет свою траекторию уже после того, как в память системы управления установкой была занесена его траектория. При этом ЭЛ, следуя согласно программе по траектории стыка, может отклониться в сторону настолько, что не произойдет сварки стыка на всю его глубину, т.е. возникнет вероятность образования дефекта «непровар» [50,52].

Это становится особенно важно, когда визуализация стыка затруднена или практически невозможна, например, при выполнении сварки внутри глубокого стакана или с внутренней поверхности свариваемого изделия, или когда применяются электронно-лучевые пушки (ЭЛП) без аксиальной системы наблюдения (в том числе внутрикамерные ЭЛП).

2. Для повышения производительности процесса сварки, качества изделий и избежания получения дефектов сварных швов, характерных для *off-line*-системы, необходима максимально полная информация о положении стыка в текущий момент времени в ходе сварки. Это достигается применением так называемых *on-line*-систем или систем слежения [65,92,96,125,128].

Первоначально наведение ЭЛ на стык в процессе сварки осуществлялось оператором ЭЛСУ вручную с помощью оптической системы. Применение следящей системы [52,60,64,76] стало обязательным в основном при существенных термических деформациях изделия в процессе сварки, когда предварительное обучение сварочного перемещения уже не обеспечивает точного совмещения пучка электронов с линией стыка в процессе сварки.

Особенностью технологии ЭЛС является то, что визуальное наблюдение за процессом сварки и, соответственно, процессом позиционирования электронного луча по стыку затруднено. Высокая скорость сварки, деформации свариваемых изделий в процессе сварки, ограниченные возможности визуаль-

ного наблюдения за процессом сварки создают трудности в управлении процессом позиционирования электронного луча по стыку в процессе ЭЛС.

В связи с этим необходимо распознавать сварной стык с использованием автоматизированных устройств наблюдения. Поэтому слежение за сварным стыком и его распознавание осуществляется с помощью систем наблюдения, в которых реализованы различные подходы к решению подобного рода задач.

### **1.1.2 Системы для совмещения электронного пучка со стыком свариваемого изделия**

Пучок электронов совмещать с линией стыка можно с помощью одной или двух отклоняющих систем, а также путём относительного смещения изделия и электронной пушки. Относительное следящее перемещение изделия и/или электронной пушки весьма эффективно, хотя динамические и точностные характеристики данной следящей системы уступают таковым в случае электромагнитного управления положением пучка.

Автоматическое слежение за стыком при ЭЛС было введено в промышленную эксплуатацию после двадцатилетних исследований, что объяснялось трудностью аппаратной реализации этого способа, а, следовательно, трудностью достижения надежности функционирования подобных систем. Значительные исследования в этом направлении проведены в Институте электросварки (ИЭС) имени Е.О. Патона (Украина), Сумском производственном объединении «Электрон», НПО «Техномаш», Воронежском политехническом институте, фирмах «Сиаки» (Франция), «Гамильтон стандарт» (США), «Геркулес», «Штайгервальд» (ФРГ), «Мицубиси дэнки», «Итами сейсакусе» (Япония) [11,18,52,60,121,124].

Для наведения и позиционирования электронного пучка относительно стыка были использованы различные методы. Классификацию подобных систем

принято проводить по типу датчика положения стыка [45,59,65]. Основные типы систем наведения электронного пучка на стык:

- механический датчик стыка (щуп);
- электромагнитный датчик положения стыка на базе дифференциального феррозонда;
- оптические преобразователи, состоящие из матрицы фоторезисторов;
- промышленные телевизионные установки;
- вторично-эмиссионный датчик положения;
- рентгеновский датчик положения.

В настоящее время для позиционирования электронного луча и наблюдения за процессом сварки наиболее эффективно используют вторичную эмиссию из зоны воздействия пучка, а также значительные исследования проведены по использованию рентгеновского датчика положения стыка [59,65].

Растровые телевизионные устройства позволяют позиционировать электронный пучок и осматривать поверхность шва и прилегающую зону на экране телевизионной установки или персонального компьютера, (система наблюдения «Растр-3», «Прицел-2» (Украина), а также производить распознавание криволинейного стыка (системы слежения типа «Растр-4», ИЭС им. Е.О. Патона, Украина) [52,117]. Однако такие системы обладают низкой помехоустойчивостью, установка защиты (экранирование, дополнительные каналы информации) приводит к частичной потере информации.

Таким образом, в результате анализа процесса позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС выявлены два основных подхода: в режиме обучения (до начала процесса сварки) и в режиме слежения за стыком по обратной связи (в процессе ЭЛС). Установлено, что в режиме обучения не учитывается изменение траектории сварного шва в результате тепловых деформаций, поэтому данный подход является неэффективным при значительной протяжённости сварного шва. Следящие системы также имеют ряд недостатков, что накладывает ограничения на их применение. Получение данных о положении стыка в следящих системах

осуществляется по обратной связи, в результате чего система управления (СУ) способна вырабатывать соответствующее управляющее воздействие для корректировки положения ЭЛ по стыку. В связи с этим остаются нерешёнными задачи, связанные с уменьшением времени реакции СУ и учётом характеристик оборудования сварочного комплекса.

Для обеспечения синхронизации и стабильности технологических процессов СУ представляет собой гибкую модульную систему управления, которая должна быть эффективна для сложных крупногабаритных сварочных установок [21,43,65,72].

### **1.1.3 Управление процессом ЭЛС**

Отсутствие реальных возможностей точного и полного контроля процесса ЭЛС обуславливает разработку новых подходов к обеспечению высокой надёжности и воспроизводимости этого сложного технологического процесса. Становится необходимым создание различных устройств контроля, наблюдения и программного управления в каждой функциональной системе сварочной установки, в особенности в серийном производстве при сварке крупногабаритных изделий.

Системы управления в установках для ЭЛС должны решать множество задач, среди которых есть повышение качества сварных соединений за счёт программного и автоматического управления быстротекущим многопараметрическим и плохонаблюдаемым процессом сварки [52].

Система управления позволяет осуществлять:

- Контроль, диагностику и запись параметров сварочной пушки, геометрии электронного пучка, технологического процесса сварки и термообработки.
- Программное управление:
  - режимами сварки и термообработки;
  - траекторией и скоростью манипулятора.

- Автоматическое управление:
  - вакуумной системой;
  - **поиском стыка;**
  - **слежением за стыком** (прямолинейным, криволинейным и типа трубка-трубная доска);
    - **записью и многократным воспроизведением траектории свариваемого или сваренного стыка;**
    - **фокусировкой электронного пучка.**
- Телевизионное наблюдение во вторичной электронной эмиссии за рабочей зоной сварки и термообработки.
- Управление:
  - статическим и периодическим отклонением электронного пучка с однократным и двукратным преломлением;
  - электронным поворотом осей отклонения отклоняющей системы электронной пушки;
  - асинхронными двигателями манипулятора [52,73,74].

Каждая из выделенных задач требует определенного набора средств и технологических приемов в зависимости от специфики конкретного технологического процесса ЭЛС. В научно-технической литературе [15,19,23,47,70,78] вышеперечисленные задачи рассматриваются как самостоятельные направления исследований, однако в технологическом процессе они взаимосвязаны. Эти задачи определяют область управления процессом позиционирования ЭЛ и могут быть реализованы на установках для ЭЛС, представляющих собой сложный комплекс.

## 1.2 Автоматизированный электронно-лучевой технологический комплекс (АЭЛТК)

Высокая скорость сварки (до 30 мм/с) и ограниченные возможности визуального наблюдения создают трудности оператору в управлении, как процессом сварки, так и процессом позиционирования ЭЛ. Поэтому стремление к максимальной автоматизации ЭЛС вполне закономерно [52,53,75,91].

Современный автоматизированный электронно-лучевой технологический комплекс (АЭЛТК) включает в себя следующие системы, обеспечивающие позиционирование ЭЛ по стыку:

- фокусирующая система (1);
- отклоняющая система (2);
- электромеханический комплекс (вспомогательное технологическое оборудование) (3).

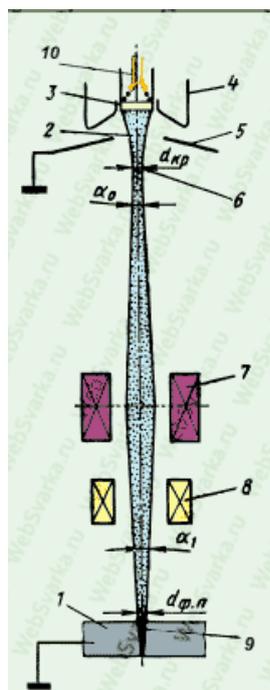


Рисунок 1.2 – Схема электронно-оптической системы: 1 - изделие; 2 - электронный луч; 3 - катод; 4 - прикатодный управляющий электрод; 5 - анод; 6 - кроссовер; 7 – фокусирующая магнитная линза; 8 - система отклонения пучка; 9 - фокусное пятно;  $\alpha_0$  - половинный угол расхождения луча;  $\alpha_1$  - половинный угол сходимости луча на изделии;  $d_{кр}$  - диаметр кроссовера;  $d_{фп}$  - диаметр луча в фокусе.

1. **Фокусирующая система** обеспечивает формирование изображения катода (кроссовера) на стыке свариваемых деталей. Управление степенью фокусировки пучка осуществляют путем регулируемого изменения тока, поступающего к фокусирующей магнитной линзе (позиция 7, рисунок 1.2)

2. **Отклоняющая система** ориентирует сформированный электронный пучок в пространстве (позиция 8, рисунок 1.2).

Функции отклоняющей системы:

1. Установка луча на стык или некоторая корректировка его положения относительно стыка.

2. Перемещение луча вдоль оси стыка при выполнении сварного шва.

3. Периодическое отклонение луча при сварке с поперечными или продольными колебаниями луча.

4. Слежение за стыком во время сварочной операции.

Основное предназначение отклоняющей системы – это получение пятна нагрева круглой формы.

3. **Электромеханический комплекс** предназначен для выполнения всех сварочных, установочных и транспортных перемещений свариваемых изделий и электронной пушки.

В состав комплекса входят:

- манипулятор электронной пушки;
- манипуляторы и/или устройства перемещения свариваемого изделия;
- соответствующие системы электропитания и управления.

Как правило, в качестве манипуляторов свариваемого изделия применяют сменные манипуляторы: двухкоординатные столы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, вращатели с горизонтальной, вертикальной, наклонной или изменяемой осями вращения, вращатели барабанного типа.

Манипулятор электронной пушки имеет до пяти степеней свободы в зависимости от размеров и назначения сварочной установки. Такой манипулятор устанавливают либо на потолке вакуумной камеры, либо на её боковой стенке,

либо на подвижном или неподвижном портале [24,46,71].

Электромеханический комплекс АЭЛТК включает в себя совокупность манипуляторов, на которых жёстко закреплены одна или несколько сварочных электронно-лучевых пушек и устройство перемещения свариваемого изделия (рисунок 1.3).

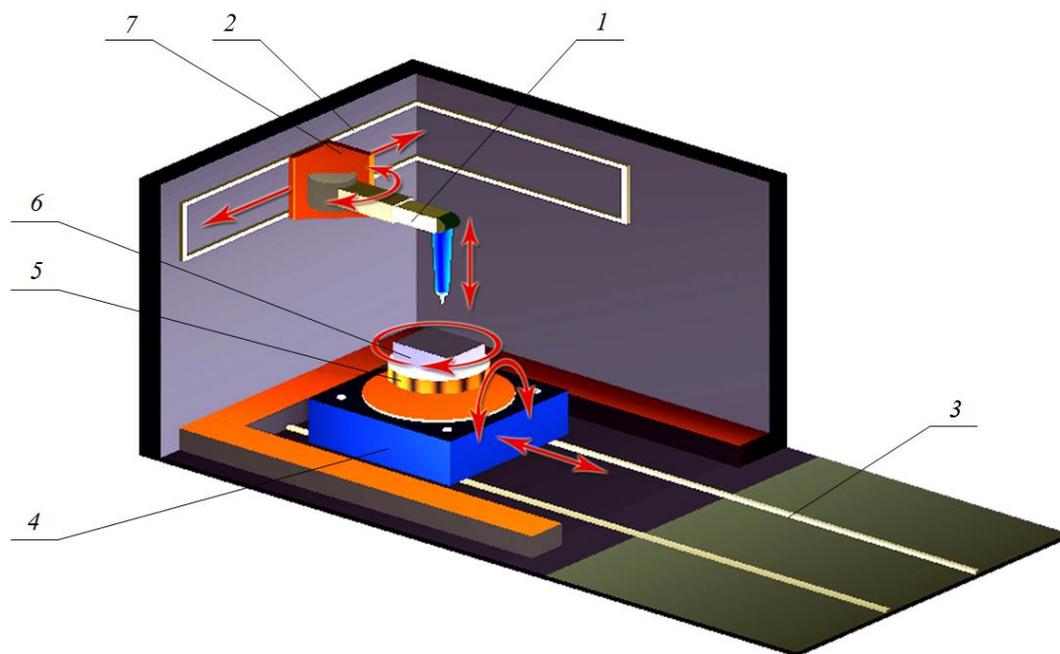


Рисунок 1.3 - Автоматизированный электронно-лучевой технологический комплекс (АЭЛТК) с внутрикамерным расположением пушки: 1 – сварочная пушка; 2 – направляющие модуля продольного перемещения сварочной пушки; 3 - направляющие модуля продольного перемещения заготовки; 4 – модуль продольного перемещения; 5 – поворотное устройство; 6 – заготовка; 7 – манипулятор сварочной пушки.

Современные многокоординатные манипуляторы создают на базе механических модулей движения – модулей линейного или углового перемещений [72,79]. На рисунке 1.4 приведена типовая кинематическая схема ММД сварочной пушки и устройства перемещения свариваемого изделия. Стрелками показаны возможные перемещения модулей движения.

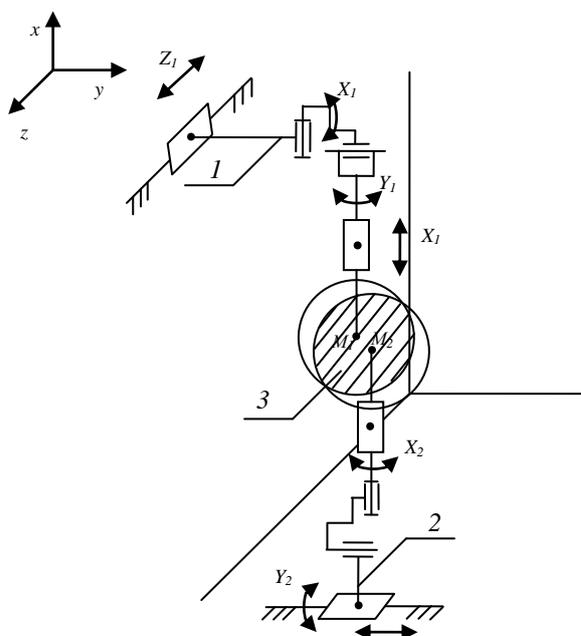


Рисунок 1.4 – Кинематическая схема технологического оборудования АЭЛТК: 1 - манипулятор сварочной пушки; 2 - устройство перемещения заготовки; 3 - область точности (область  $Q_S$ );  $M_1$  – центр пятна нагрева ЭЛ;  $M_2$  – центр сварного шва в некоторой точке.

Точка  $M_1$  является концевой точкой устройства перемещения сварочной пушки, точка  $M_2$  описывает точку середины сварного стыка. Область  $Q_S$  определяет множество возможных перемещений концевых точек всех ММД, как модулей перемещения сварочной пушки, так и модулей перемещения заготовки, при обеспечении критериев точного позиционирования электронного луча по стыку [26,27].

В результате проведённого анализа основных систем АЭЛТК выявлены параметры, определяющие точность позиционирования ЭЛ по стыку в процессе ЭЛС.

### 1.3 Параметры, влияющие на обеспечение точности позиционирования при ЭЛС

Подходы, применяющиеся в настоящее время при решении задач слежения за стыком и точного позиционирования ЭЛ во время сварки, описаны в параграфе 1.1.2 настоящей главы. Однако в них, среди прочих, не учитываются механические характеристики мехатронных модулей АЭЛТК, а именно кинематические и динамические характеристики звеньев устройств вспомогательного технологического оборудования АЭЛТК.

Основные параметры, определяющие процесс ЭЛС и, в частности, процесс позиционирования электронного луча, представлены в формуле (1.1).

Представив процесс ЭЛС в виде функциональной зависимости:

$$F = f(U_{\text{уск}}, I_{\text{п}}, v_{\text{п}}, t_{\text{имп}}, \Delta_{\text{ф}}, \theta, \Delta r), \quad (1.1)$$

где  $U_{\text{уск}}$  - ускоряющее напряжение электронной пушки;

$I_{\text{п}}$  - сила тока электронного пучка;

$v_{\text{п}}$  - скорость перемещения луча по поверхности изделия;

$t_{\text{имп}}$  – продолжительность импульсов и пауз;

$\Delta_{\text{ф}}$  - точность фокусировки электронного пучка;

$\theta$  – угол падения отклоненного пучка на поверхность свариваемого изделия;

$\Delta r$  – полная погрешность мехатронных модулей АЭЛТК,

получим, что последние три параметра данной зависимости определяют точность позиционирования электронного луча при ЭЛС.

Кроме этого, наиболее важными конструктивными параметрами процесса сварки являются тип и геометрия стыкового соединения и пространственное положение сварного шва и электронного пучка. На рисунке 1.5 изображены основные геометрические параметры сварного стыка, влияющие на обеспечение процесса позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС.

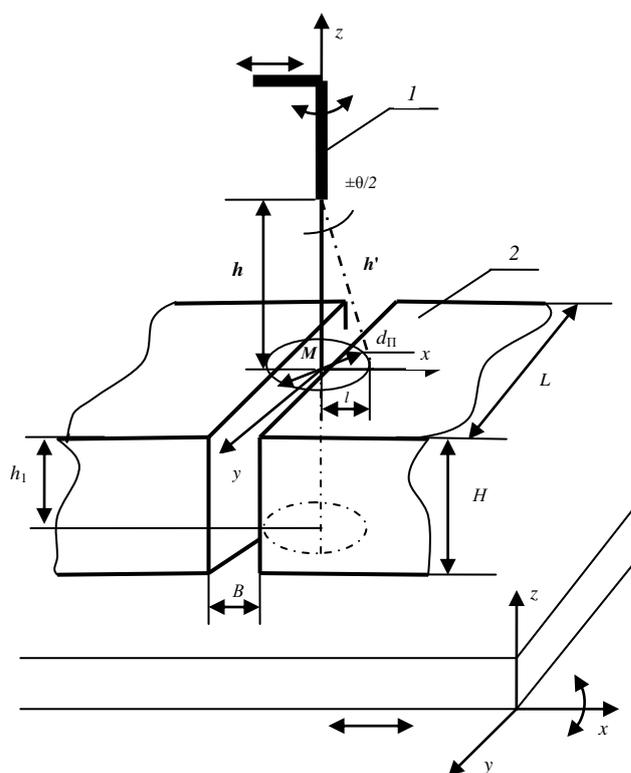


Рисунок 1.5 – Положение фокального пятна нагрева ЭЛ на поверхности стыка с учётом конструктивных характеристик стыкового соединения: где  $d_{\Pi}$  – диаметр электронного пучка;  $h$  – расстояние от среза сварочной пушки до плоскости сварного шва – длина электронного пучка;  $h'$  – длина отклонённого на угол  $\theta$  электронного пучка;  $H$  – толщина свариваемых изделий;  $l$  – смещение центра пятна нагрева  $M$  при отклонении оси электронного луча от перпендикулярности;  $\theta$  – угол падения отклоненного пучка на поверхность свариваемого изделия;  $M$  – центр пятна нагрева электронного луча;  $h_1$  – глубина проплавления;  $L$  – длина сварного шва;  $B$  – ширина зазора в стыке; 1 – сварочная пушка; 2 – свариваемое изделие.

Сварной шов характеризуется, прежде всего, своей глубиной, шириной и их отношением. Существенную роль играет параллельность сторон зоны проплавления, радиус корневой части и другие геометрические параметры, влияющие на характер и величину сварочных деформаций, напряжений в сваренных изделиях [ 59].

Размеры, конфигурация и качество формирования швов при ЭЛС определяются устойчивостью, формой и размерами парогазового канала сварочной ванны, которые в свою очередь зависят от мощности, эффективного радиуса,

угла сходимости луча, положения фокального пятна луча, пространственного положения стыка, теплофизических свойств металла и скорости сварки.

На точность позиционирования электронного луча по стыку среди прочих параметров влияет:

- Точность сборки свариваемых деталей перед началом процесса сварки: перед сваркой требуется точная сборка деталей (при толщине металла до 5 мм зазор не более 0,07 мм, при толщине до 20 мм зазор до 0,1 мм).

- Точное наведение ЭЛ на стык перед началом сварки: отклонение может достигать не более 0,05...0,1 мм, при этом обязательна юстировка ЭЛ.

- Положение траектории сварного стыка в пространстве [52,59]:

1. Плоские сварные швы простой формы.

2. Плоские сварные швы сложной формы.

3. Пространственные криволинейные сварные швы.

- Технические характеристики энергоблока: энергетические параметры электронного пучка (ускоряющее напряжение, сила тока пучка).

- Технические характеристики фокусирующей и отклоняющей систем АЭЛТК: степень фокусировки пучка, максимальный угол отклонения пучка  $\theta$  от перпендикулярной сварному стыку оси [52]. Электронный луч может отклоняться в небольших пределах с помощью электромагнитной отклоняющей системы с высокой степенью точности. Но при значительном угле отклонения  $\theta$  происходит некоторая расфокусировка луча и увеличение размеров пятна нагрева, что способствует появлению дефектов сварного шва, в частности при выполнении прецизионных работ [52,65].

Обобщив вышесказанное, можно сделать вывод, что для получения высококачественных сварочных швов необходимо учитывать энергетические (ускоряющее напряжение, сила тока пучка) и временные (продолжительность импульсов и пауз) параметры электронного пучка, его геометрию и точность фокусировки, положение стыка в пространстве, скорость сварки, а также кинематику и динамику электромеханического оборудования АЭЛТК.

В данной работе предлагается учитывать кинематические и динамические характеристики мехатронных модулей движения АЭЛТК и влияние соответствующих погрешностей на точность позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС.

#### **1.4 Погрешность мехатронного модуля движения**

В настоящее время предъявляются высокие требования к работе мехатронных модулей, входящих в состав вспомогательного технологического оборудования АЭЛТК. Точность работы мехатронного модуля оценивают его погрешностью, то есть разностью между действительным и расчетным положениями выходного звена.

Погрешность позиционирования – это отклонение положения рабочего органа от желаемого положения, заданного программой движения [42,79]. Важно отметить, что фактическое положение рабочего органа при отработке управляющей программы является случайно величиной. Таким образом, конечная точка рабочего органа в каждой конкретной реализации может оказаться в произвольной точке сферы, центром которой являются координаты целевой точки в управляемой программе, а радиус этой сферы равен паспортной величине погрешности позиционирования мехатронной системы [79].

Для задач управления движением по некоторой пространственной траектории используется понятие *погрешности отработки траектории* – это отклонение фактической траектории рабочего органа от траектории, заданной программой движения. Этот показатель является доминирующим для оценки точности мехатронных систем и машин на операциях сварки, покраски и т.п. Рабочий орган в процессе движения находится внутри пространственной трубки, осью которой является программная траектория. Радиус этой трубки равен паспортной погрешности отработки траектории мехатронной машины (рисунок 1.6).

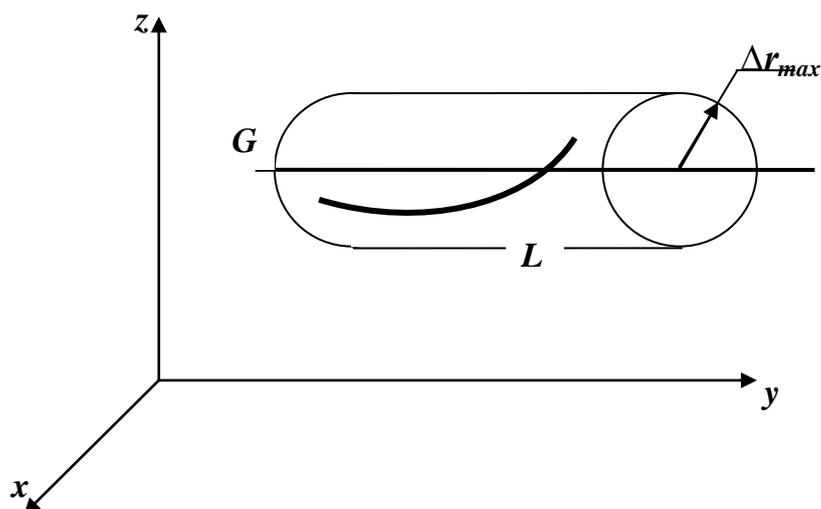


Рисунок 1.6 – Погрешность отработки траектории мехатронной машины:  $L$  – фактическая траектория полюса рабочего органа;  $G$  – программная траектория;  $\Delta r_{max}$  – максимальная (паспортная) погрешность отработки траектории.

На основе определения погрешности отработки траектории сделан вывод об условии обеспечения заданной точности позиционирования выходного звена ММД:

$$\Delta_0 \leq \Delta r_{задан}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta_0$  – расчетная погрешность манипулятора;  $\Delta r_{задан}$  – максимальная погрешность отработки траектории.

Основными причинами возникновения погрешности мехатронного модуля являются:

- погрешности системы управления и двигателя,
- кинематические погрешности,
- мёртвый ход преобразователей движения,
- упругие деформации элементов преобразователей движения.

Полную погрешность выходного звена мехатронного модуля определяют в виде [42]:

$$\Delta = \Delta q + \delta_{\Sigma} + J_{\Sigma} + \Delta q', \quad (1.3)$$

где  $\Delta q$  - погрешность системы управления и двигателя (1);  $\delta_{\Sigma}$  - кинематическая погрешность преобразователя движения (2);  $J_{\Sigma}$  - мертвый ход преобразователя движения (3);  $\Delta q'$  — погрешность, вызванная податливостью преобразователя движения (4).

1. Погрешность системы управления и двигателя, приведенная к выходному звену преобразователя движения, зависит от передаточного числа преобразователя движения и погрешности угла поворота двигателя.

2. Исполнительные устройства мехатронного модуля рассматриваются как многоступенчатые преобразователи движения. При расчете вероятностным методом суммарная кинематическая погрешность многоступенчатого преобразователя зависит от величины поля рассеяния кинематической погрешности  $i$ -й передачи, а также от координаты середины поля рассеяния кинематической погрешности кинематической цепи.

3. Суммарный мертвый ход многоступенчатых преобразователей движения при расчете вероятностным методом зависит от величины поля рассеяния мертвого хода  $i$ -й передачи и координаты середины поля рассеяния мертвого хода механизма.

4. Погрешность, вызванная податливостью преобразователя движения, определяется через приведённую податливость преобразователя и возникает от действия внешней нагрузки, что приводит к деформации всех элементов кинематической цепи.

На основе известной кинематической схемы мехатронных модулей движения АЭЛТК можно аналитически определить величину полной погрешности. Для достижения заданной точности позиционирования ЭЛ по стыку необходимо провести анализ параметров, влияющих на точность отработки траектории сварного стыка, и установить критерии обеспечения процесса позиционирования.

## 1.5 Постановка задач исследования

С развитием современного производства и выдвигаемых требований к повышению качества изделий, получаемых с помощью ЭЛС, необходимо обеспечивать высокую точность позиционирования ЭЛ при отработке сварного стыка.

Проведённый анализ особенностей процесса ЭЛС позволил выявить параметры, определяющие процесс позиционирования ЭЛ по стыку при отработке траектории сварного шва. К ним относится точность фокусировки ЭЛ, угол отклонения ЭЛ от перпендикулярной плоскости стыка оси и полная погрешность мехатронной системы АЭЛТК. Точность фокусировки электронного луча и его угол отклонения  $\theta$  обеспечиваются фокусирующей и отклоняющей системами АЭЛТК соответственно, что относится к оборудованию электронной пушки и в настоящей работе не рассматривается.

Точность сборки свариваемых деталей также является важным параметром, влияющим на точность позиционирования ЭЛ, однако обеспечение требуемого зазора в стыке, его очистка и т.п. является подготовительной технологической операцией перед началом процесса сварки. Таким образом, точность сборки считается в данной работе детерминированной величиной.

Конструктивные (геометрические) характеристики стыкового соединения (рис. 1.5) играют важную роль при формировании критериев обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку. В этой связи необходимо тщательно проанализировать параметры, определяющие конструкцию стыкового соединения и взаимное расположение стыка и ЭЛ. На основе проведённого анализа следует установить критерии обеспечения точности позиционирования ЭЛ.

В результате анализа причин возникновения погрешностей при позиционировании ЭЛ были выявлены погрешности системы управления и двигателей, кинематические погрешности, мёртвый ход преобразователей движения и упругие деформации элементов преобразователей движения.

Анализ литературы и нормативно-технической документации по обеспечению процесса позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС показал, что расчёты по определению полной погрешности мехатронных систем (в частности, манипуляторов) достаточно широко используются в теоретических исследованиях. Однако на практике многие характеристики, влияющие на величину погрешности, не учитываются, либо считаются постоянными в течение всего процесса ЭЛС. Для многокоординатных манипуляторов сварочной пушки и изделия величина погрешности является значимой величиной, ввиду того при этом необходимо учитывать также их взаимное расположение и кинематические особенности при выполнении рабочих функций.

Анализируя формулу (1.3), можно сделать вывод о том, что среди прочих параметров мехатронной системы не учитываются её динамические характеристики. Мехатронная система komponуется на базе двух и более мехатронных модулей движения. В состав АЭЛТК обычно входят манипуляторы сварочной пушки и изделия (раздел 1.2).

Установление заданной скорости перемещения рабочего органа (сварочной пушки) по трём координатам производят с помощью персонального компьютера (ПК) и для отработки сигналов ошибки необходимо время для реализации оптимального алгоритма движения. Ввиду того, что общая масса перемещаемой конструкции манипулятора с рабочим органом составляет около 600 кг (для сварки крупногабаритных конструкций – более 3000 кг), возникающая при этом динамическая погрешность системы оказывает значительное влияние на точность перемещения ЭЛ по стыку, особенно в случае пространственного криволинейного стыка.

ЭЛС представляет собой сложный и быстротекущий процесс, поэтому для обеспечения требуемой точности в процессе позиционирования рабочего органа и с целью сократить время реакции системы управления позиционированием предлагается разработать обобщённую математическую модель процесса позиционирования электронного луча при отработке траектории, учитываю-

щая кинематические и динамические характеристики манипуляторов АЭЛТК. В разработке данной модели заключается научная новизна работы.

Таким образом, **целью** диссертационной работы является повышение качества сварных соединений, получаемых методом ЭЛС, основанное на повышении точности позиционирования электронного луча при ЭЛС.

Для достижения указанной цели были поставлены **следующие задачи**:

1. Провести анализ и обосновать причины возникновения погрешностей в процессе позиционирования электронного луча на основе полной ошибки мехатронных модулей движения, входящих в состав АЭЛТК, и установить критерии обеспечения точности позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС.

2. Разработать математическую модель процесса позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС, учитывающую полную погрешность ММД АЭЛТК и включающую в себя обеспечение критериев позиционирования ЭЛ.

3. Разработать алгоритм управления процессом позиционирования электронного луча при ЭЛС с учётом определяемых кинематических и динамических характеристик технологического оборудования АЭЛТК.

4. Провести экспериментальное исследование проверки работоспособности разработанной модели процесса позиционирования ЭЛ при ЭЛС.

5. Разработать методику обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС.

Решение поставленных задач позволит повысить качество сварных соединений за счет повышения точности позиционирования электронного луча по траектории стыка при ЭЛС на основе обеспечения критериев позиционирования и с учетом кинематических и динамических характеристик технологического оборудования АЭЛТК.

## **2. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ПРИ ЭЛС**

На качество сварных соединений, получаемых методом ЭЛС, значительное влияние оказывает точность позиционирования электронного луча при отработке сварного стыка при ЭЛС. Повышение качества сварных соединений, основанное на повышении точности позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС, является целью диссертационной работы.

Для достижения поставленной цели необходимо провести теоретическое исследование процесса позиционирования ЭЛ при ЭЛС и установить критерии обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку на основе анализа параметров, определяющих процесс позиционирования ЭЛ; разработать физическую модель объекта исследования, представленную в данной работе совокупностью кинематической и динамической моделей ММД АЭЛТК; разработать математическую модель процесса позиционирования ЭЛ при отработке заданной траектории, учитывающую полную погрешность МС АЭЛТК и включающую в себя обеспечение критериев позиционирования ЭЛ; предложить обобщённую модель управления процессом позиционирования ЭЛ при ЭЛС, реализующую алгоритмы управления на основе разработанной математической модели процесса позиционирования.

### **2.1 Критерии точности позиционирования ЭЛ**

Процесс позиционирования электронного луча по стыку рассматривается при прохождении луча по всей длине сварного стыка в процессе ЭЛС в режиме реального времени.

В первой главе был проведён анализ оборудования АЭЛТК и выделены системы, обеспечивающие точность позиционирования ЭЛ по стыку: мехатронная система, представленная манипуляторами сварочной пушки и заготов-

ки, фокусирующая система и отклоняющая система. На основе анализа вышеперечисленных систем выделены следующие основные параметры, оказывающие влияние на точность позиционирования ЭЛ по стыку:

- Полная погрешность  $\Delta r$  мехатронных модулей АЭЛТК.
- Точность фокусировки  $\Delta_{\phi}$  электронного луча, обеспечиваемая фокусирующей системой АЭЛТК.
- Отклонение ЭЛ на угол  $\theta$  от перпендикулярной к поверхности свариваемого изделия оси, обеспечивается отклоняющей системой АЭЛТК.

Как уже было отмечено, в определение полной погрешности мехатронного модуля не входит погрешность, возникающая вследствие динамических нагрузок. С учетом динамической погрешности представим основные параметры процесса позиционирования ЭЛ в виде функциональной зависимости (2.1):

$$F = f(\Delta_{\phi}, \theta, \Delta r, \Delta_{\text{дин}}), \quad (2.1)$$

где  $\Delta_{\phi}$  - точность фокусировки электронного луча;  $\theta$  – угол отклонения ЭЛ от оси, перпендикулярной поверхности свариваемого изделия;  $\Delta r$  – полная погрешность мехатронной системы АЭЛТК;  $\Delta_{\text{дин}}$  – динамическая погрешность.

Зависимость (2.1) является целевой функцией разрабатываемой модели процесса позиционирования.

Для каждой  $i$ -той точки сварного стыка длиной  $L$  определяется положение ЭЛ  $R_i$ , соответствующее минимуму целевой функции  $\Delta F_i$  в каждой точке:

$$R_i[l]: \{\Delta F_i[l] \rightarrow \min\}, \quad (2.2)$$

где  $l$  - расстояние до  $i$ -той точки от начала сварного шва,  $0 \leq l_i \leq L$ .

Проведённый анализ процесса позиционирования ЭЛ по стыку показал, что задача точного позиционирования луча при ЭЛС определяется следующими критериями:

1. Учёт влияния полной погрешности мехатронных модулей движения АЭЛТК, а также динамической погрешности ( $K_1$ ).
2. Обеспечение постоянства взаимного положения оси симметрии элек-

тронного пучка и плоскости симметрии стыка ( $K_2$ ).

3. Обеспечение сохранения неизменным диаметра фокального пятна нагрева  $d_{\text{П}}$  на поверхности стыка свариваемых деталей (сохранение круглой формы пятна нагрева, обеспечение перпендикулярности оси электронного луча к плоскости стыка) ( $K_3$ ).

4. Соблюдение расстояния  $h$  от среза сварочной пушки до поверхности свариваемой детали (либо до дна сварочной ванны) ( $K_4$ ).

5. Обеспечение сохранения постоянной глубины проплавления  $h_1$ . ( $K_5$ ).

С учётом вышесказанного можно сделать вывод, что процесс позиционирования электронного луча по стыку является многокритериальной задачей. Обеспечение критериев процесса позиционирования электронного луча по стыку позволит осуществлять позиционирование ЭЛ с заданной точностью.

## **2.2 Обеспечение критериев точности позиционирования ЭЛ по стыку**

Критерии точности позиционирования ЭЛ по стыку определяются на основе анализа технологических параметров ЭЛС и геометрических параметров сварного стыка.

***1. Учёт влияния полной погрешности мехатронных модулей движения АЭЛТК, включая динамическую погрешность.***

Полная погрешность выходного звена мехатронного модуля  $\Delta r$  определяется как сумма погрешности системы управления и двигателя, кинематической и динамической погрешностей преобразователя движения, величины мертвого хода преобразователя движения и погрешности, вызванной податливостью преобразователя движения.

Для записи расчетов удобно использовать трехзначную индексацию показателей:  $kni$ , где  $k$  – номер мехатронного модуля,  $n$  – номер звена мехатронного модуля,  $i$  – номер преобразователя движения. Таким образом,  $\Delta r_{kni}$  – обозначение полной погрешности с трехзначным индексом.

Используя трёхзначную индексацию, полная погрешность  $\Delta r_{kni}$   $i$  –го преобразователя движения  $n$  – го звена  $k$  – го мехатронного модуля может быть записана в виде системы уравнений:

$$\Delta r_{kni} = \begin{cases} \Delta q = f(\Delta \varphi_{дв}, u), \\ \delta_{\Sigma p} = f(I_K), \\ J_{\Sigma p} = f(E_{V\Sigma}^j, t_2, \varepsilon_i, V_i), \\ \Delta q' = f(e_{II}, Q), \\ \Delta_{дин} = f(I_D) \end{cases} \quad (2.3)$$

где  $\Delta q$  – погрешность системы управления и двигателя;  $\delta_{\Sigma}$  и  $J_{\Sigma}$  – кинематическая погрешность мертвый ход преобразователя движения соответственно;  $\Delta q'$  – погрешность, вызванная податливостью механизма;  $\Delta_{дин}$  – динамические погрешности;  $\Delta \varphi_{дв}$  - погрешность угла поворота двигателя;  $u$  - передаточное отношение преобразователя движения;  $I_K$  – кинематический инвариант;  $E_{V\Sigma}^j$  - координата середины поля рассеяния мертвого хода механизма;  $t_2$  - коэффициент, выбираемый в зависимости от процента риска  $P$ ;  $V_i^j$  - поле рассеяния мертвого хода  $i$ -й передачи;  $e_{II}$  - приведенная податливость преобразователя движения мехатронного модуля;  $Q$  – внешняя нагрузка;  $I_D$  - динамический инвариант, характеризующий полную кинетическую энергию системы.

Таким образом, установлено, что при перемещении электронного луча по стыку точность позиционирования луча зависит от погрешности системы управления и двигателей, кинематической и динамической погрешностей ММД в составе АЭЛТК, мёртвого хода и податливости преобразователей движения. Анализ полной погрешности мехатронных модулей в составе АЭЛТК позволяет определить величину, на которую необходимо провести корректировку положения электронного луча по стыку.

## ***2. Обеспечение постоянства взаимного положения оси симметрии электронного пучка и плоскости симметрии стыка (изменение угла $\theta$ ).***

На рисунке 1.5 изображены основные геометрические параметры стыкового соединения, влияющие на обеспечение процесса позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС. Постоянство взаимного положения оси симметрии пучка и

плоскости симметрии стыка (например, при сварке однородных материалов ось аксиально-симметричного пучка совмещают с плоскостью симметрии стыка по всей его глубине) необходимо обеспечивать для получения качественных, геометрически рассчитанных швов. В большей степени этот критерий обеспечивается отклоняющей системой АЭЛТК. При этом управляемым параметром является угол отклонения ЭП  $\theta$ .

Для поддержания стабильных параметров процесса позиционирования при постоянном уровне фокусировки электронного пучка необходимо обеспечивать строгое перпендикулярное взаимное положение оси симметрии пучка с плоскостью симметрии стыка. Обычно это достигается отклонением электронного пучка на угол  $\theta$ , величина которого устанавливается в соответствии с технологическими требованиями процесса ЭЛС и составляет максимально  $\pm(6-7)^\circ$ . При большем угле отклонения  $\theta$  происходит некоторая расфокусировка луча и увеличение размеров пятна нагрева. В связи с этим дальнейшее отклонение луча становится нецелесообразным, поскольку это требует дополнительных затрат, связанных с установкой дополнительного оборудования (например, дополнительной пары отклоняющих катушек).

При изменении текущей координаты положения центра фокального пятна нагрева луча происходит некоторое отклонение луча на угол  $\theta$  с целью корректировки его положения по стыку (рисунок 2.1):

$$\operatorname{tg} \theta = KI_{\text{откл}}, \quad (2.4)$$

где  $I_{\text{откл}}$  - ток отклоняющей катушки;  $K$  - коэффициент пропорциональности.

Тогда

$$\angle \theta = \operatorname{arctg}(KI_{\text{откл}}), \quad (2.5)$$

При этом должно соблюдаться условие:

$$\angle \theta \leq (6-7)^\circ, \quad (2.6)$$

Если при дальнейшем отклонении электронного пучка условие (2.6) не выполняется, то в процесс позиционирования ЭЛ по стыку включается работа

ММД АЭЛТК, а именно, манипулятора сварочной пушки и/или устройств перемещения заготовки (рисунок 2.1, б). В этом случае корректировка положения фокального пятна нагрева по стыку осуществляется за счёт перемещения ММД системы. При отработке криволинейных швов сложной формы возможна совместная работа ММД и отклоняющей системы (рисунок 2.1, а и б) для достижения более точной и «быстрой» корректировки положения луча при ЭЛС.

Обеспечение перпендикулярности электронного пучка к свариваемой поверхности необходимо в плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$ .

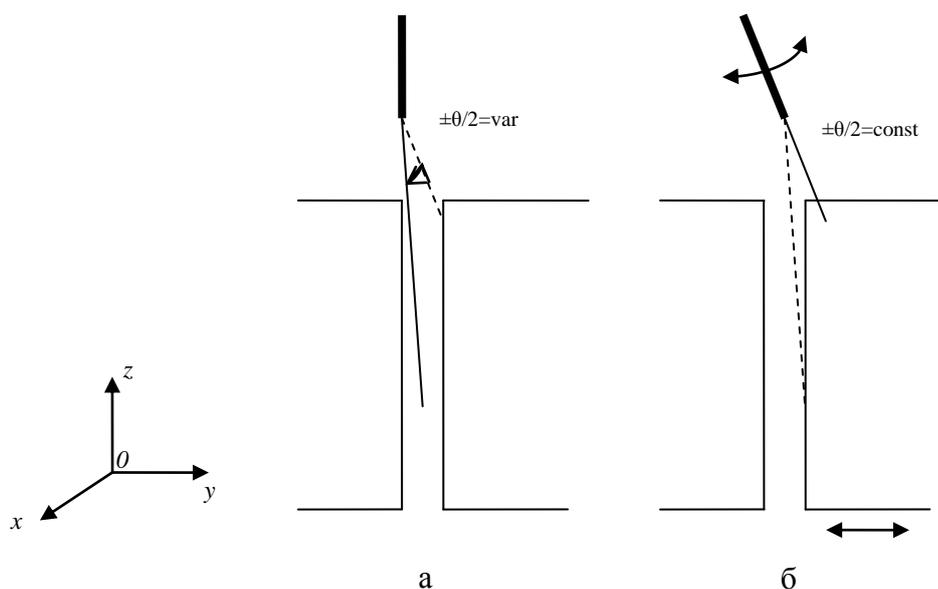


Рисунок 2.1 – Корректировка положения пятна нагрева по стыку: а – отклонением пучка электронов на угол  $\theta$  с помощью отклоняющей системы; б - перемещением ММД сварочной пушки и заготовки.

Обеспечение перпендикулярности оси симметрии ЭЛ к плоскости симметрии стыка осуществляется с использованием отклоняющей системы, изменяя при этом угол отклонения пучка  $\theta$ . При несоблюдении условия (2.4) установление перпендикулярности достигается совместной работой модулей перемещения сварочной пушки и/или заготовки, что особенно актуально в случае сложных пространственных криволинейных сварных стыков.

### **3. Обеспечение сохранения неизменным диаметра фокального пятна нагрева $d_{\text{П}}$ на поверхности стыка свариваемых деталей**

Стабилизацию диаметра фокуса необходимо осуществлять для обеспече-

ния точного наведения фокального пятна нагрева на стык при  $B = const$  по всей длине сварного стыка. При этом для обеспечения полного проплавления (про-вара) должно выполняться условие (2.7)

$$B \leq d_{\text{п}} \leq 2B. \quad (2.7)$$

В случае, когда  $d_{\text{п}} > B$  обеспечение положения центра фокуса луча строго посередине стыка становится не обязательным. Также существует зависимость от степени фокусировки.

Однако на практике диаметр фокального пятна нагрева электронного пучка  $d_{\text{п}} \leq B$ , поэтому наряду с условием проплавления (2.7) необходимо позиционировать фокус посередине сварного стыка, совмещая центр фокуса с продольной осью симметрии стыка. С целью обеспечения сохранения диаметра пятна нагрева при выполнении условия (2.7) необходимо осуществлять контроль диаметра электронного пучка.

Для измерения диаметра ЭП и распределения плотности мощности по его поперечному сечению можно использовать высокоточный щелевой датчик, либо датчик с прямым краем пластины с расположенным под ним защитным электродом и цилиндром Фарадея с резистором нагрузки 100 Ом.

Плотность тока ЭП, измеряемая щелевым датчиком и датчиком прямого края, вычисляют соответственно по следующим формулам [52]:

$$J(r) = \frac{1}{\Delta a_n \pi r} \frac{d}{dr} \int_r^{r_0} \frac{i_{\text{щ}}(x) x dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}, \quad (2.8)$$

$$J(r) = \frac{1}{\pi r} \frac{d}{dr} \int_r^{r_0} \frac{di_{\text{н.к.}}(x)}{dx} \frac{x dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}, \quad (2.9)$$

где  $\Delta a_n$  – ширина щели;  $i_{\text{щ}}$  – ток ЭП через щель;  $i_{\text{н.к.}}$  – ток датчика прямого края;  $r$  – текущий радиус пучка;  $x$  – координата отклонения (движения) ЭП.

Таким образом, вычисляя плотность тока ЭП в текущий момент времени и используя щелевой датчик прямого края, можно контролировать стабилизацию диаметра фокального пятна нагрева. При наведении электронного пучка на стык должно выполняться условие (2.7), однако при  $d_{\text{п}} \leq B$  необходимо позиционировать фокальное пятно строго посередине сварного стыка.

#### **4. Соблюдение расстояния $h$ от среза сварочной пушки до поверхности свариваемой детали**

Расстояние от среза сварочной пушки до поверхности свариваемого изделия  $h$  задаётся в соответствии с технологией ЭЛС и является технологическим параметром сварки. Для позиционирования электронного луча по стыку необходимо обеспечивать постоянство этого расстояния либо до поверхности свариваемого изделия, либо до дна сварочной ванны. Это условие устанавливается в соответствии с формой сварного стыка (моделью сварного шва).

Из рисунка 2.1 геометрическим построением получим:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{l}{h}, \quad (2.10)$$

отсюда

$$h = \frac{l}{\operatorname{tg}\theta} \quad (2.11)$$

Можно определять расстояние анод сварочной пушки – датчик, установленный на поверхность свариваемого изделия, используя метод «двойного края». При этом измеряют полный угол отклонения ЭП, а затем вычисляют расстояние  $D$  по соотношениям [52]:

$$D = 0,5\alpha_n \operatorname{tg}\theta / 2, \quad (2.12)$$

$$\operatorname{tg}\theta / 2 = KI_{\text{откл}}, \quad (2.13)$$

где  $\alpha_n$  - расстояние между прямыми краями пластин;  $\theta$  - полный угол отклонения ЭП.

Если согласно технологическому процессу сварки  $l = \text{const}$ , тогда при изменении толщины сварного стыка необходимо перемещать исполнительные устройства сварочной пушки и/или заготовки.

#### **5. Обеспечение сохранения постоянной глубины проплавления $h_1$**

Для цилиндрического ЭП с гауссовским распределением плотности мощности в поперечном сечении выражение для глубины проплавления  $h_1$  имеет вид [52]:

$$h_1 = \frac{0,238 \eta_3 P}{(\rho_{жс} G_{TM} v_{св} + q_{T0}) r_e}, \quad (2.14)$$

где  $r_e$  – радиус электронного пучка.

Сохранение при сварке постоянной глубины проплавления, как и определение расстояния от катода сварочной пушки до свариваемого изделия необходимо, чтобы обеспечить постоянство этого расстояния, осуществляется с учётом технологических требований процесса ЭЛС. Поскольку геометрия и качество шва сильно зависят от уровня фокусировки ЭП по отношению к глубине проплавления, то при изменении мощности ЭП в начале и конце сварки необходимо, по крайней мере, поддерживать постоянным расстояние между минимальным поперечным сечением ЭП и дном сварочной ванны.

Обеспечение постоянной глубины проплавления возможно двумя способами:

1. Сохранение неизменным фокусного расстояния (от среза пушки до дна сварочной ванны) при изменении диаметра фокального пятна нагрева:

$$h = const, d_{п}(I_{ф}) = var.$$

2. Сохранение неизменным диаметра фокуса (фокального пятна нагрева) при изменении фокусного расстояния:  $h = var, d_{п}(I_{ф}) = const$ .

При этом изменение фокусного расстояния  $h$  можно осуществлять при соответствующих перемещениях:

а). Манипулятора сварочной пушки.

б). Устройства перемещения заготовки (сварного изделия).

в). Манипулятора сварочной пушки и устройства перемещения заготовки одновременно.

Для сохранения постоянной глубины проплавления  $h_1$  необходимо обеспечивать либо стабильность фокусного расстояния, изменяя при этом диаметр пятна нагрева (1), либо неизменность диаметра фокуса, при этом фокусное расстояние варьируется перемещением модулей движения сварочной пушки и/или заготовки (2).

### 2.3 Физическая модель управления процессом позиционирования выходного звена АЭЛТК

Алгоритм управления процесса позиционирования включает в себя совместную работу звеньев манипуляторов ЭЛП и устройства перемещения заготовки, фокусирующей и отклоняющей систем АЭЛТК для позиционирования ЭП по стыку в каждый момент времени, в результате чего с помощью математического аппарата системы управления выполняется определение величины полной погрешности ММД АЭЛТК. После получения системой вычисленной величины вырабатывается управляющее воздействие, осуществляя коррекцию положения ЭЛ по стыку.

Действующие в ММД АЭЛТК скорости, ускорения, силы и моменты оказывают непосредственное влияние на точность позиционирования выходного звена манипулятора при прохождении траектории. Рассчитываемые в реальном масштабе времени параметры кинематики и динамики системы, а именно значения соответствующих инвариантов, позволяют корректировать положение рабочего органа в соответствии с геометрией траектории и с требованиями точности её отработки. Для проведения кинематического и динамического анализа системы составляют соответствующие модели.

В данной работе физическая модель управления процессом позиционирования выходного звена АЭЛТК представлена совокупностью кинематической и динамической моделей ММД. Кинематическая и динамическая модели исполнительных устройств ММД, входящих в состав АЭЛТК, составляются с целью определения кинематических и динамических характеристик системы при выполнении сварного шва. Для определения этих характеристик, а именно, составляющих кинематической и динамической погрешностей ММД АЭЛТК, каждый  $k$ -тый мехатронный модуль подвергается кинематическому и динамическому анализу с помощью создаваемых моделей.

Исполнительные устройства ММД представлены в АЭЛТК манипуляторами сварочных пушек и устройствами перемещения заготовки. Манипулятор рассматривается как  $n$ -звенный механизм с  $j$  – степенями свободы.

Как кинематическая, так и динамическая модели исполнительного устройства, в частности манипулятора, могут быть построены на основе использования известных законов ньютоновской или лагранжевой механики. Результатом применения этих законов являются уравнения, связывающие действующие в сочленениях силы и моменты с кинематическими характеристиками и параметрами движения звеньев.

С целью получения более эффективных с вычислительной точки зрения алгоритмов можно использовать уравнения Ньютона – Эйлера. Однако вывод уравнений движения манипулятора методом Ньютона – Эйлера прост по содержанию, но весьма трудоемок. Вывод уравнений динамики движения манипулятора методом Лагранжа – Эйлера отличается простотой и единством подхода. В рамках предположения о том, что звенья представляют собой твердые тела, этот подход приводит в общем случае к системе нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Уравнения Лагранжа – Эйлера обеспечивают строгое описание динамики состояния манипулятора и могут быть использованы для разработки усовершенствованных законов управления в пространстве присоединенных переменных, а также для решения прямой задачи динамики.

Таким образом, уравнения кинематики и динамики движения реального манипулятора могут быть получены традиционным методом Лагранжа – Эйлера (параграф 2.3.3), либо с использованием инвариантов на основе тензорного анализа (параграф 2.3.1, 2.3.2).

### 2.3.1 Построение кинематической модели многозвенных исполнительных механизмов ММД на основе кинематического инварианта

Учитывая, что мехатронные модули представляют собой многозвенные механизмы, то для анализа их кинематических и динамических характеристик удобно использовать тензорное исчисление. Тензорный анализ основан на исследовании инвариантов – объектов, остающихся неизменными при преобразованиях координат. Инвариант можно описать некоторым уравнением в некоторой координатной системе. При изменении координатного базиса уравнение изменит свою форму, но сам инвариант останется неизменным. То есть тензорный анализ является эффективным методом создания аналитических зависимостей, решая при этом проблему трансформации координат при переходе от одного базиса к другому [79].

Модель для кинематического анализа ММД, механизм которого состоит из  $n$  – звеньев, основана на использовании кинематического инварианта  $I_K$  – квадрата модуля скорости концевой точки выходного звена.

В декартовых координатах:

$$I_K = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2, \quad (2.15)$$

где  $I_K$  - кинематический инвариант;  $v_x, v_y, v_z$  - проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат.

Для перехода к обобщённой системе координат соотношение для  $n$  – звенного механизма:

$$\vec{v} = J \frac{d\vec{q}}{dt}, \quad (2.16)$$

где  $\vec{v} = v_x, v_y, v_z$  - вектор-столбец (3 x 1) скорости рабочего органа в декартовой системе координат;

$\frac{d\vec{q}}{dt} = \left( \frac{d\vec{q}_1}{dt}, \frac{d\vec{q}_2}{dt}, \dots, \frac{d\vec{q}_n}{dt} \right)$  - вектор-столбец ( $n$  x 1) обобщённых скоростей механизма;

$J$  - матрица Якоби размерностью (3 x  $n$ ).

С учётом (2.16) кинематический инвариант  $I_K$  в обобщённых координатах:

$$I_K = \vec{v}^T \vec{v} = \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T (J^T J) \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right), \quad (2.17)$$

где  $J^T$  - транспонированная матрица Якоби.

Обозначив,

$$(J^T J) = M, \quad (2.18)$$

получаем матрицу манипулятивности  $M$  ( $n \times n$ ).

Тогда с учётом (2.18) кинематический инвариант в обобщённых координатах имеет вид:

$$I_K = \vec{v}^T \vec{v} = \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T M \left( \frac{d\vec{q}}{dt} \right), \quad (2.19)$$

Кинематический инвариант в параметрической форме:

$$I_K = f\left(\frac{d\vec{q}}{dt}, J\right), \quad (2.20)$$

Полученное выражение (2.19) можно представить в виде симметричной квадратичной форме обобщённых скоростей:

$$I_K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \frac{d\vec{q}_i}{dt} \frac{d\vec{q}_j}{dt}, \quad (2.21)$$

где  $m_{ij}$  - элемент матрицы манипулятивности  $M$  механического устройства.

Представление инварианта в квадратичной форме позволит геометрически интерпретировать его при помощи характеристических поверхностей. В общем случае для симметричных квадратичных форм характеристическая поверхность имеет форму  $n$  – мерного эллипсоида [79]. Это позволит получить графическое представление множества скоростей концевых точек  $k$  – го мехатронного модуля.

Уравнение эллипсоида для кинематического инварианта имеет вид:

$$(\vec{U}^T M \vec{U}) = 1, \quad (2.22)$$

где  $\vec{U}$  - вектор, задающий направление движения в пространстве.

Преобразуя формулу (2.22) для описания  $n$  – мерного эллипсоида кинематики получаем:

$$R_{\min} = 1/\sqrt{\lambda_{\max}} ; R_{\max} = 1/\sqrt{\lambda_{\min}} , \quad (2.23)$$

где  $R_{\min}, R_{\max}$  - длины малой и большой полуосей эллипса;

$\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$  - максимальное и минимальное собственные числа матрицы  $M$ .

Представление кинематического тензора в виде многомерного эллипсоида кинематики (рисунок 2.4) позволяет дать наглядную геометрическую интерпретацию задачи поиска и выбора оптимального направления движения.

Критерием оптимизации является значение кинематического инварианта. Из выражения (2.19) для кинематического инварианта следует, что оптимальным будет направление собственного вектора матрицы манипулятивности  $M$ , которому соответствует максимальное собственное число этой матрицы. Эллипсоид кинематики представляет собой геометрическое место точек, определяющих положение выходного звена ММД с учетом кинематики ММ.

### **2.3.2 Построение динамической модели многозвенных исполнительных механизмов ММД на основе динамического инварианта**

При построении динамической модели динамическим инвариантом  $I_D$  является полная кинетическая энергия многозвенного механизма  $T$ . В общем случае для  $n$  – звенного устройства удвоенная кинетическая энергия в обобщённых координатах определяется в виде:

$$T = I_D = f\left(\frac{d\vec{q}}{dt}, I\right), \quad (2.24)$$

где  $I$  – тензор инерции ( $n \times n$ ) многозвенного механизма.

Полная кинетическая энергия рассматриваемой механической системы состоит из двух слагаемых:

$$T = T_a + T_p, \quad (2.25)$$

где  $T_a, T_p$  - кинетическая энергия манипуляционного механизма и нагрузки.

Динамический инвариант  $I_D$  можно представить как симметричную квадратичную форму обобщённых скоростей:

$$I_D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{d\bar{q}_i}{dt} \frac{d\bar{q}_j}{dt}, \quad (2.26)$$

где  $I_{ij}$  - элементы тензора инерции  $I$  ( $n \times n$ ) механического устройства.

В декартовой системе координат:

$$I_D = 2T = \bar{v}^T I_9 \bar{v}, \quad (2.27)$$

где  $I_9 = J^{-T} I J^{-1}$  - эквивалентный тензор инерции механизма.

Матрице (2.26) можно поставить в соответствие характеристическую поверхность, называемую эллипсоидом динамики [79]. Эллипсоид динамики представляет собой геометрическое место точек, определяющих положение выходного звена ММД с учетом динамических характеристик ММ. Область, образуемая пересечением эллипсоидов кинематики и динамики, является геометрическим местом точек пятна нагрева ЭЛ при его позиционировании по стыку с учетом кинематических и динамических характеристик ММ (рис. 2.2).

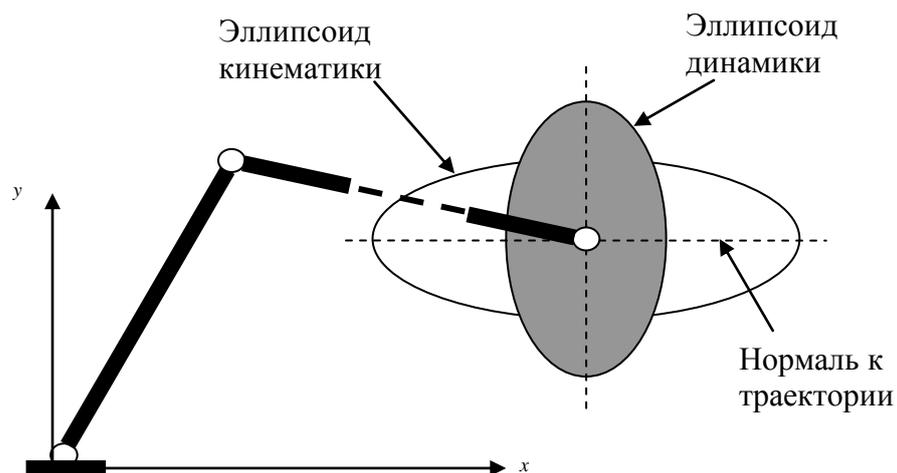


Рисунок 2.2 – Эллипсоиды кинематики и динамики мехатронной машины

Таким образом, совокупность двух тензоров – тензора кинематики (2.21) и тензора динамики (2.26) – позволяет построить комплексную математическую модель, которая описывает кинематические и динамические характеристики МС (рисунок 2.2).

### 2.3.3 Построение динамической модели многосвязных исполнительных механизмов ММД методом Лагранжа – Эйлера

Уравнения Лагранжа второго рода для голономной системы с  $n$  степенями свободы, которым отвечают обобщенные координаты  $q_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), имеют вид [79]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_{jд} \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (2.28)$$

где  $L = (T - \Pi)$  – функция Лагранжа, разности кинетической  $T$  и потенциальной  $\Pi$  энергий системы;

$Q_{jд}$  – обобщенные силы управляющих приводов, приведенные к  $j$ -ой обобщенной координате: они имеют размерность моментов, если  $q_i$  – угол поворота, или сил, если  $q_i$  – линейное перемещение.

С учетом того, что  $L = T - \Pi$  и  $\partial \Pi / \partial \dot{q}_j = 0$ , уравнение (2.28) примет вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j, \quad (2.29)$$

где  $Q_j = Q_{jд} + Q_{jв}$ ,  $Q_{jв} = -\partial \Pi / \partial q_j$ .

В последних равенствах через  $Q_{jв}$  обозначены внешние обобщенные силы, вызванные весом звеньев и груза, удерживаемого в схвате. При наличии внешнего воздействия – силы  $F_b$ , приложенной к схвату, в правую часть равенства для  $Q_j$  надо добавить член  $Q_{jF}$ , характеризующий это воздействие:

$$Q_j = Q_{jд} + Q_{jв} + Q_{jF}, \quad (2.30)$$

Используем выражение (2.29) для вывода уравнений динамики манипулятора. Рассматривая исполнительный механизм манипулятора как систему из  $n$  твердых тел, запишем его кинетическую энергию  $T$  в виде суммы кинетических энергий звеньев:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i, \quad (2.31)$$

В свою очередь величину  $T_i$  определим по формуле [94,120]:

$$T_i = \frac{1}{2} m_i v_{0i}^2 + m_i (\mathbf{v}_{0i} \times \boldsymbol{\omega}_i) \cdot \mathbf{r}_{iu} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_i^T \cdot \boldsymbol{\Theta}_{0i} \cdot \boldsymbol{\omega}_i, \quad (2.32)$$

где  $m_i$  – масса звена  $i$ ;  $\mathbf{v}_{0i}$  – скорость некоторой точки звена  $O_i$ , принятой за полюс;  $\mathbf{r}_{iu}$  – вектор радиус центра инерции звена в системе осей с ним связанных, начало которой совпадает с полюсом  $O_i$ ;  $\boldsymbol{\Theta}_{0i}$  – тензор инерции звена в точке  $O_i$ ;  $\boldsymbol{\omega}_i$  – вектор угловой скорости звена в принятой системе координат.

Если за полюс звена принять его центр инерции, то  $\mathbf{r}_{iu} = 0$ . Тогда выражение (2.30) принимает вид:

$$T_i = \frac{1}{2} m_i v_{0i}^2 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_i^T \cdot \boldsymbol{\Theta}_{0i} \cdot \boldsymbol{\omega}_i, \quad (2.33)$$

Кроме того, в большинстве случаев звенья манипулятора представляют собой твердые тела, обладающие симметрией относительно трех ортогональных осей, проведенных через центр инерции. Тогда тензор вектора инерции в точке  $O_i^0$  имеет вид диагональной матрицы:

$$\boldsymbol{\Theta}_{O_i^0}^0 = \begin{bmatrix} J_{x_i} & 0 & 0 \\ 0 & J_{y_i} & 0 \\ 0 & 0 & J_{z_i} \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

моменты инерции относительно осей в которой определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} J_x &= \iiint (y_i^2 + z_i^2) dm_i \\ J_y &= \iiint (x_i^2 + z_i^2) dm_i \\ J_z &= \iiint (x_i^2 + y_i^2) dm_i \end{aligned} \right\}, \quad (2.35)$$

Моменты инерции  $J_x, J_y, J_z$  для звеньев заданной конфигурации будут являться известными константами.

При отсутствии осевых симметрий тензор инерции звена в точке  $O_i^0$  характеризуется матрицей:

$$\Theta_{O_i} = \begin{bmatrix} J_{x_i} & -J_{x_i y_i} & -J_{x_i z_i} \\ -J_{y_i x_i} & J_{y_i} & -J_{y_i z_i} \\ -J_{z_i x_i} & -J_{z_i y_i} & J_{z_i} \end{bmatrix}, \quad (2.36)$$

центробежные моменты в которой определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} J_{x_i y_i} &= J_{y_i x_i} = \iiint x_i y_i dm_i \\ J_{x_i z_i} &= J_{z_i x_i} = \iiint x_i z_i dm_i \\ J_{y_i z_i} &= J_{z_i y_i} = \iiint y_i z_i dm_i \end{aligned} \right\}, \quad (2.37)$$

и также являются известными константами.

Определим вектор скорости центра инерции звена  $i$  через проекции на оси неподвижной системы осей в виде:

$$\mathbf{v}_{0iц} = (v_{0ixц}, v_{0iyц}, v_{0izц})^T, \quad (2.38)$$

По аналогии с  $\mathbf{v}_{iц}$  введем вектор угловой скорости звена:

$$\boldsymbol{\omega}_i = (\omega_{ix}, \omega_{iy}, \omega_{iz})^T, \quad (2.39)$$

и запишем равенство (2.33) в развернутой форме для случая, когда звенья манипулятора обладают симметрией относительно главных осей инерции. Для этого подставим выражения  $\Theta_{O_i}^0, \mathbf{v}_{iц}, \boldsymbol{\omega}_i$  из (2.34), (2.38), (2.39) в (2.33) и получим уравнение динамики  $i$ -звенного манипулятора:

$$T_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ m_i (v_{0ixц}^2 + v_{0iyц}^2 + v_{0izц}^2) + (J_{x_i} \omega_{ix}^2 + J_{y_i} \omega_{iy}^2 + J_{z_i} \omega_{iz}^2) \right], \quad (2.40)$$

где  $m_i$  – масса звена  $i$ ;  $v_{0iц}$  – скорость некоторой точки звена  $O_i$ , принятой за полюс;  $J_{xi}$  – момент инерции звена относительно оси  $X$ ;  $\boldsymbol{\omega}_i$  – вектор угловой скорости звена в принятой системе координат.

**Определение величины динамической погрешности.** Учитывая сложность построения динамических моделей многозвенных манипуляторов сварочной пушки и устройства перемещения заготовки, для определения величины динамической погрешности предложено получить эмпирические зависимости изменения перемещения выходного звена манипулятора от полученных значений кинетической энергии (2.40) в виде:

$$\Delta_{дин} = f(T_i), \quad (2.41)$$

где  $\Delta_{дин}$  - погрешность манипулятора, связанная с его динамическими характеристиками в исследуемых точках  $i$ .

Определив согласно (2.25,2.40) значения кинетической энергии  $T_i$  в исследуемых точках траектории и на основе экспериментальных данных, можно получить эмпирические зависимости изменения динамической точности манипулятора в исследуемых точках (2.41), учитывающие инерционные характеристики исполнительных устройств в составе АЭЛТК.

Учитывая, что в состав АЭЛТК могут входить два и более ММД, динамические составляющие погрешности обработки траектории сварного шва конечными точками выходных звеньев определяются на основании трёхмерного моделирования мехатронной системы АЭЛТК.

Анализ предложенных кинематической и динамической моделей системы позволяет определять возникающие отклонения ЭЛ от заданного положения по стыку при его позиционировании с учётом действующих в системе сил, скоростей и ускорений. Параметры физической модели управления позиционированием выходного звена МС, учитывающие кинематические и динамические погрешности при перемещении выходного звена манипулятора, включены в математическую модель процесса позиционирования ЭЛ по стыку.

## 2.4 Математическая модель процесса позиционирования электронного луча при ЭЛС

Модель процесса позиционирования электронного луча при ЭЛС включает в себя решение следующих задач:

1. Учёт полной погрешности мехатронных модулей движения, входящих в состав АЭЛТК.
2. Обеспечения критериев точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС.
3. Учёт воздействия на электронный луч фокусирующей и отклоняющей систем АЭЛТК.

В данной работе рассматривается позиционирование ЭЛ в реальном масштабе времени, так как определение положения луча перед началом процесса сварки не обеспечивает высокоточное позиционирование луча по стыку ввиду деформаций свариваемых изделий, искажения геометрии шва и погрешностей исполнительных механизмов. Идеальным, с точки зрения точности, является позиционирование ЭЛ по стыку непосредственно в процессе сварки.

Таким образом, на основе проведённого анализа факторов, влияющих на точность отработки траектории выходным звеном робота, была предложена обобщённая математическая модель, представленная в виде (2.42):

$$F(\Delta) = \begin{cases} \Delta r(\Delta q, \delta_{\Sigma}, J_{\Sigma}, \Delta q', \Delta_{\text{дин}}, I_K, I_D, v, m, n) \\ f_{T.П.}(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, v_{св}) \end{cases}, \quad (2.42)$$

где  $\Delta r$  – полная погрешность мехатронной системы АЭЛТК (2.3);  $\Delta q$  – погрешность системы управления и двигателя;  $\delta_{\Sigma}$  и  $J_{\Sigma}$  – кинематическая погрешность и мертвый ход преобразователя движения соответственно;  $\Delta q'$  – погрешность, вызванная податливостью механизма;  $I_K$  – кинематический инвариант;  $I_D$  – динамический инвариант;  $v$  – скорость выходного звена МС;  $m$  – масса рабочего органа МС;  $n$  – число звеньев, участвующих в движении;  $f_{T.П.}$  – параметры

технологического процесса,  $K_1 \dots K_5$  – критерии обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС (2.4-2.14);  $v_{св}$  - скорость сварки.

Степень влияния этих факторов на точность позиционирования выходного звена различна и зависит от характеристик оборудования АЭЛТК, режимов его работы и параметров процесса ЭЛС.

Для получения уравнений описания процесса позиционирования необходимо провести анализ преобразователей движения на основе кинематической схемы робота и определить величину полной погрешности, приведённой к выходному звену робота.

Входными параметрами модели являются следующие факторы: скорость и масса выходного звена МС, число звеньев, участвующих в движении, и виды движений. Выходным параметром модели является положение выходного звена манипулятора после отработки траектории сварного стыка.

В качестве допущений в предложенной модели принимаем:

- упругие свойства МС учитываем податливостью элементов конструкции;
- величину мёртвого хода преобразователей движения МС считаем постоянной для конкретного вида технологического оборудования АЭЛТК;
- погрешность системы управления и двигателей считаем постоянной детерминированной величиной.

Благодаря принятым допущениям упрощаем расчёт полной погрешности, что позволяет уменьшить расчётное время модели.

Ограничениями в данной модели являются: число звеньев манипулятора сварочной пушки, участвующих в движении, скорость перемещения и масса сварочной пушки и заготовки.

Начальные условия процесса позиционирования ЭЛ по стыку и условия его протекания:

- координаты заданных точек сварного стыка;
- допустимая погрешность позиционирования  $\Delta r_{\text{задан}}$ ;

- установление характеристических (опорных) точек при предварительном проходе (при необходимости);
- скорость сварки  $v_{св}$ ;
- технологические параметры ЭЛС ( $f_{т.п.}$ ).

Обобщённая математическая модель включает обеспечение критериев позиционирования электронного луча, определение и анализ величины полной погрешности ММД, входящих в состав АЭЛТК, анализ полученных инвариантов и выработку управляющего воздействия для корректировки положения луча. Особенностью предложенной модели является анализ процесса позиционирования выходного звена при его движении по некоторой пространственной траектории с учётом кинематических и динамических свойств системы и выбор соответствующего корректирующего воздействия.

Положение фокального пятна нагрева электронного луча (точка  $O$ ) на стыке свариваемых изделий определяется радиус-вектором  $\vec{r}$  (должны быть известны его модуль (длина) и направление в пространстве).

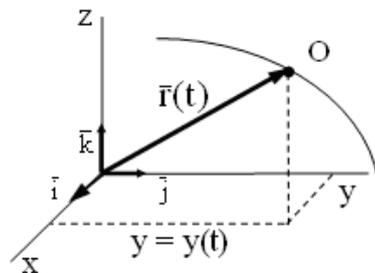


Рисунок 2.3 - Положение радиус-вектора  $\Delta\vec{r}$  движущейся точки  $O(x, y, z)$ .

Положение точки  $O$  описывается уравнением движения точки в декартовой системе координат [103]:

$$\Delta\vec{r} = \begin{cases} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{cases} \quad (2.43)$$

При сложном движении:

$$\Delta\vec{r} = \vec{i} \cdot x + \vec{j} \cdot y + \vec{k} \cdot z, \quad (2.44)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  - вектора-орты.

Модуль линейной ошибки

$$\Delta r_n = \sqrt{(\Delta x_n)^2 + (\Delta y_n)^2 + (\Delta z_n)^2}, \quad (2.45)$$

где  $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$  - ошибки позиционирования по осям  $x, y, z$  неподвижной системы координат, зависящие от ошибок обобщенных координат.

Таким образом, ошибка позиционирования является функцией декартовых координат точки позиционирования.

Рассмотрим определение точности позиционирования выходного звена согласно предложенной модели на примере  $n$ -звенного манипулятора с  $k$ -степенями свободы. Кинематическая схема манипулятора приведена на рис. 2.4.

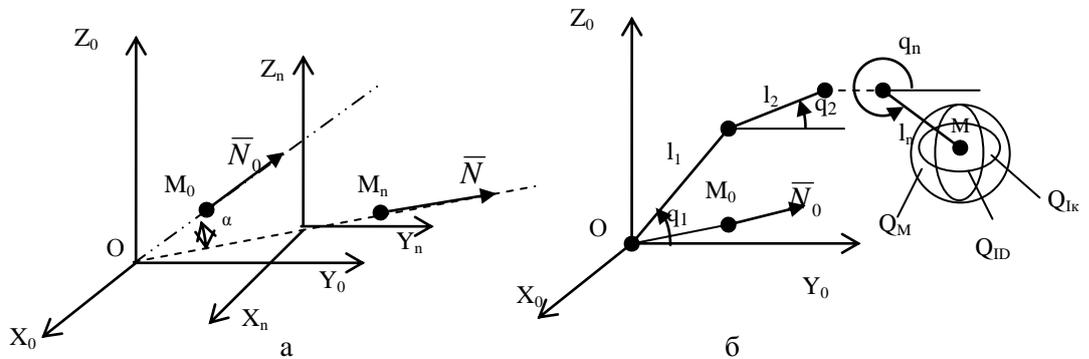


Рисунок 2.4 – Кинематическая схема  $n$ -звенного манипулятора.

Математически задача сводится к следующему: необходимо обеспечить совмещение единичного вектора  $\bar{N}$ , направленного по оси схвата и приложенного в центре рабочего органа (точки  $M$ ), находящегося в подвижной системе координат  $X_n Y_n Z_n$   $n$ -звенного манипулятора с заданной в неподвижной системе координат  $X_0 Y_0 Z_0$  единичного вектора  $\bar{N}_0$ , направленного по оси нагрузки и приложенного в точке  $M$  (рис. 2.4, а). Вместе с тем предполагается, что программное значение вектора  $\bar{N}_0$  обобщенных координат полностью известно.

Однако, учитывая наличие случайных погрешностей, действительные значения вектора обобщенных координат неизвестны. В результате этих погрешностей возникают: линейные погрешности ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ) смещения точки  $M$

вдоль соответствующих осей; угловая погрешность ( $\alpha$ ) отработки программного значения вектора обобщенных координат, угла между векторами  $\bar{N}$  и  $\bar{N}_0$  (рис. 2.4, а).

При позиционировании выходного звена в точке траектории введем область  $Q_m$ , которая является шаром точности с радиусом  $\Delta r_{\text{задан}}$  и центром в точке  $M$ . Геометрическое представление кинематического инварианта обозначим  $Q_{IK}$ , а динамического инварианта  $Q_{ID}$ . Геометрическое место точек пересечения эллипсоидов кинематики и динамики внутри области  $Q_m$  образует множество точек  $Q_S$ , характеризующее положения концевой точки выходного звена манипулятора с заданной точностью, то есть выполняется условие:

$$(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \cap Q_{IK} \cap Q_{ID} \in Q_S \quad (2.46)$$

где  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  – множества положений концевых точек выходных звеньев ММД, где  $n = 1 \dots k$  – число ММД в составе АЭЛТК;  $Q_{IK}, Q_{ID}$  – множества точек эллипсоидов кинематики и динамики соответственно;  $Q_S$  – множество точек, характеризующее область обеспечения заданной точности позиционирования.

При «непопадании» концевых точек  $M$  выходных звеньев всех ММД в полученную область  $Q_S$ , величина которой определяется кинематическими и инерционными характеристиками ММД, производится корректировка положения выходного звена с учётом величины полной погрешности  $\Delta r$  мехатронного комплекса АЭЛТК (2.3).

Типовая кинематическая схема ММД в составе АЭЛТК обычно включает в себя манипулятор сварочной пушки и устройство перемещения свариваемого изделия (рисунок 1.4). Тогда при  $n > 1$  необходимо совмещать полюс устройства перемещения сварочной пушки (точка  $M_1$ ) с точкой середины сварного стыка (точка  $M_2$ ), при этом эти точки должны принадлежать области  $Q_S$ . Область  $Q_S$  определяет множество возможных перемещений концевых точек всех ММД, как модулей перемещения сварочной пушки, так и модулей перемещения заготовки, при обеспечении критериев точного позиционирования ЭЛ по стыку.

В результате проведенного анализа факторов, влияющих на точность позиционирования ЭЛ по стыку, определена целевая функция процесса позиционирования ЭЛ при ЭЛС. Разработана математическая модель процесса позиционирования ЭЛ по стыку, содержащая критерии обеспечения точности позиционирования ЭЛ при ЭЛС и учитывающая влияние полной погрешности ММД АЭЛТК, включая кинематические и динамические характеристики механической части системы.

## **2.5 Формализация задачи управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС**

Основной целью повышения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС является повышение качества свариваемых изделий. Все это требует оперативности управления процессом позиционирования ЭЛ, которое достигается благодаря использованию современных автоматизированных систем управления. Задача повышения точности позиционирования ЭЛ сводится к управлению положением выходного звена манипулятора. Поставленная задача решается путем разработки алгоритмов управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку и использованием их для выработки решений по коррекции положения выходного звена манипулятора АЭЛТК.

В общем случае объектом управления является сложная многосвязная система, в состав которой входят:

- комплекс исполнительных приводов;
- механическое устройство с рабочим органом;
- блок сенсоров;
- объект работ, с которым взаимодействует рабочий орган [79].

Включение в рассмотрение процесса взаимодействия рабочего органа и внешних объектов, в данном случае ЭЛ и сварного стыка, позволяет организо-

вать технологически ориентированный процесс управления в конкретно поставленной задаче. Движение рабочего органа манипулятора как конечного управляемого звена обеспечивается взаимосвязанными (кинематически и динамически) перемещениями нескольких исполнительных приводов и звеньев механического устройства. Исходно задается желаемое движение рабочего органа, в нашем случае ЭЛП, а реализуется оно совокупными перемещениями всех звеньев. Для планирования заданного движения манипулятора необходимо решить обратную задачу о положении механизма. Суть задачи состоит в определении требуемых перемещений звеньев системы по заданному закону движения рабочего органа [79].

Желаемое положение фокального пятна нагрева (точка  $M$ ) ЭЛ на стыке задается в декартовой системе координат  $OXYZ$ :

$$\bar{X} = \text{col}(x_p, y_p, z_p, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z), \quad (2.47)$$

где  $x_p, y_p, z_p$  - декартовы координаты полюса  $P$  рабочего органа;

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  - углы, определяющие ориентацию связанной с рабочим органом системы координат относительно базовых осей.

Вектор-столбец обобщенных координат механизма:

$$\bar{q} = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2.48)$$

Тогда компоненты вектора (2.47) можно однозначно найти по вектору обобщенных координат (прямая задача о положении механизма):

$$\bar{X} = f(\bar{q}) \quad (2.49)$$

Обратная задача о положении механизма состоит в решении системы (2.49) относительно вектора обобщенных координат:

$$\bar{q} = f^{-1}(\bar{X}) \quad (2.50)$$

Для перемещения выходного звена манипулятора в заданную позицию необходимо выполнять уравнение:

$$\bar{x}_p = \bar{x}_0, \quad (2.51)$$

где  $\bar{x}_p$  - координаты полюса выходного звена;

$\bar{x}_0$  - декартовы координаты целевой (заданной) точки.

Однако выполнение уравнения (2.51) технически невозможно, поэтому справедливо выражение:

$$|\bar{x}_p - \bar{x}_0| < \Delta r_{\text{задан}}, \quad (2.52)$$

где  $\Delta r_{\text{задан}}$  – технологически допустимая погрешность позиционирования выходного звена манипулятора.

Для управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку используется математическая модель (см. п. 2.4), описывающая зависимость положения ЭЛ при его позиционировании по стыку при ЭЛС от кинематических и динамических характеристик ММД АЭЛТК:

$$Y = \varphi(X_{\text{inf}}) \quad (2.53)$$

где  $Y$  – вектор положения выходного звена манипулятора, учитывающий величину полной погрешности ММД и желаемое положение точки  $M(R(q)_{\text{ж}})$ ,  $Y(R(q)_{\text{ж}})$ ;  $X_{\text{inf}}$  – вектор параметров, влияющих на точность позиционирования ЭЛ по стыку,  $X_{\text{inf}}(\Delta r, K_2, K_3, K_4, K_5)$ ;  $\varphi$  – оператор системы, описывающий связь между указанными величинами.

На рисунке 2.5 показана структура подсистемы управления позиционированием ЭЛ при ЭЛС с обратной связью по определяемым критериям точности.

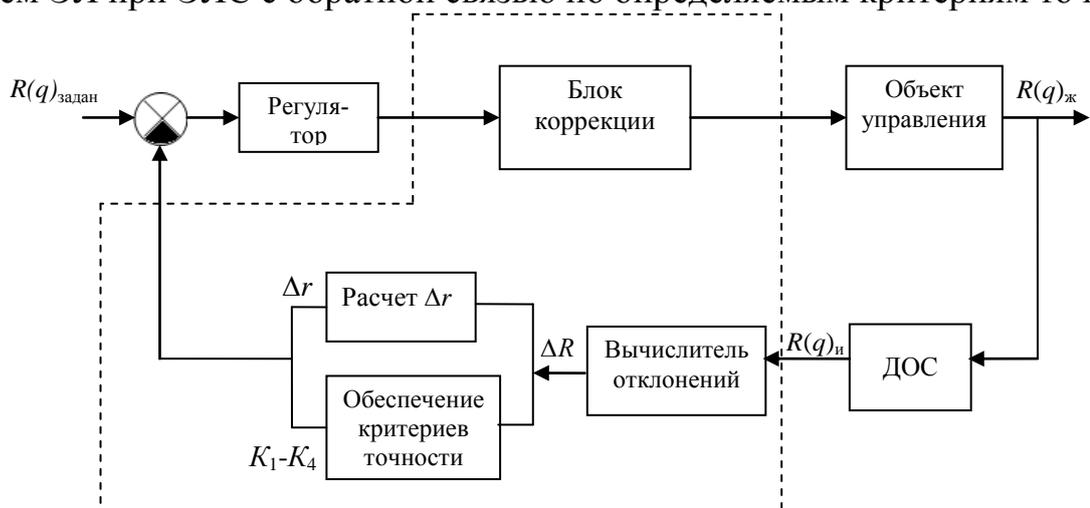


Рисунок 2.5 – Информационные и управляющие потоки модели управления позиционированием ЭЛ (пунктирной линией выделен модуль коррекции)

При этом критерии точности  $K_1-K_5$  могут быть описаны в виде системы:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \Delta r \leq \Delta r_{\text{задан}} \\ K_2 &= \theta \leq (6-7)^\circ, \\ K_3 &= B \leq d_{\text{П}} \leq 2B, \\ K_4 &= h = h_{\text{задан}} = \text{const}, \\ K_5 &= \begin{cases} h_1 = \text{const}, d_{\text{П}} = \text{var}, \\ h_1 = \text{var}, d_{\text{П}} = \text{const} \end{cases} \end{aligned} \right\}, \quad (2.54)$$

где -  $\Delta r$  – полная погрешность мехатронной системы АЭЛТК ( $K_1$ ), мм;  
 $d_{\text{П}}$  – диаметр ЭП, мм;  $h$  – расстояние от среза сварочной пушки до плоскости сварного шва, мм;  $H$  – толщина свариваемых изделий, мм;  $h_1$  – глубина проплавления, мм;  $L$  – длина сварного шва, мм;  $B$  – ширина зазора в стыке, мм;  $\theta$  – угол падения отклоненного ЭП на поверхность свариваемого изделия, град.

Вышеперечисленные параметры являются входными информационными воздействиями в модели управления позиционированием ЭЛ при ЭЛС. К ним также относятся:

- $\vec{X}$  - вектор обобщенных координат, описывающий желаемое положение полюса выходного звена ММД (точка  $M$ );
- $v_{\text{П}}$  - скорость перемещения луча по поверхности изделия, мм/с;
- $m_{\text{н}}$  - масса рабочего органа (ЭЛП), кг;
- $n$  - число звеньев ММД, участвующих в движении.

Выходным параметром модели управления является положение ЭЛ на стыке свариваемых изделий, определяемое на основе предложенных критериев точности (2.54).

Таким образом, предложена структура подсистемы управления позиционированием ЭЛ, отличающаяся тем, что она замкнута по определяемым критериям точности.

Построение математической модели позиционирования ЭЛ является первым этапом синтеза системы автоматизированного управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС. Полученная модель позволяет разработать алгоритм управления процессом позиционирования ЭЛ.

## **2.6 Управление процессом позиционирования ЭЛ при ЭЛС на основе учета погрешностей мехатронных модулей АЭЛТК**

Использование современных систем управления технологическими процессами позволяет повысить качество ответственных изделий машиностроения, снизить долю брака при условии сохранения или снижения себестоимости производства за счет автоматизации производства [2,12,14,83,87,88].

Высокоточное позиционирование ЭЛ по стыку обусловлено требованиями к сварочному процессу и необходимо для получения качественных швов. Однако высокая скорость сварки, деформации свариваемых изделий в процессе сварки, возникающие погрешности исполнительных механизмов, ограниченные возможности визуального наблюдения за процессом ЭЛС создают трудности в управлении позиционированием ЭЛ по стыку в процессе ЭЛС. Поэтому управление процессом позиционирования необходимо осуществлять в реальном масштабе времени.

В связи с этим созрела необходимость разработки автоматизированной системы управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС, выполняющей функции автоматизированного сбора и анализа информации о процессе позиционирования ЭЛ, позволяющей рассчитывать отклонения положения фокального пятна нагрева ЭЛ от заданного, определять и прогнозировать положение ЭЛ по траектории сварного шва при ЭЛС с учетом кинематических и динамических характеристик ММД АЭЛТК.

### **2.6.1 Постановка задачи управления процессом позиционирования ЭЛ**

Анализ современного состояния и известных подходов к автоматизации процесса ЭЛС, проведенный в главе 1, позволяет сформулировать задачу

управления, решаемую в данной работе. **Задача управления** заключается в разработке алгоритма управления, который обеспечивает точное позиционирование ЭЛ по стыку на основе методики учета кинематической и динамической погрешностей механической части АЭЛТК.

**Цель управления** – повышение качества сварных соединений, получаемых при ЭЛС, за счет разработки алгоритма управления точностью позиционирования ЭЛ по стыку.

**Объект управления** – положение фокального пятна нагрева ЭЛ, положение которого определяется параметрами ЭЛП и геометрическими характеристиками сварного стыка.

Постановка задачи управления движением исполнительного механизма мехатронного модуля (манипулятора) заключается в формировании моделей, устанавливающих взаимосвязь между пространственным состоянием манипулятора и относительными положениями его звеньев. При этом относительные положения звеньев манипулятора характеризуются вектором обобщенных координат (или их приращений), выступающих в роли управляющих параметров:

$$\Delta R = R(q) - R_{ц} \leq \Delta r_{\text{задан}}, \quad (2.55)$$

где  $q = (q_1, q_2, q_3)$  – вектор обобщенных координат;  $R(q)$ ,  $R_{ц}$  – величины векторов и углов текущего и целевого положений манипулятора;  $\Delta R$  – рассогласование величин векторов текущего и целевого положений манипулятора;  $\Delta r_{\text{задан}}$  – заданная точность минимизации рассогласования величин векторов текущего и целевого положений манипулятора (заданная точность позиционирования).

Анализ способов определения положения ЭЛ по стыку при ЭЛС с учетом погрешностей манипуляторов ЭЛП и заготовки и критериев точности позиционирования ЭЛ как объекта управления, описанных в параграфах 2.2- 2.4, позволяет разработать автоматизированную систему управления процессом позиционирования ЭЛ для решения поставленной задачи.

## 2.6.2 Разработка структурной схемы системы управления процессом позиционирования ЭЛ

На рисунке 2.6 показана структурная схема мехатронной системы, отображающая передачу управляющих сигналов от систем управления различного уровня к устройствам АЭЛТК, а также реализующая обратную связь от объекта управления к системе управления процессом ЭЛС.

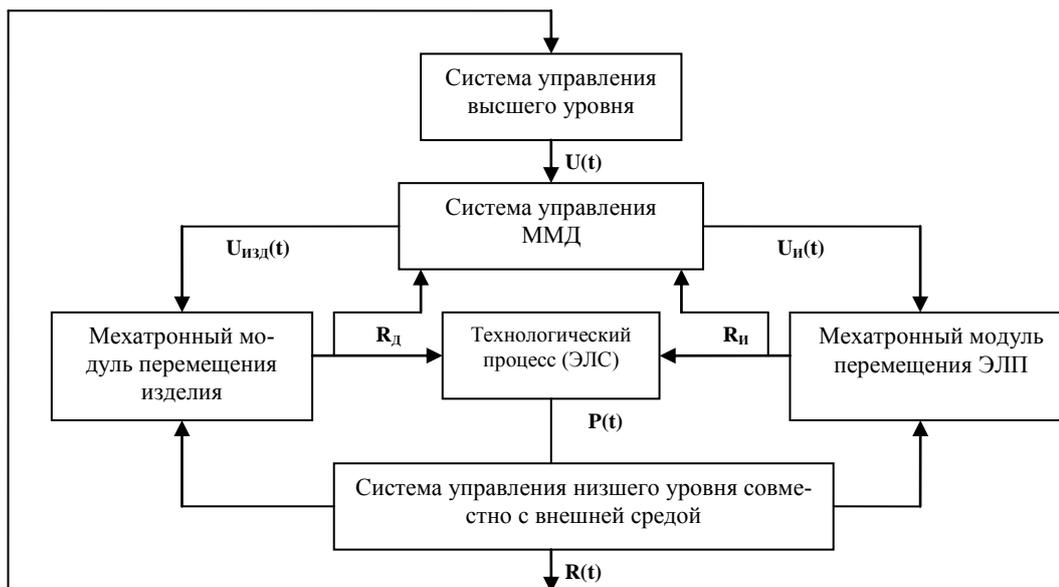


Рисунок 2.6 - Структура мехатронной системы, где:  $U(t)$  – канал передачи управляющих сигналов на систему управления низшего уровня;  $U_{изд}(t)$  – управляющие сигналы на ММД изделия;  $U_{ин}(t)$  – управляющие сигналы на ММД инструмента;  $R(t)$  – обратная связь от системы управления низшего уровня.

На рисунке 2.7 показана структурная схема системы управления процессом позиционирования ЭЛ на основе учета погрешностей ММД АЭЛТК.

Рассматриваемая система управления использует контур измерения положения ЭЛ по стыку в процессе сварки на основе вторично-эмиссионного датчика положения (ДОС) и блока сравнения (ЭС) для проверки выполнения условия точности позиционирования ЭЛ (2.55).

Система содержит управляющую ЭВМ и электромеханическую подсистему АЭЛТК (рисунок 2.7). Управляющая ЭВМ содержит задающее устройст-

во, блок сравнения, корректирующее устройство, блок расчета погрешностей ММД АЭЛТК и блок расчета параметров критериев обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку. Расчет и анализ полной погрешности ММД АЭЛТК проводится с помощью методики, описанной в п. 4.2.

Последовательность операций при управлении процессом позиционирования ЭЛ по стыку с помощью разработанной автоматизированной системы может быть описана алгоритмом, представленным на рисунке 2.8. На первом этапе в задающее устройство вводятся технологические параметры, связанные с устройством перемещения ЭЛП и с устройством перемещения сварного изделия - скорость и масса выходного звена манипулятора ЭЛП, число звеньев, участвующих в движении, и виды движений, параметры сварного стыка на основе физической модели объекта управления (рисунок 1.5), программные (заданные) координаты  $R(q)_{\text{задан}}$  опорных точек ( $i$ ) сварного стыка; максимальное время сварки  $t_{\text{сварки}}$ . Затем блок расчета погрешностей рассчитывает полную погрешность  $\Delta r_{\text{задан}}$  в опорных точках. В блоке сравнения осуществляется проверка обеспечения критериев точности позиционирования в  $i$ -той точке и делается вывод об обеспечении заданной точности позиционирования.

Траектория криволинейного пространственного сварного стыка определяется совокупностью точек, среди которых выбираются опорные точки. Их выбор связан с изменением направления траектории сварного стыка, и их количество может быть различным. Таким образом, опорные точки устанавливаются там, где траектория сварного стыка изменяет направление и необходимо проводить расчет величины полной погрешности ММД.

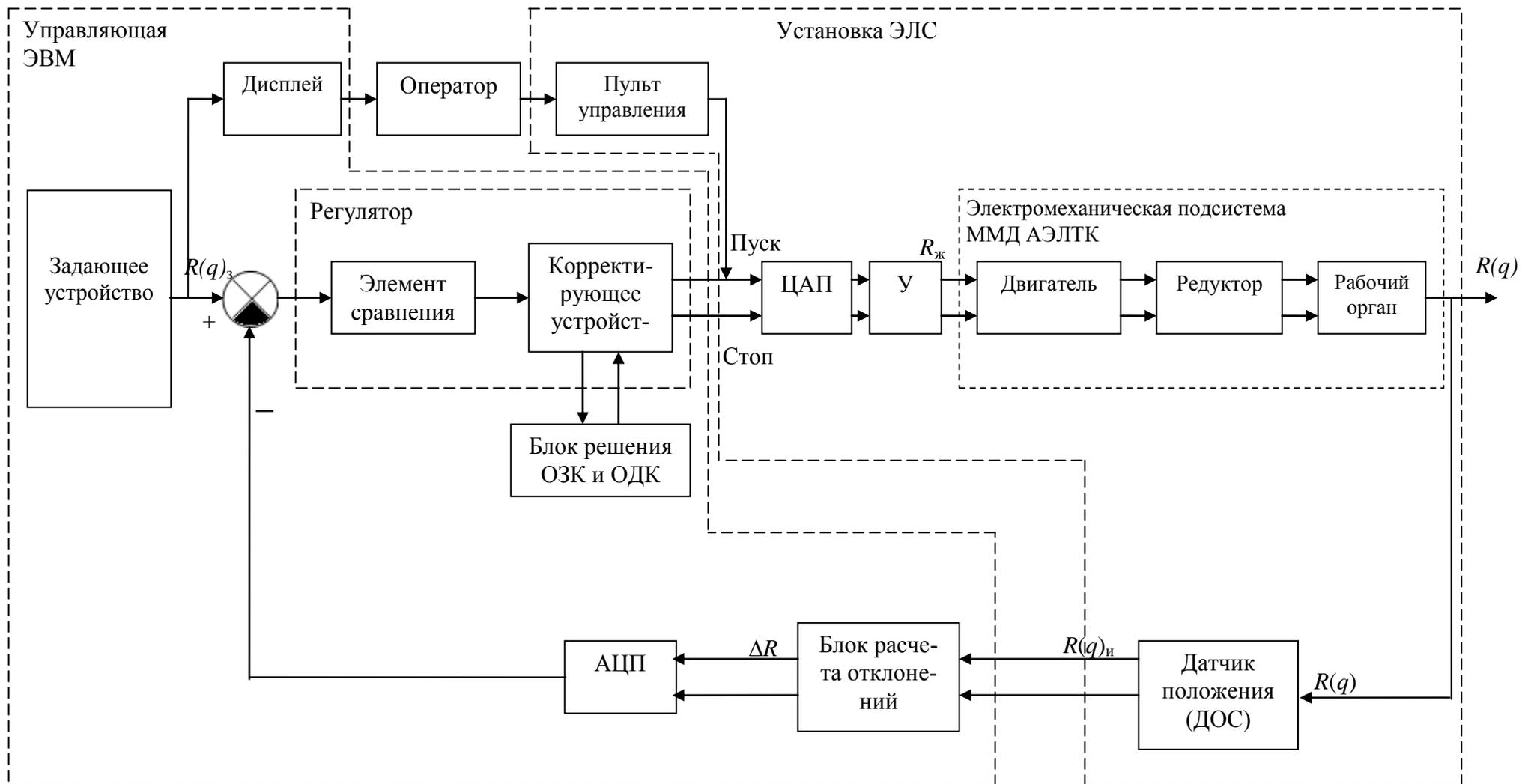


Рисунок 2.7 – Структурная схема автоматизированной системы управления процессом позиционирования ЭЛ при ЭЭС на основе учета погрешностей ММД АЭЛТК, где У - усилитель; ДОС – датчик обратной связи.

После запуска оператором программы вычисления полной погрешности ММД в составе АЭЛТК по методике, изложенной в п. 4.2, определяется желаемое положение  $R_{ж}$  выходного звена манипулятора ЭЛП с учетом величины погрешности. В ходе обработки с помощью контура обратной связи определяется текущее (истинное) положение  $R(q)_и$  выходного звена манипулятора, которое регулируется согласно критериям точности, описанным в п. 2.3.1 и п. 2.3.2.

Алгоритм управления процессом позиционирования электронного луча по стыку включает в себя следующие этапы:

1. Построение кинематической схемы манипуляторов, в том числе:
    - проведение структурного анализа ММД в составе АЭЛТК;
    - определение числа и видов преобразователей движения каждого ММД.
  2. Определение величины полной погрешности выходного звена манипулятора  $\Delta r_{задан}$  на основании построения кинематической и динамической моделей (допущения: кинематическая погрешность считается постоянной величиной для данной траектории, динамическая погрешность считается детерминированной величиной для данной  $i$  – той точки).
  3. Обоснование и выбор опорных точек сварного стыка ( $i$ ).
  4. Определение величины полной погрешности в  $i$ -той опорной точке. Анализ полученной величины: определение знака и направления радиус-вектора погрешности.
  5. Обеспечение критериев точности позиционирования в  $i$ -той точке.
  6. Составление и проверка условия вида:  $\Delta R \leq \Delta r_{задан}$  (2.45).
  7. Вывод об обеспечении заданной точности позиционирования:
    - 7.1. При истинном неравенстве: переход к  $(i+1)$ -й опорной точке;
    - 7.2. При ложном неравенстве: определение величины необходимой корректировки положения выходного звена – решение обратной задачи кинематики в данной опорной точке.
  8. Повторение шагов 4-7 для всех выбранных опорных точек.
- На рисунке 2.8 представлена блок-схема алгоритма, реализующего разра-

ботанные модели обеспечения точности позиционирования выходного звена с учётом полной погрешности ММД.

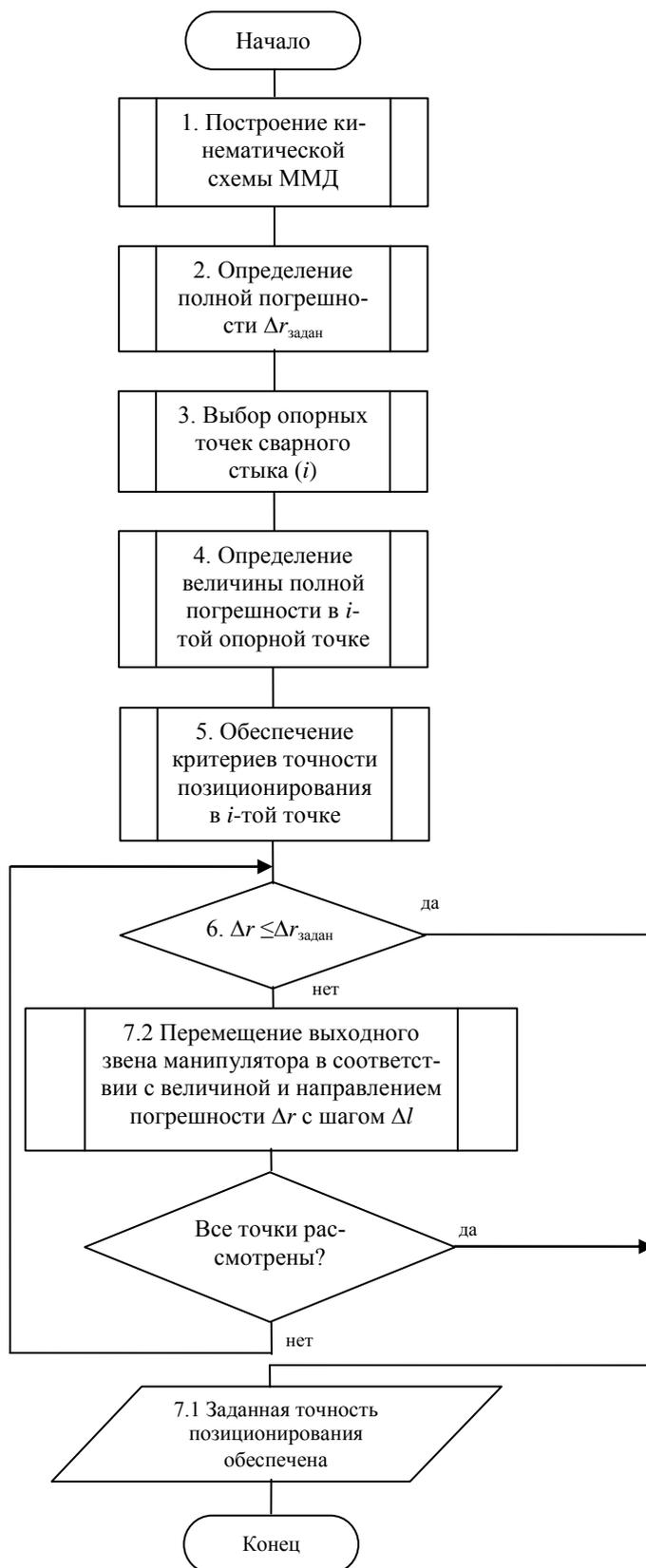


Рисунок 2.8 - Блок-схема алгоритма обобщённой модели обеспечения точности позиционирования выходного звена с учётом полной погрешности ММД.

Контур контроля  $\Delta R$  включает в себя датчик положения, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и блок расчета полной погрешности ММД АЭЛТК. Устройство сравнения сравнивает текущее и заданное значение  $\Delta R$ , оповещая оператора о результатах с помощью дисплея. При выполнении условия точности (2.55) происходит переход к следующей опорной точке сварного стыка. При несоблюдении условия точности в блоке корректировки проводится решение обратной задачи кинематики (ОЗК) и обратной задачи динамики (ОДК) по известной методике [94,109,112,120]. Таким образом, происходит регулирование положения ЭЛ по стыку при ЭЛС до достижения конца сварного стыка  $L$ , что свидетельствует о завершении алгоритма управления.

В зависимости от формы сварного шва (п. 1.3) управляющее воздействие для изменения положения фокального пятна нагрева ЭЛ  $\Delta R$  может вырабатываться:

1. Один раз в самом начале процесса сварки: в случае, когда геометрия стыкового соединения определяется простыми аналитическими зависимостями, и не требуется получение сварного шва с высокой точностью. В этом случае величина полной погрешности ММД АЭЛТК вводится в модель управления процессом позиционирования луча в начале сварочного цикла, являясь постоянной для всех точек сварного стыка.

2. Каждый раз при изменении траектории сварного шва: задаётся либо программно перед началом сварки (траектория сварного шва делится на участки с заданным количеством опорных точек до начала процесса сварки). В этом случае величина полной погрешности ММД АЭЛТК вводится в модель управления процессом позиционирования ЭЛ в начале сварного цикла, являясь постоянной для всех точек сварного стыка. Либо в системе управления процессом позиционирования ЭЛ, работающей в режиме реального времени, при получении сигнала рассогласования (сигнала о резком изменении координаты положения шва) для плоских сварных швов сложной геометрической формы. Тогда

величина полной погрешности ММД вводится в модель управления при изменении направления сварного шва в любой момент времени.

3. В каждой  $i$ -той опорной точке сварного стыка определяется величина отклонения ЭЛ от заданного положения и проводится коррекция положения по алгоритму, представленному на рисунке 2.8. Этот способ применим для пространственных криволинейных сварных швов.

Предложенный алгоритм управления позиционированием ЭЛ по стыку позволяет определить величину и направление отклонения ЭЛ от заданного программой положения в каждой точке траектории и скорректировать положение выходного звена в соответствии с предложенной моделью учета погрешностей манипулятора.

### **2.6.3 Синтез регулятора при управлении процессом позиционирования ЭЛ по стыку**

Управляющее воздействие при управлении процессом позиционирования ЭЛ при ЭЛС осуществляется регулятором [66,116,118]. В качестве регулятора выбран ПИД-регулятор. Эти регуляторы легко настраиваются и дешевы при массовом изготовлении. Особенно важно то, что с помощью ПИД-регуляторов можно реализовать комбинированное управление (рисунок 2.9), при котором используется информация одновременно о трех воздействиях  $x(t)$ ,  $y(t)$  и  $g(t)$ . При реализации такого принципа управления СУ работает с предвидением, то есть начинает компенсацию внешнего возмущения раньше, чем возникнет достаточно большое отклонение. Тем самым это повышает точность и быстродействие системы.

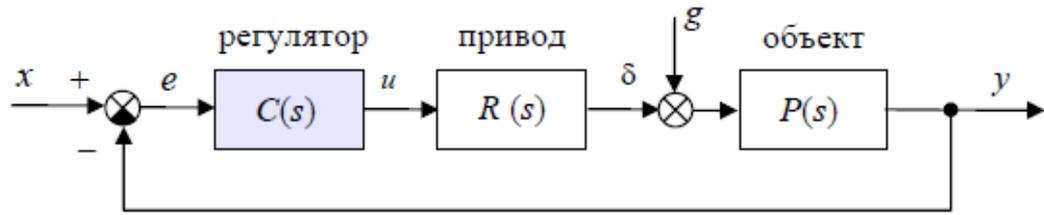


Рисунок 2.9 – Схема включения объекта управления в систему управления, где  $x(t)$  – входной сигнал;  $y(t)$  – выходной сигнал;  $g(t)$  – внешнее воздействие.

ПИД-регуляторы воздействуют на объект пропорционально отклонению  $e$  регулируемой величины, интегралу от этого отклонения и скорости изменения регулируемой величины [36,39]:

$$u(t) = Ke(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.56)$$

где  $K$  – коэффициент усиления;

$K_I$  – коэффициент усиления интегрального канала;

$K_D$  – коэффициент усиления дифференциального канала;

$e(t)$  – входное воздействие на регулятор, равное отклонению регулируемой величины от заданного значения для непрерывного времени;

$\tau$  – переменная интегрирования.

Для устойчивого объекта можно выбрать коэффициенты регулятора опытным путем, выполняя эксперименты с реальным объектом. Предложено несколько методов решения этой задачи, например, правила Зиглера-Никольса или Козна-Куна [122].

Величина полной погрешности мехатронного модуля АЭЛТК  $\Delta r$  учитывается в слагаемом  $e(t)$  формулы (2.55). В зависимости от параметров настройки ПИД-регулятора и от типа сварного соединения осуществляется выработка управляющего воздействия  $u(t)$ .

В результате экспериментального исследования были получены данные, описывающие переходные процессы в каждой точке траектории сварного стыка. На основании этих данных для синтеза регулятора предлагается использовать метод, основанный на использовании логарифмических частотных харак-

теристик (ЛАФЧХ) [104]. Применение данного метода позволит получить передаточную функцию регулятора:

$$L_C(\omega) = L_{жс}(\omega) - L_0(\omega), \quad (2.57)$$

где  $L_{ж}(\omega)$  – желаемая ЛАЧХ;  $L_0(\omega)$  – ЛАЧХ объекта управления,

$L_0(\omega) = 20lg|G(j\omega)|$ , где  $G(j\omega)$  - передаточная функция объекта управления вместе с приводом.

Определив экспериментально время переходных процессов при перемещении выходного звена манипулятора по стыку, предлагается провести синтез регулятора. Регулятор выдает сигнал о заданном положении выходного звена, а на вход регулятора подается сигнал о действительном положении манипулятора. Для повышения точности позиционирования выходного звена корректирующей величиной является полная погрешность электромеханической подсистемы манипулятора. Используя принцип управления «по отклонению», регулятор с полученной передаточной функцией вырабатывает управляющее воздействие, направленное в сторону уменьшения сигнала рассогласования. Такое управление является наиболее гибким, так как при этом учитывается действительное состояние объекта управления.

## 2.7 Выводы по главе

1. В результате анализа современных систем слежения за стыком в процессе сварки выявлены факторы, не учитываемые при позиционировании ЭЛ стыку в режиме реального времени, а именно кинематические и динамические характеристики ММД, входящих в состав АЭЛТК.

2. Определены критерии, обеспечивающие точное позиционирование ЭЛ по стыку:

- учёт воздействия на положение ЭЛ фокусирующей и отклоняющей систем АЭЛТК;

- обеспечение перпендикулярности оси ЭП к плоскости симметрии стыка;
- обеспечение сохранения неизменным диаметра фокального пятна нагрева  $d_{\text{П}}$  на поверхности стыка свариваемых деталей;
- соблюдение расстояния  $h$  от среза сварочной пушки до свариваемой поверхности;
- обеспечение сохранения постоянной глубины проплавления  $h_1$ ;
- обеспечение положения ЭЛ посередине стыка;
- учёт динамических характеристик ММД АЭЛТК.

3. Установлено, что на положение фокального пятна нагрева ЭЛ при прохождении траектории сварного стыка влияет величина полной погрешности ММД АЭЛТК. Определение данной погрешности и её учёт в качестве корректирующей величины при управлении позиционированием обеспечивает более точное наведение ЭЛ на стык .

4. При соблюдении условий (2.46, 2.55) обеспечивается точное позиционирование ЭЛ по стыку, в противном случае осуществляется коррекция положения фокального пятна нагрева ЭЛ на поверхности стыка с учётом величины полной погрешности ММД АЭЛТК.

5. Разработана физическая модель объекта управления, представленная в данной работе совокупностью кинематической и динамической моделей ММД АЭЛТК. Уравнения кинематики и динамики движения манипулятора могут быть получены традиционным методом Лагранжа – Эйлера, обеспечивающие строгое описание динамики манипулятора, либо с использованием инвариантов на основе тензорного анализа, который является эффективным методом создания аналитических зависимостей.

5. Разработана математическая модель процесса позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС в режиме реального времени, учитывающая полную погрешность мехатронной системы АЭЛТК и включающая в себя обеспечение критериев позиционирования ЭЛ. Предложенная математическая модель позволяет получить более полную картину всего процесса позиционирования электронно-

го луча при ЭЛС при заданных режимах с учетом факторов, влияющих на положение ЭЛ по стыку, в реальном масштабе времени. Это повысит точность позиционирования ЭЛ по стыку и, как следствие, качество сварных изделий, получаемых с помощью технологии ЭЛС.

6. Разработана структурная схема автоматизированной системы управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку, реализующая алгоритмы управления на основе разработанной математической модели процесса позиционирования, обеспечивающая выполнение критериев точности позиционирования и учитывающая полную погрешность исполнительных устройств АЭЛТК.

7. Проведен анализ и обоснование выбора ПИД-регулятора для управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку на основе экспериментально полученных данных при определении времени переходных процессов в опорных точках сварного стыка.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЭЛС**

Мехатронная система АЭЛТК построена на модульном принципе и представлена совокупностью манипуляторов и устройств перемещения для ориентации ЭЛП и заготовки в процессе ЭЛС. Манипуляторы и устройства перемещения можно рассматривать как многоступенчатые преобразователи движения, состоящие из разного рода механических передач, приводимых в движение от серводвигателей и управляемых с помощью системы управления МС АЭЛТК.

В ходе проведенного анализа и теоретических исследований процесса позиционирования исполнительных устройств МС были предложены критерии обеспечения заданной точности позиционирования электронного луча по стыку и разработана математическая модель процесса позиционирования, для проверки которой необходимо провести экспериментальное исследование.

#### **3.1 Методика проведения экспериментального исследования**

При разработке методики проведения экспериментального исследования учитывались особенности процесса позиционирования при влиянии изменяющихся факторов, таких как скорость и масса рабочего органа.

В результате анализа процесса позиционирования выходного звена робота-манипулятора установлены значительные зависимости между скоростными и инерционными характеристиками робота и точностью, с которой он достигает заданную точку траектории. Поэтому для проверки модели целесообразно проведение экспериментального исследования.

**Цель исследования:** экспериментальная оценка влияния полной погрешности мехатронной системы на точность обработки траектории выходным звеном манипулятора.

**Объектом исследования** являлось положение выходного звена манипулятора при обработке заданной траектории, т.е. сварного стыка. Под траекторией понималась пространственная кривая сложной формы, однозначно детерминированная в пространстве глобальных координат. Геометрические характеристики сварного стыка заменялись координатами опорных точек, контроль которых мы проводили.

При проведении экспериментальных исследований параметры технологического процесса ЭЛС не учитываем, а исследуем влияние полной погрешности мехатронной системы на точность обработки траектории движения выходным звеном робота.

#### **Задачи экспериментального исследования:**

1. Разработать методику проведения экспериментального исследования, включая планирование эксперимента.

2. Проведение экспериментального исследования обеспечения точности позиционирования выходного звена робота-манипулятора на основе разработанной методики.

3. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Как было указано выше, на точность позиционирования выходного звена оказывает влияние величина полной погрешности мехатронной системы, которая зависит от многих взаимосвязанных факторов. Так, например, увеличение скорости выходного звена и массы нагрузки оказывает существенное влияние на кинематическую и динамическую составляющие погрешности, что в свою очередь влияет на точность позиционирования выходного звена манипулятора.

Исполнительные устройства мехатронной системы, по терминологии теории планирования экспериментов [1,35,68,113], относятся к «плохо организованным системам». Особенностью таких систем является то, что к ним можно применить традиционные методы многофакторного эксперимента и представить процесс позиционирования выходного звена в виде математической модели [89,98,105,126]. Следовательно, для расчёта и прогнозирования точности по-

позиционирования выходного звена МС при различных нагрузках соответствующие математические модели могут быть получены при использовании современных методов планирования многофакторных экспериментов [1,4,20].

В результате проведения испытаний устанавливается функциональная зависимость  $Y$  от нескольких независимых параметров  $x_1, x_2, \dots, x_N$ . В теории планирования эксперимента независимые параметры называются факторами, а сформированная задача относится к многофакторному ( $N$ -факторному) эксперименту. В данном исследовании факторами являются линейная скорость концевой точки рабочего органа мехатронной системы и масса нагрузки (масса рабочего органа). Таким образом, далее будет рассмотрен двухфакторный двухуровневый эксперимент. При двухуровневом эксперименте может быть получена линейная модель.

Известно, что при планировании экспериментов [1,3] по определению точности позиционирования могут быть использованы полиномиальные математические модели. Адекватность таких моделей подтверждена многочисленными экспериментами [1,38,56,86].

Полиномиальная модель для описания результатов экспериментов может быть записана в виде:

$$Y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_i^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (3.1)$$

где  $Y$  – выходной параметр;

$\beta_i, \beta_{ij}, \beta_j$  – коэффициенты уравнения регрессии;

$x_i, x_j$  – исследуемые переменные величины.

Определив коэффициенты регрессии [1,3], можно получить связь между интересующими нас выходными параметрами и большим числом входных переменных при неполном знании механизма рассматриваемого явления в целом.

Полиномиальная модель позволяет не только улучшить аппроксимацию, повышая порядок полинома, но при этом сохраняет линейность по параметрам аппроксимирующей функции, что облегчает последующие статистические процедуры, а именно: применение метода наименьших квадратов для оценки пара-

метров, выбор оптимального расположения точек в пространстве независимых переменных при планировании опытов и т. д. Кроме того, из анализа полинома можно получить представление о взаимодействии вводимых факторов и их влиянии на изучаемый параметр.

В настоящем исследовании проводится полный факторный эксперимент, что связано с малым числом значимых факторов. В матрице планирования такого эксперимента (табл. 3.3) реализованы все возможные сочетания уровней факторов [1,3].

Обработку результатов экспериментальных исследований для получения уравнения регрессии проводили по методике, изложенной в работе [79], с использованием программного продукта MATLAB [58,67].

Таким образом, применение методики планирования многофакторных экспериментов при проведении исследований позволит получить статистические математические модели исследуемого процесса, дать комплексную оценку влияния факторов на исследуемый параметр.

### 3.1.1 Планирование эксперимента

При планировании эксперимента использовалась наиболее простая линейная математическая модель. Уровни выбранных факторов менялись в соответствии с таблицей 3.2. Матрица планирования полного факторного эксперимента и уровни исследуемых факторов представлены в таблице 3.3.

**Выбор варьируемых факторов.** Выбор факторов и уровней варьирования является наиболее ответственным моментом в разработке методики планирования и проведения эксперимента, так как определяет достоверность и область применения полученных данных [1,68].

На основе анализа ранее полученных результатов исследований в главах 1 и 2 выявлены факторы, влияющие на точность позиционирования выходного

звена работа-манипулятора ЭЛП (2.1). В качестве исследуемых факторов приняты максимальная линейная скорость выходного звена робота  $v_{max}$  в тестовом и автоматическом режимах и масса нагрузки  $m_n$ . Остальные факторы считаем детерминированными, зависящими от характеристик конкретных ЭЛП, и, таким образом, исключаем их из рассмотрения в данном экспериментальном исследовании. В таблице 3.1 приведены наименование, обозначение и диапазон варьирования каждого фактора.

Таблица 3.1 - Наименование, обозначение и диапазон варьирования факторов

№ п/п	Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Диапазон варьирования
1	Максимальная линейная скорость выходного звена робота	$v_{max}$	мм/с	10...110
2	Масса нагрузки	$m_n$	кг	0...40,8

Диапазоны варьирования факторов выбирали из следующих соображений:

1. Принятый диапазон варьирования максимальных скоростей выходного звена выбирается в соответствии с проведенным анализом скоростей перемещения рабочего органа робота при ЭЛС. Технические характеристики выбранного робота позволяют реализовать режимы ЭЛС.

2. На основании проведенного анализа характеристик ЭЛП принят диапазон варьирования массы нагрузки. Под нагрузкой здесь понимаем массу рабочего органа робота-манипулятора. Масса ЭЛП в среднем составляет 40 кг [52,72,92].

Для проведения исследования и получения математической модели, определяющей зависимость точности позиционирования робота при отработке траектории от максимальной линейной скорости выходного звена робота  $v_{max}$  и от массы нагрузки  $m_n$ , составлен план эксперимента, представленный в таблице 3.3. Следует отметить, что кодовые обозначения переменных параметров на-

значались таким образом, чтобы можно было получить отдельно оценки для исследуемых факторов  $v_{max}$  и  $m_n$ . Экспериментальные исследования проводились по методике, изложенной в п. 3.1.2.

Таблица 3.2 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни факторов		Интервал варьирования
	-1	+1	
$X_1$ - масса нагрузки $m_n$ , кг	0	40,8	40,8
$X_2$ - линейная скорость выходного звена робота $v_{max}$ , мм/с	10,0	110,0	100,0

Для получения более полной зависимости точности позиционирования выходного звена от его линейной скорости  $v_{max}$  рассмотрен однофакторный эксперимент с четырьмя уровнями варьирования (табл. 3.3). Интервал варьирования линейной скорости был принят 100 мм/с (10-110 мм/с). Внутри интервала было выбрано 4 уровня скорости: 10 мм/с, 40 мм/с, 80 мм/с и 110 мм/с.

**Формирование матрицы планирования.** При планировании эксперимента использовалась линейная математическая модель. Уровни выбранных факторов менялись в соответствии с таблицей 3.2.

В соответствии с проводимым полным факторным экспериментом в матрице планирования реализованы все возможные сочетания уровней факторов. Всего предусмотрено 4 комбинации сочетаний факторов.

**Серия экспериментов по определению точности позиционирования выходного звена с учетом величины полной погрешности ММД, включая кинематическую и динамическую погрешности,** проведена по методике полного факторного эксперимента. Матрица планирования серии эксперимента для определения точности позиционирования выходного звена в зависимости от величины полной погрешности ММД представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица планирования полного факторного эксперимента  $2^2$  и уровни исследуемых факторов

№ опыта	$X_1$		$X_2$		$Y$
	Код	кг	Код	мм/с	
1	-	0	-	10	$Y_1$
2	-	0	+	110	$Y_2$
3	+	40,8	-	10	$Y_3$
4	+	40,8	+	110	$Y_4$

Нужно отметить, что выходной параметр  $Y$  определяется для трех серий эксперимента ( $Y_I, Y_{II}, Y_{III}$ ), описанных в п. 3.1.2.

Полиномиальная модель для описания результатов эксперимента:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (3.2)$$

Точность и надежность коэффициентов зависят от свойств выборки и нуждаются в статистической проверке. Вычислить коэффициенты регрессии можно по формуле:

$$\beta_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i, \quad j = 0, 1, \dots, k, \quad (3.3)$$

где  $N$  – количество опытов в эксперименте.

В таблице 3.4 представлена матрица планирования для двух факторов на двух уровнях с учетом эффекта взаимодействия.

Таблица 3.4 – Матрица планирования для двух факторов на двух уровнях с эффектом взаимодействия

$N$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	$Y$
1	+	-	-	+	$Y_1$
2	+	+	-	-	$Y_2$
3	+	-	+	-	$Y_3$
4	+	+	+	+	$Y_4$

Коэффициент  $\beta_{12}$  вычисляется обычным путем (3.3); столбцы  $X_1$  и  $X_2$  задают планирование; столбцы  $X_0$  и  $X_1X_2$  служат только для расчета. Ортогональность матрицы планирования позволяет получить независимые друг от друга коэффициенты.

В результате планирования эксперимента выбраны варьируемые факторы, влияющие на точность позиционирования выходного звена робота-манипулятора, и установлен диапазон их варьирования. Также рассмотрен однофакторный эксперимент (линейная скорость  $v_{max}$ ) с четырьмя уровнями варьирования.

### **3.1.2 Используемое оборудование и последовательность проведения эксперимента**

Натурные эксперименты по исследованию точности позиционирования выходного звена МС проведены на оборудовании Центра Высочайших Технологий при кафедре «Мехатронные системы» (ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»).

В качестве основного оборудования (мехатронной системы) выбран шестизвенный робот-манипулятор фирмы KUKA с напольным креплением, модель 163. (рисунок 3.1). Все шесть сочленений робота вращательные. В качестве внешнего измерительного устройства выбран лазерный датчик линейных перемещений ZX-LD100 (фирма OMRON) с точностью измерений 0,01 мм.

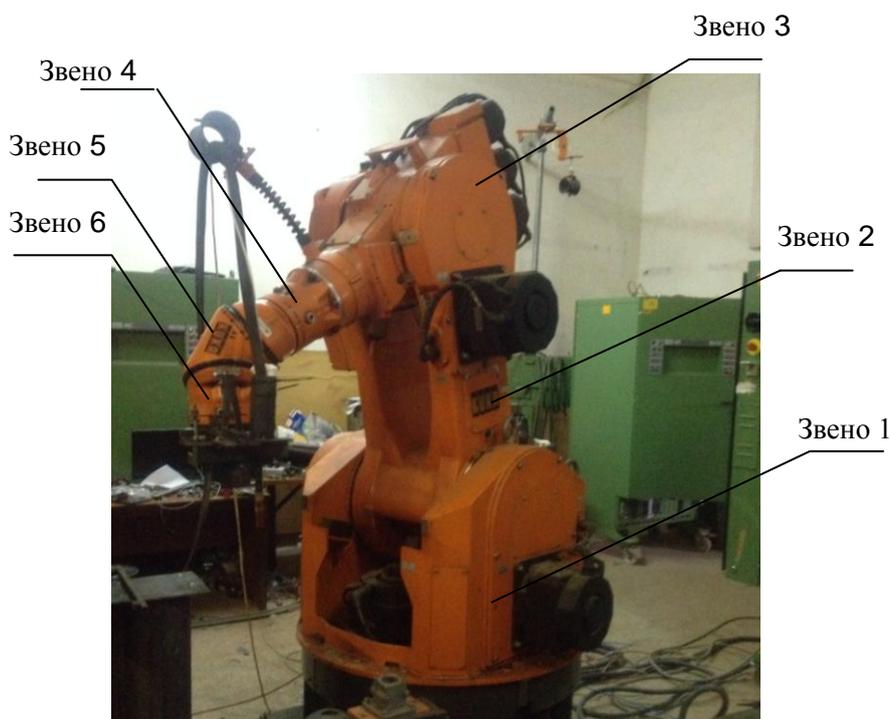


Рисунок 3.1 – Промышленный робот-манипулятор КУКА, модель 163. Общий вид.

Учитывая, что конструкция робота известна и траектория движения выходного звена строго детерминирована, были получены кинематическая и динамическая модели системы. Анализ полученной модели позволил определить ошибку позиционирования выходного звена робота в каждой исследуемой точке по методике, изложенной в п.4.2. Величина ошибки позиционирования выходного звена в точке определялась численным методом на основании разработанной методики вычисления полной погрешности с учётом кинематической схемы робота (п.4.2).

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.2. На монтажной площадке 1 выходного звена робота закреплён датчик положения 2, определяющий отклонения положения выходного звена от идеального положения на контактной площадке 3 исследуемой поверхности 4. Для оценки возникающих отклонений от заданного положения в измерительную цепь включён блок сравнения и вычислений 5, входящий в состав персонального компьютера 6. Для преобразования и усиления аналоговых сигналов, поступающих от дат-

чика, в цифровые сигналы для обработки на ЭВМ используется блок усилителей сигналов и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7 [102,111].

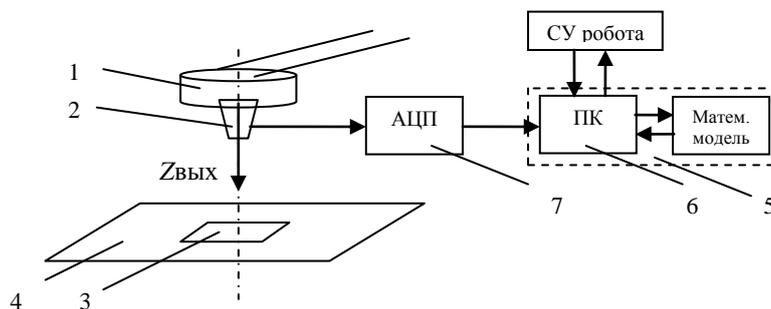


Рисунок 3.2– Схема экспериментальной установки для исследования точности позиционирования выходного звена робота

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунках 3.3-3.5.

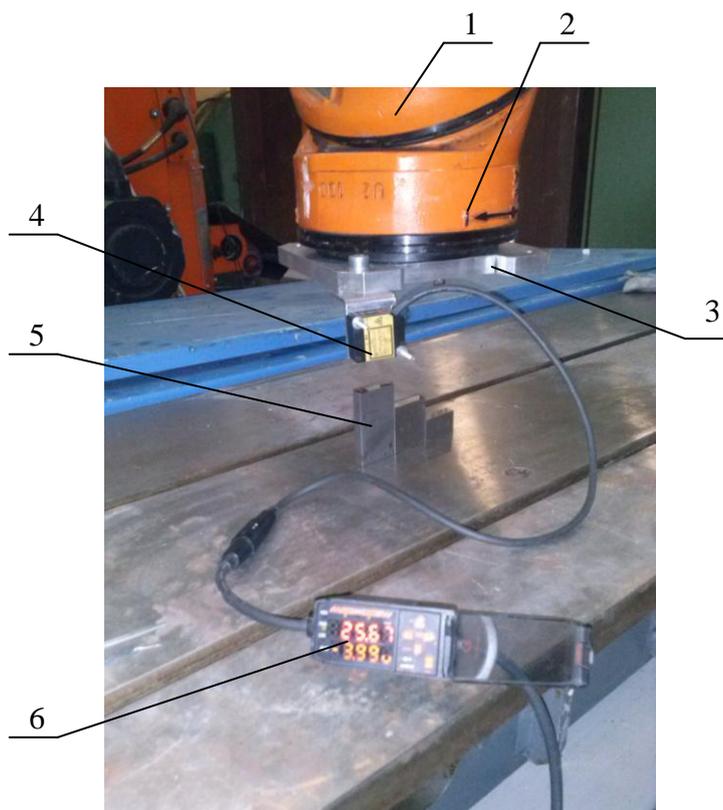


Рисунок 3.3– Общий вид экспериментальной установки: 1- звено 5; 2 – звено 6; 3 – монтажная площадка; 4 – датчик линейных перемещений; 5 – концевые меры; 6 – цифровое табло датчика.

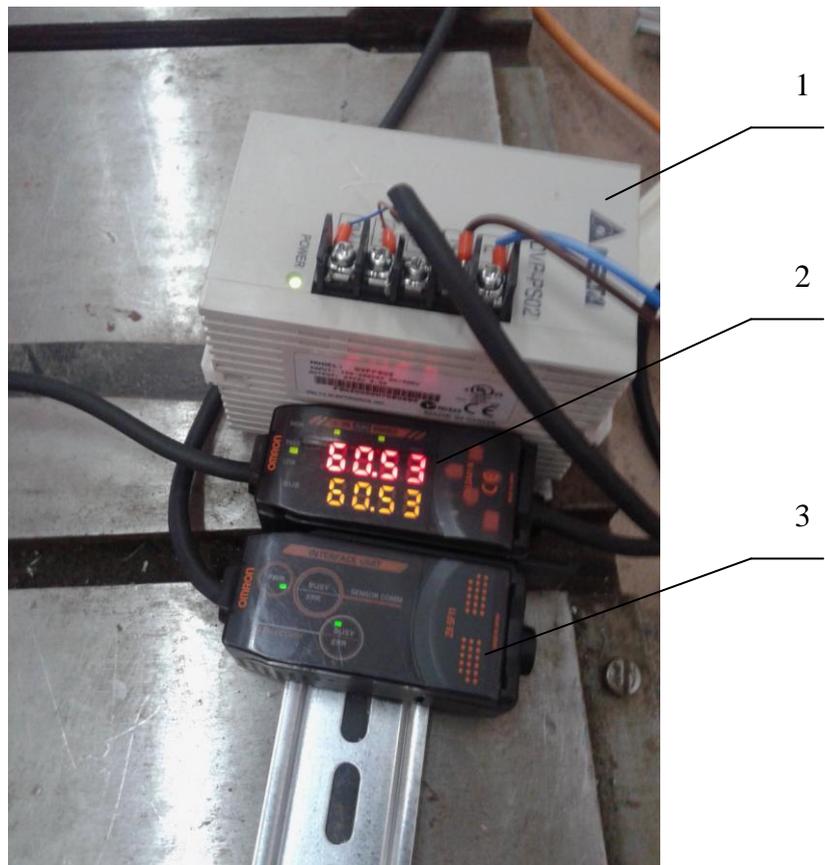


Рисунок 3.4– Датчик линейных перемещений ZX-LD100: 1 – блок питания; 2 - цифровое табло датчика; 3 – устройство обработки информации.

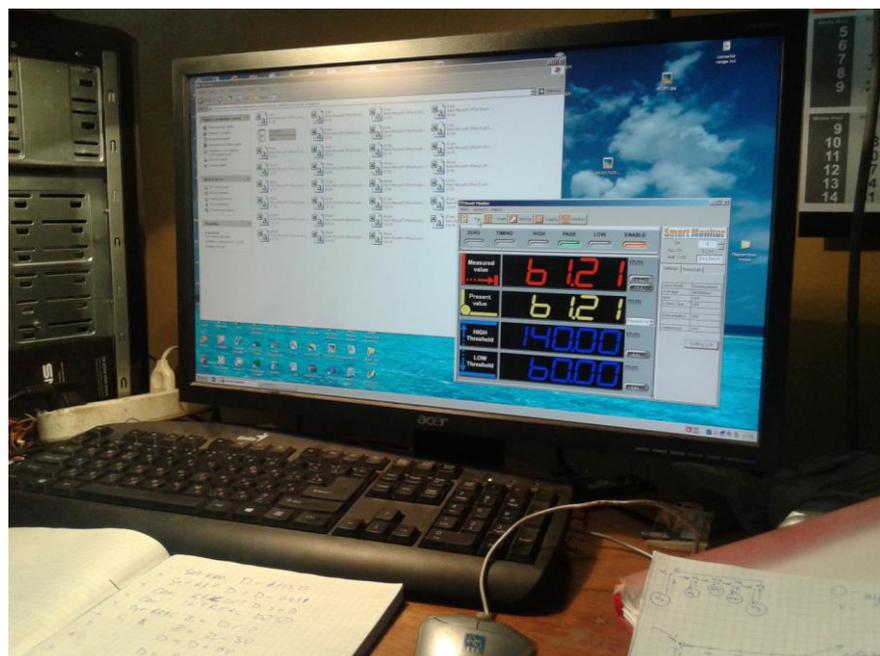


Рисунок 3.5– Программно-вычислительный комплекс

На рисунке 3.6 показаны результаты измерения положения выходного звена манипулятора в контрольных точках траектории с помощью программного обеспечения *OMRON*.

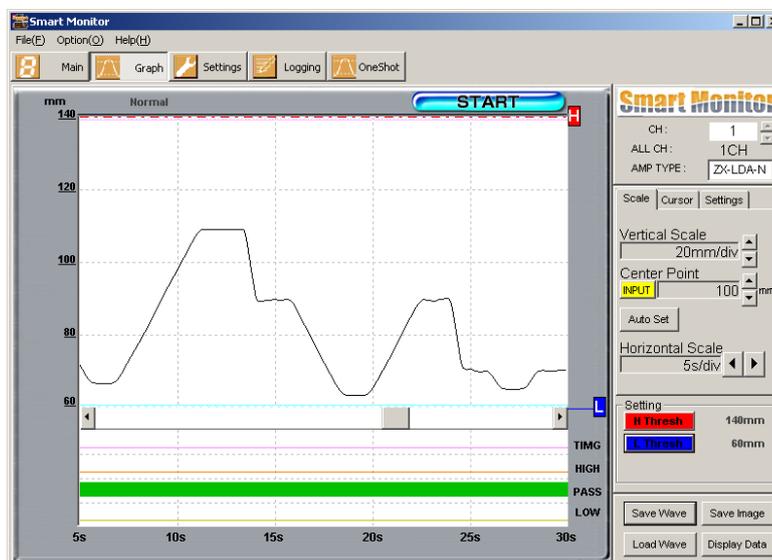


Рисунок 3.6 – Результаты измерения положения выходного звена манипулятора.

Технические характеристики экспериментальной установки:

- геометрические размеры исследуемой поверхности (4): длина 700 мм, ширина 300 мм;
- геометрические размеры контактной площадки (3) и расположение на ней концевых мер длины и исследуемых точек ( $T1-T5$ ) приведены на рисунке 3.7 [28,82];
- монтажная площадка (1) установлена на торцевой поверхности выходного звена робота-манипулятора перпендикулярно оси вращения звена;
- характеристики датчика положения (2) приведены в приложении А.
- характеристики ПК: ОС *Windows XP*.

Основные характеристики исследуемой поверхности шероховатости регламентируются [30,31].

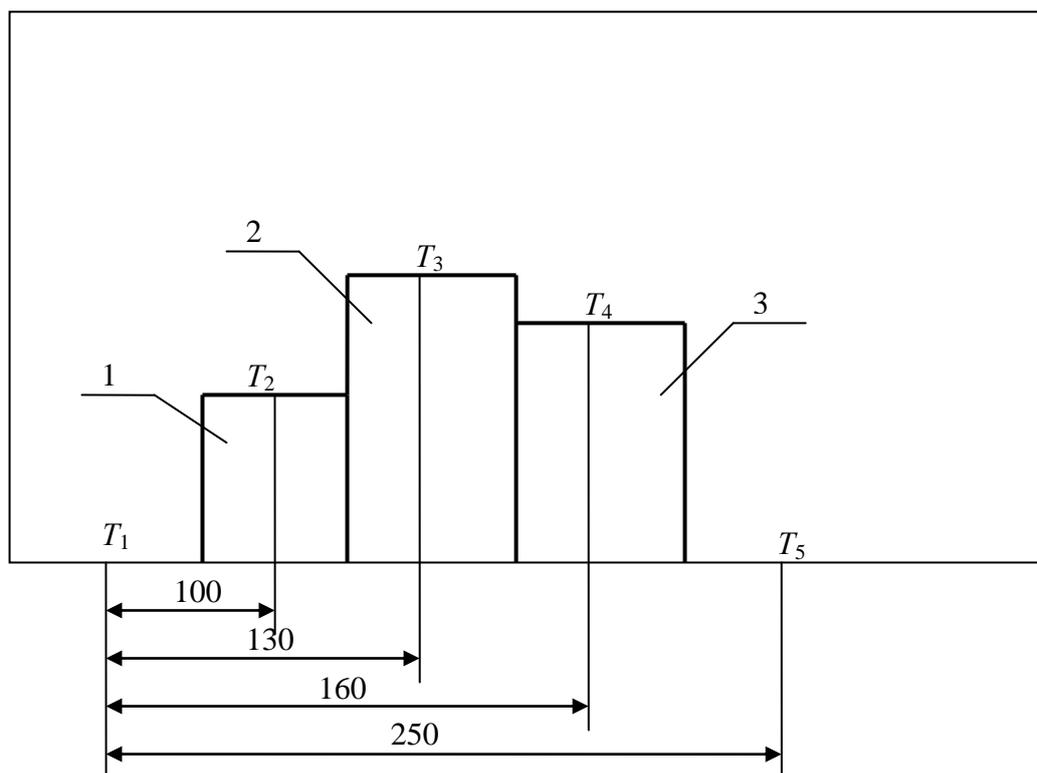


Рисунок 3.7 – Опорные точки ( $T_1 - T_5$ ) на исследуемой поверхности: поз. 1 – концевая мера длины (20 мм), поз. 2 – концевая мера длины (50 мм), поз. 3 – концевая мера длины (40 мм) [29].

Под траекторией в общем случае понимается пространственная кривая сложной формы, однозначно детерминированная в пространстве глобальных координат робота-манипулятора ( $OXYZ$ ). При проведении эксперимента траектория состояла из пяти опорных точек, расположенных в плоскости  $XZ$  (рисунок 3.7). Выбор опорных точек связан с изменением направления траектории сварного стыка, и их количество может быть различным. Геометрические характеристики сварного стыка заменялись координатами опорных точек  $T_1 - T_5$ , контроль которых проводился.

Модель идеальной траектории задаётся роботу в глобальных координатах с помощью программатора. Для этой траектории, состоящей из  $i$ -точек, предварительно строится кинематическая модель робототехнической системы. Измерение расстояния от датчика до исследуемой поверхности проводилось по оси

$Z$ , направленной перпендикулярно поверхности по оси вращения выходного звена робота (рис. 3.2).

**Серия экспериментов по определению точности позиционирования выходного звена МС без учета погрешностей.** С первой заданной контрольной точки  $i$ , где  $i = 1, 2 \dots 5$ , робот начинает движение по траектории в режиме *test* (тестовый) с номинальной скоростью для всех звеньев (приложение В), текущие координаты  $i$ -той точки  $(x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i)$  определяются собственной информационной системой робота и сравниваются с программными координатами. Вычисляется отклонение в каждой  $i$ -той точке траектории, определяется среднее значение по траектории, и данные заносятся в таблицу 3.9.

**Серия экспериментов по определению точности позиционирования выходного звена с учетом кинематической погрешности МС.** Кинематическая погрешность 4, 5, 6 звеньев робота, приведенная к выходному звену робота, определялась по формуле (4.16) и составила для данной конструкции робота-манипулятора 0,23 мм. С первой заданной контрольной точки  $T_1$ , робот начинает движение по траектории в режиме *test* (тестовый) с номинальной скоростью для всех звеньев, причём текущие координаты  $i$ -той точки  $(x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i)$  определяются собственной информационной системой робота. Перемещение в следующую  $(i+1)$ -ую точку траектории осуществляется согласно алгоритму:

1. С учётом полученной величины кинематической погрешности определяются координаты следующей точки  $T_i (x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i \pm \delta_{\Sigma})$ , и проводится проверка обеспечения критериев точности (2.3, 2.6, 2.7, 2.11, 2.14) в соответствии с математической моделью.

2. Выходное звено робота по программе движения перемещается в эту точку  $T_i (i = 1, 2 \dots 5)$ .

3. При достижении точки  $T_i$  определяются актуальные координаты точки  $(x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i)$  с помощью информационной системы робота, и одновременно происходит измерение отклонения по положению  $\Delta z$  датчиком положения выходного звена.

4. Проводится анализ полученных данных, и при выполнении условия (2.44) делается вывод об обеспечении заданной точности позиционировании работа.

5. При получении данных, когда условие обеспечения точности (2.44) ложно, делается вывод о необходимости корректировки положения для следующей точки с учётом показаний датчика, и проводится корректировка положения выходного звена работа в зависимости от знака величины отклонения  $\Delta z$  от идеального положения, после чего условие (2.43), а, следовательно, условие (2.44) выполняется.

6. Алгоритм повторяется для всех опорных точек траектории сварного шва.

Вычисляется отклонение в каждой  $i$ -той точке траектории, определяется среднее значение по траектории, и данные заносятся в таблицу 3.9.

#### **Серия экспериментов по определению точности позиционирования выходного звена с учетом полной погрешности МС.**

Полная погрешность 4, 5, 6 звеньев работа определялась с учетом динамических характеристик манипулятора на основе полученных эмпирических зависимостей (4.24). Начиная с первой заданной контрольной точки  $i$ , где  $i = 1, 2 \dots 5$ , робот отработывал заданную траекторию в режиме *test* (тестовый) с номинальной скоростью для всех звеньев. Текущие координаты  $i$ -той точки  $(x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i)$  определялись внешним датчиком линейных перемещений и сравнивались с программными координатами. Эти данные учитывались при определении координат следующей  $(i+1)$ -ой точки в виде  $(x^{act}_i, y^{act}_i, z^{act}_i \pm \Delta_{дин})$ . В каждой точке траектории проводится проверка обеспечения критериев точности (2.3, 2.6, 2.7, 2.11, 2.14) в соответствии с математической моделью. Алгоритм перемещения по траектории сварного стыка повторяется для всех контрольных точек. Вычисляется отклонение в каждой  $i$ -той точке траектории, определяется среднее значение по траектории, и данные заносятся в таблицу 3.9.

Следует отметить, что датчиком положения проводился внешний контроль за действительным положением выходного звена робота. Обеспечение заданной точности позиционирования выходного звена робота осуществляется на основании предложенной модели процесса позиционирования.

### 3.1.3 Определение величины полной погрешности выходного звена экспериментальной установки

Величина полной погрешности МС определялась численным методом (2.3) на основании кинематической схемы манипулятора, его характеристик и расчетных данных в соответствии с методикой (п. 4.2). Кинематическая схема робота-манипулятора представлена на рисунке 3.8.

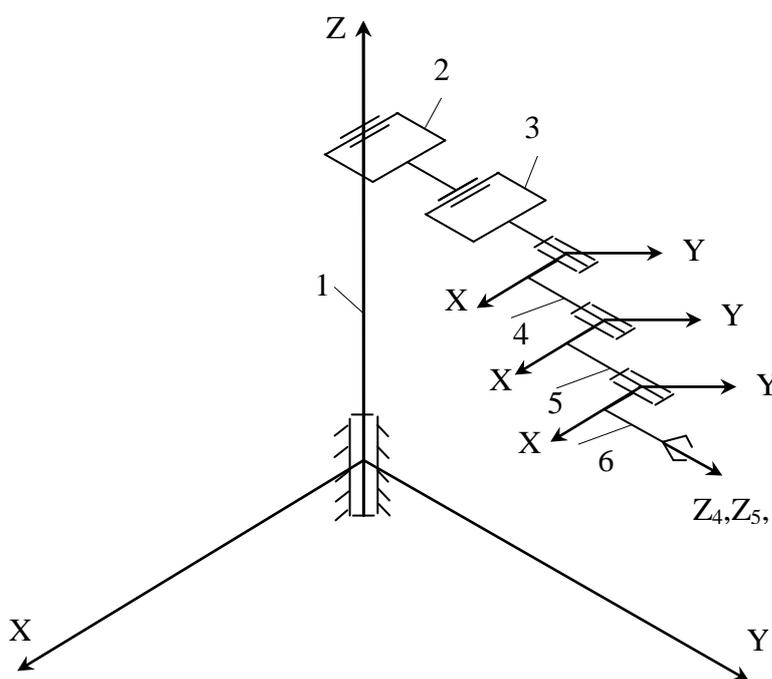


Рисунок 3.8 – Кинематическая схема робота-манипулятора

Для проведения кинематических расчётов при максимальной нагрузке была создана графическая модель робота, которая изображена на рисунке 3.9, с максимально вытянутой горизонтальной рукой (оси вращения звеньев 2-6 лежат на одной линии) вдоль главной оси манипулятора.

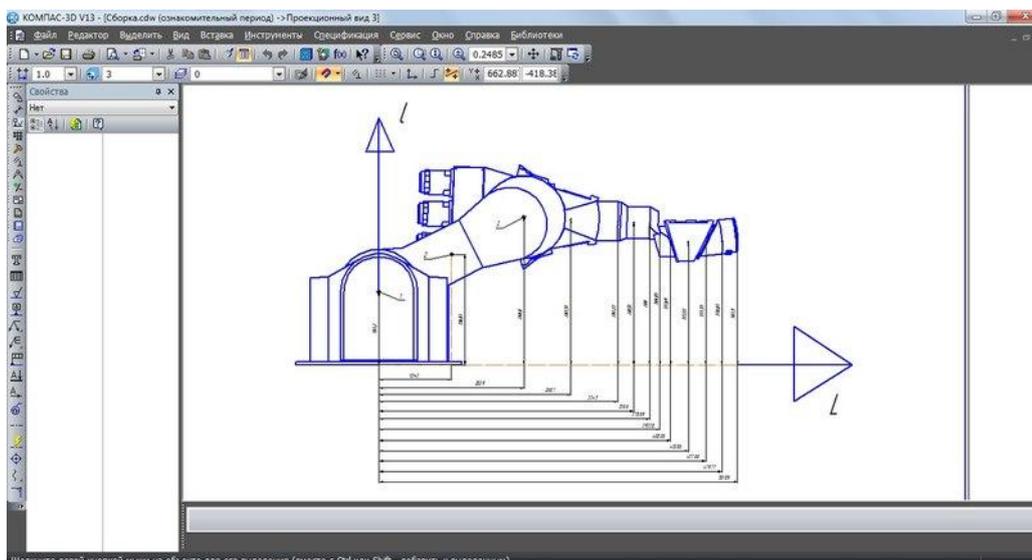


Рисунок 3.9 – Робот KUKA, модель 163, с вытянутой в горизонтальном направлении рукой

В предложенной модели для данной конструкции манипулятора приняты следующие допущения:

- упругие свойства элементов конструкции не учитываем;
- величину мёртвого хода преобразователей движения и погрешность системы управления и двигателей считаем постоянными детерминированными величинами.

Для получения величины полной погрешности манипулятора необходимо определить кинематическую и динамическую составляющие полной погрешности.

**Определение величины кинематической погрешности.** Кинематическая погрешность 4, 5, 6 звеньев робота приведена к выходному звену робота и определяется как суммарная кинематическая погрешность многоступенчатых преобразователей движения по методу максимума-минимума [33,42]:

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \delta_i, \quad (3.4)$$

где  $\delta_i$  - кинематическая погрешность  $i$ -й передачи:

- $\delta\varphi_i$ , рад (минуты), при преобразовании вращательного или  $F'_{i0}$ , м, поступательного движения во вращательное;

-  $F'_{10}$ , м, при преобразовании поступательного

или  $\delta\varphi_i$ , рад, вращательного движения в поступательное;

$\varepsilon_i$  - передаточный коэффициент погрешности  $i$ -й передачи, учитывающий изменение кинематической погрешности передачи при приведении ее к выходному звену кинематической цепи:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{u_{i+1,n}} = \frac{1}{\prod_{k=i+1}^n u_k}, \quad (3.5)$$

где  $u_{i+1,n}$  — передаточное отношение между  $(i+1)$ -й передачей и выходным звеном многоступенчатого механизма;  $u_k$  - передаточное отношение  $k$ -й передачи;  $n$  — число передач.

Расчет кинематической погрешности проводился для планетарной передачи [115], волновой передачи [32,42,107], конической косозубой и конической прямозубой передач [40,42]. В результате расчетов суммарная кинематическая погрешность  $\delta_\Sigma$ , приведенная к выходному звену манипулятора, составила 0,23 мм. Полученные расчетные данные сведены в таблицу 3.5.

**Определение величины динамической погрешности.** Существующий метод приближенного расчета динамических погрешностей роботов, представленный в [42,51,79], применим в тех случаях, когда программные траектории являются гладкими, а программные движения медленными. В случае сварочного манипулятора расчет необходимо производить через дискретные интервалы времени для корректировки положения выходного звена при отработке траектории [49,95,99].

Однако учитывая сложность построения динамических моделей многозвенных манипуляторов сварочной пушки и устройства перемещения заготовки, была предпринята попытка получить эмпирические зависимости изменения перемещения выходного звена манипулятора от полученных значений кинетической энергии в виде:

$$\Delta_{дин} = f(T_i), \quad (3.6)$$

где  $\Delta_{дин}$  - погрешность манипулятора, связанная с его динамическими ха-

рактическими в исследуемых точках  $i$ .

Полная кинетическая энергия механической системы:

$$T = T_a + T_p, \quad (3.7)$$

где  $T_a, T_p$  - кинетическая энергия манипулятора и рабочего органа.

Определив согласно (3.6, 3.7) значения кинетической энергии  $T_i$  в контрольных точках траектории (2.40) и на основе экспериментальных данных, получены эмпирические зависимости изменения динамической точности манипулятора в исследуемых точках, учитывающие инерционные характеристики исполнительных устройств в составе АЭЛТК. Эмпирические зависимости (3.6) были получены при следующих уровнях выбранных факторов:  $m_n=40,8$  кг;  $v_{max1}=10$  мм/с,  $v_{max2}=30$  мм/с,  $v_{max3}=60$  мм/с,  $v_{max4}=80$  мм/с,  $v_{max5}=110$  мм/с.

На рисунке 3.10 показана эмпирическая зависимость динамической погрешности манипулятора от кинетической энергии в опорных точках траектории при перемещении выходного звена манипулятора по траектории при изменении скоростей.

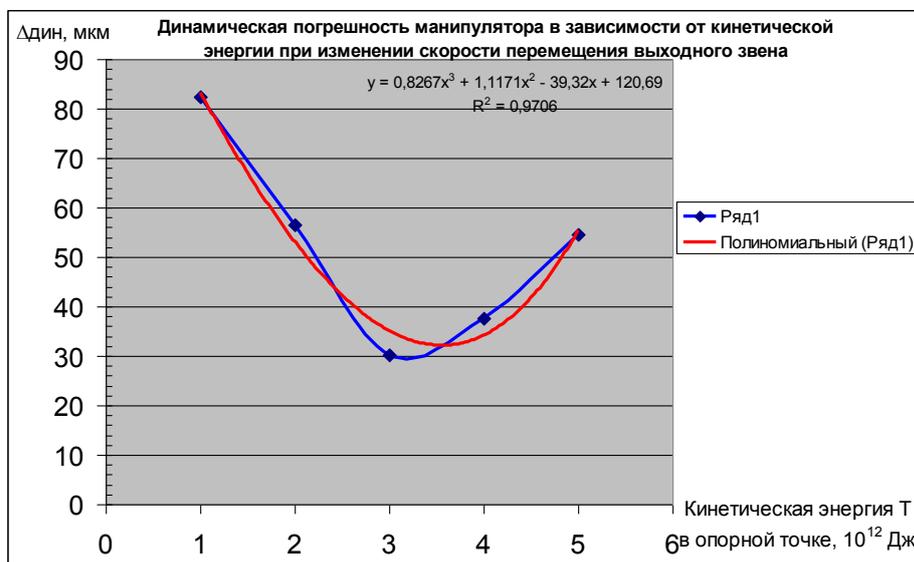


Рисунок 3.10 – Зависимость динамической погрешности от кинетической энергии в опорных точках сварного стыка при изменении скоростей перемещения выходного звена

Из рисунка видно, что при увеличении линейной скорости перемещения выходного звена манипулятора, соответственно увеличении кинетической энергии, происходит уменьшение величины динамической погрешности вслед-

ствие учета величины отклонения выходного звена от номинального положения на основе определения динамической погрешности по координате  $z$ . Эмпирическая зависимость величины отклонения выходного звена манипулятора от заданного положения носит нелинейный характер, что объясняется неравномерным распределением опорных точек по траектории.

Полученные в результате вычислений расчетные отклонения выходного звена манипулятора от заданного положения представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные отклонения от заданного положения с учетом кинематической и динамической погрешностей в исследуемых точках траектории

№ точки	Заданные координаты выходного звена по оси Z, мм	Кинематическая погрешность $\delta_{\Sigma}$ , мм	Расчетное отклонение от заданного положения с учетом $\delta_{\Sigma}$ , мм	Динамическая погрешность $\Delta_{дин}$ , мм	Расчетное отклонение от заданного положения с учетом $\Delta_{дин}$ , мм
1	0,12	0,23	-0,11	0,83	-0,03
2	0,14		-0,09	0,52	-0,01
3	0,19		-0,04	0,31	0,04
4	0,24		0,01	0,37	0,09
5	0,18		-0,05	0,55	0,03
Среднее значение	0,17		-0,04	0,51	0,04

По расчетным значениям отклонений выходного звена от заданного положения в зависимости от кинематических и динамических характеристик манипулятора построены графики, приведенные на рисунке 3.10.

В результате проведения вычислительного эксперимента на основе предложенной модели обеспечения заданной точности позиционирования были определены отклонения выходного звена манипулятора от заданного положения с учетом кинематических и динамических характеристик МС. Полная кинетическая энергия системы зависит от массы, линейных и угловых скоростей, моментов инерции и геометрических параметров звеньев манипулятора. Эмпирическая зависимость величины отклонения выходного звена манипулятора от заданного положения носит нелинейный характер, что объясняется неравномерным распределением опорных точек по траектории.

### 3.2 Обсуждение результатов экспериментов

В результате натурального эксперимента проведена экспериментальная оценка влияния полной погрешности мехатронной системы на точность обработки траектории выходным звеном манипулятора в контрольных точках сварного стыка  $T_1 - T_5$ . Рассмотрен двухфакторный двухуровневый эксперимент, факторами которого являлись линейная скорость выходного звена манипулятора  $v_{max}$  и масса нагрузки  $m_n$ .

Данные по определению точности позиционирования выходного звена робота сведены в таблицу, где представлены значения контрольных точек по оси  $Z$  с учетом данных от внешнего измерительного устройства (эксперимент 1), с учетом величины кинематической погрешности (эксперимент 2) и с учетом динамической погрешности манипулятора (эксперимент 3). Экспериментальные данные (2 и 3) получены на основании разработанной модели процесса позиционирования выходного звена манипулятора [100,101,127].

Согласно плана эксперимента было предусмотрено 4 комбинации сочетаний параметров. Для каждой комбинации варьирования факторов было проведено 20 измерений (замеров). Результаты экспериментов при  $v_{max} = 10$  мм/с и  $m_n = 40,8$  кг представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты экспериментальных измерений

№ точки	Реальная траектория (эксперимент 1)		Реальная траектория, скорректированная с учетом кинематической погрешности (эксперимент 2)		Реальная траектория, скорректированная с учетом динамической погрешности (эксперимент 3)	
	Среднее значение, $Z_{ср.реал}$ мм	Среднеквадратическое отклонение $S_{реал}$	Среднее значение, $Z_{ср.кин.}$ мм	Среднеквадратическое отклонение $S_{кин.}$	Среднее значение, $Z_{ср.дин.}$ мм	Среднеквадратическое отклонение $S_{дин.}$
$T_1$	0,12	0,0066	-0,10	0,0066	-0,01	0,0062
$T_2$	0,13	0,0070	-0,08	0,0070	0,01	0,0066
$T_3$	0,18	0,00625	-0,03	0,00625	0,0	0,00623
$T_4$	0,23	0,0055	0,01	0,0055	0,09	0,00523
$T_5$	0,18	0,0064	-0,04	0,0064	0,05	0,00616
Среднее значение	0,17	0,0064	-0,05	0,0064	0,04	0,0061

На основе статистического анализа экспериментальных данных определены средние значения отклонений от номинального значения положения для каждой контрольной точки траектории, полученных с помощью датчика положения. Среднее значение отклонения для точек реальной траектории составило 0,173 мм, с учетом кинематической погрешности манипулятора 0,052 мм, с учетом также динамической погрешности 0,043 мм. Таким образом, погрешность позиционирования выходного звена МС уменьшилась более чем в 2 раза. Кроме того, определенное по двадцати измерениям среднее квадратическое отклонение от заданного положения уменьшилось с 0,00635 до 0,00608, что свидетельствует о более высокой стабильности процесса позиционирования.

На рисунке 3.11 представлены графики, наглядно отображающие значения контрольных точек по оси Z с учетом используемой модели (ряд 2, ряд 3) и без неё (ряд 1).

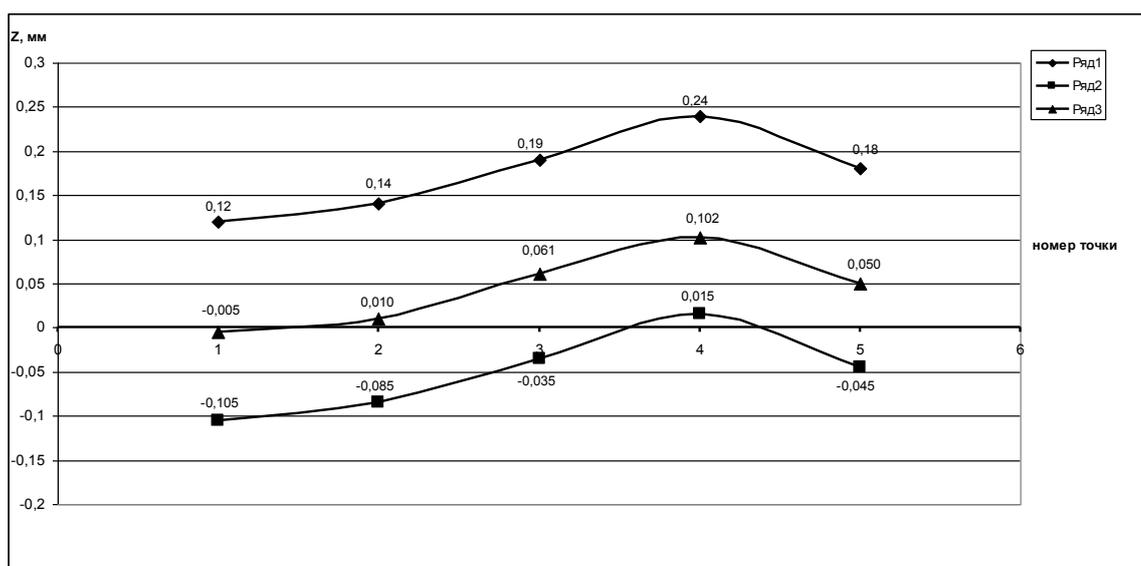


Рисунок 3.11 – Положение выходного звена манипулятора: ось X (значение 0) – заданная (идеальная) траектория; ряд 1 – реальная траектория, полученная на основе данных от датчика; ряд 2 – траектория, полученная от датчика с учётом кинематической погрешности манипулятора; ряд 3 – траектория, полученная от датчика с учётом динамической погрешности манипулятора.

На рисунке 3.12 представлены графики, отражающие результаты теоретического и экспериментального исследований проверки работоспособности предложенной модели позиционирования ЭЛ по стыку.

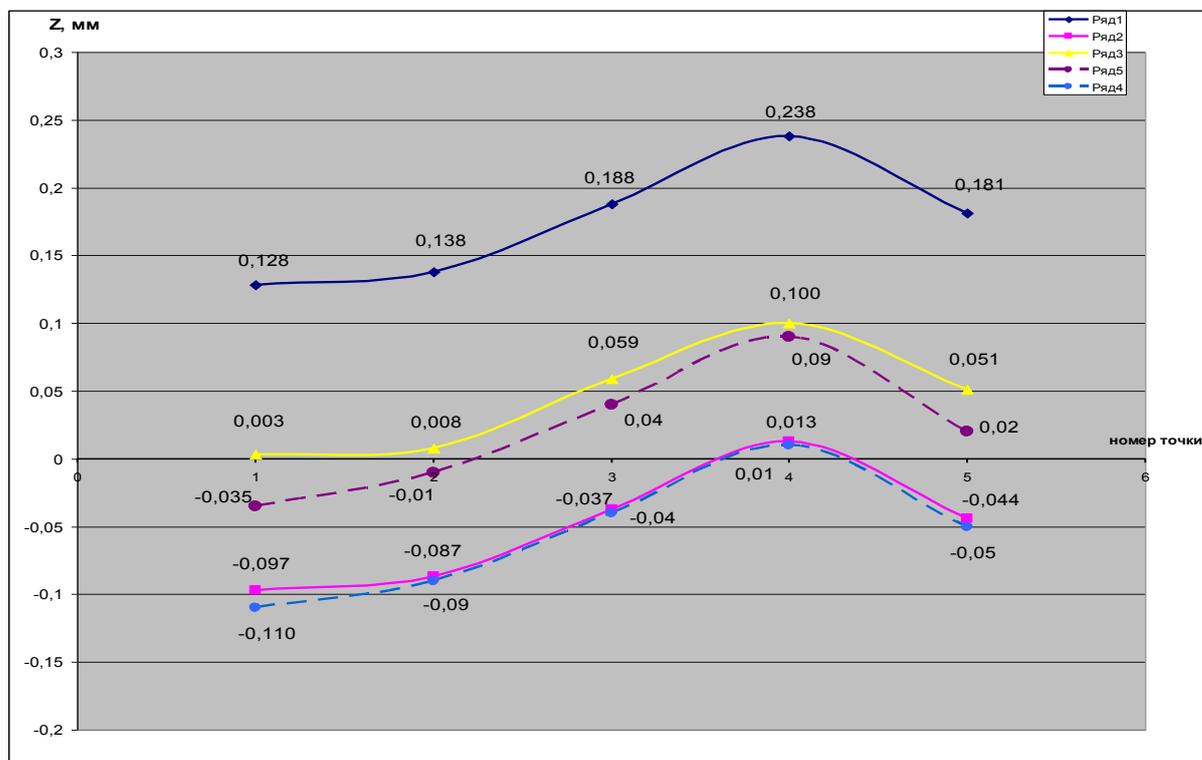


Рисунок 3.12 – Положение выходного звена манипулятора: ось  $X$  (значение 0) – заданная (идеальная) траектория; ряд 1 – реальная траектория, полученная на основе данных от датчика; ряд 2 – траектория, полученная от датчика с учётом кинематической погрешности; ряд 3 – траектория, полученная от датчика с учётом полной (кинематической и динамической) погрешности; ряд 4 – расчетная траектория с учетом кинематической погрешности; ряд 5 – расчетная траектория с учетом полной погрешности манипулятора.

Данные, полученные в результате эксперимента и расчёта на основе математической модели, представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7– Вариационный ряд экспериментальных и расчетных данных

№ точки	Реальная траектория Значение, $Z_{\text{ср.реал}}$ , мм, полученное от датчика	Траектория с учетом кинематической погрешности		Траектория с учетом динамической погрешности	
		Расчетное значение, $Z_{\text{ср.кин}}$ , мм	Значение $Z_{\text{ср.кин}}$ , мм	Расчетное значение, $Z_{\text{ср.дин}}$ , мм	Значение $Z_{\text{ср.дин}}$ , мм
$T_1$	0,12	-0,11	-0,10	-0,03	-0,01
$T_2$	0,13	-0,09	-0,08	-0,01	0,01
$T_3$	0,18	-0,04	-0,03	0,04	0,05
$T_4$	0,23	0,01	0,01	0,09	0,09
$T_5$	0,18	-0,05	-0,04	0,03	0,05
Среднее значение	0,17	-0,04	-0,05	0,04	0,04

Сопоставив расчетные и экспериментальные значения положения выходного звена по координате  $Z$ , видно, что расхождение не превышает 8%: с учетом кинематической погрешности – 8%, с учетом полной (кинематической и динамической) погрешности – 7%.

Пользуясь планом эксперимента, представленным в табл. 3.3, можно вычислить коэффициенты регрессии линейного уравнения (3.2), где  $N_{оп} = 4$  - количество опытов в эксперименте.

В таблице 3.8 представлены значения коэффициентов уравнений регрессии из формулы (3.3).

Таблица 3.8 - Значения коэффициентов уравнений регрессии

№ п/п	Обозначения коэффициентов регрессии	Значения в натуральном масштабе		
		Положение выходного звена МС на основе данных от датчика		
		без учета разработанной модели	с учетом кинематической погрешности манипулятора	с учетом динамической погрешности манипулятора
1.	$\beta_0$	0,1538	-0,05	0,0267
2.	$\beta_1$	0,000123	-0,000037	0,000034
3.	$\beta_2$	0,00032	-0,000053	0,00027
4.	$\beta_{12}$	0,001	0,00025	-0,0005

Для проверки разработанной математической модели процесса позиционирования выходного звена было проведено три серии натуральных экспериментов. Для каждого среднего значения  $Y_{cp}$  определена величина среднего квадратического отклонения  $S$  в выборке (3.8). Полученные данные сведены в таблицу 3.9.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2}{n - 1}}, \quad (3.8)$$

где  $i$  - номер наблюдения;

$Y_i$  - текущее наблюдение;

$n$  - общее количество наблюдений ( $n = 20$ );

$Y_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$  - оценка среднего значения.

Таблица 3.9 – Матрица планирования полного факторного эксперимента  $2^2$ , уровни исследуемых факторов и результаты эксперимента

№	$X_0$	$X_1$		$X_2$		$Y_I, \text{ мм}$		$Y_{II}, \text{ мм}$		$Y_{III}, \text{ мм}$	
		Код	кг	Код	мм/с	$Y_{\text{ср}}, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}$	$Y_{\text{ср}}, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}$	$Y_{\text{ср}}, \text{ мм}$	$S, \text{ мм}$
1	+	-	0	-	10	0,17	0,0063	-0,05	0,0062	0,03	0,0058
2	+	-	0	+	110	0,18	0,0064	-0,06	0,0062	0,05	0,0058
3	+	+	40,8	-	10	0,17	0,0064	-0,05	0,0064	0,04	0,0061
4	+	+	40,8	+	110	0,19	0,0066	-0,06	0,0064	0,06	0,0063

В результате были получены три уравнения регрессии для определения положения выходного звена манипулятора в соответствии с проведенными сериями экспериментов ( $Y_I, Y_{II}, Y_{III}$ ) в кодовых координатах (3.9).

$$\begin{aligned}
 Y_I &= 0,1755 + 0,0025 \tilde{X}_1 + 0,016 \tilde{X}_2 + 0,001 \tilde{X}_1 \tilde{X}_2 \\
 Y_{II} &= -0,0528 - 0,00075 \tilde{X}_1 - 0,00175 \tilde{X}_2 + 0,00025 \tilde{X}_1 \tilde{X}_2 \\
 Y_{III} &= 0,0445 + 0,007 \tilde{X}_1 + 0,009 \tilde{X}_2 - 0,0005 \tilde{X}_1 \tilde{X}_2
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Оценка значимости факторов проводилась с помощью критерия Стьюдента при 5 % уровне значимости. Определив доверительные интервалы коэффициентов уравнений регрессии [1,68], получим значения доверительных интервалов для трех уравнений регрессии:

$$\Delta\beta_I = \pm 0,052; \Delta\beta_{II} = \pm 0,018; \Delta\beta_{III} = \pm 0,02.$$

Анализируя полученные значения доверительных интервалов видно, что коэффициент  $\beta_{12}$  по абсолютной величине намного меньше доверительного интервала, следовательно, коэффициент  $\beta_{12}$  признан статистически незначимым и исключается из уравнений регрессии.

После исключения коэффициента  $\beta_{12}$  уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y_I &= 0,1755 + 0,0025 \tilde{X}_1 + 0,016 \tilde{X}_2 \\
 Y_{II} &= -0,0528 - 0,00075 \tilde{X}_1 - 0,00175 \tilde{X}_2 \\
 Y_{III} &= 0,0445 + 0,007 \tilde{X}_1 + 0,009 \tilde{X}_2
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Адекватность полученных уравнений (3.9) была проверена по критерию Фишера. Вычисленное значение критерия меньше табулированного значения для 5%-го уровня значимости. Следовательно, полученные уравнения (3.9) адекватно описывают серии натуральных экспериментов.

Для наглядности преобразуем уравнения (3.9) к инженерному виду в натуральных координатах:

$$\begin{aligned} Y_I &= 0,1538 + 0,000123 m_H + 0,00032 v_{max} \\ Y_{II} &= -0,05 - 0,000037 m_H + 0,000053 v_{max} \\ Y_{III} &= 0,0267 + 0,000034 m_H + 0,00027 v_{max}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где  $v_{max}$  – максимальная линейная скорость выходного звена манипулятора, мм/с;  $m_H$  – масса нагрузки, кг.

Обработка полученных экспериментальных данных позволила выявить и установить закономерности изменения положения выходного звена манипулятора от кинематической и динамической погрешностей исполнительных устройств МС при различных уровнях выбранных факторов.

### 3.3 Выводы по главе

1. Разработана методика проведения экспериментального исследования точности позиционирования выходного звена робота-манипулятора с учетом кинематической и динамической погрешностей, позволяющая произвести проверку результатов теоретического исследования. Методика проведения экспериментального исследования включает в себя планирование эксперимента и обработку и анализ полученных экспериментальных данных.

2. Экспериментально установлено, что учет кинематической погрешности уменьшает погрешность позиционирования выходного звена МС более чем в 1,2 раза, а учет полной (кинематической и динамической) погрешности – в среднем в 2 раза. В условиях эксперимента среднее значение отклонения вы-

ходного звена от заданного положения составило 0,176 мм при незначительной стабилизации процесса позиционирования на 10 %.

3. Проведено сравнение результатов численного эксперимента по определению величины полной погрешности манипулятора и результатов измерений в рамках эксперимента. Расхождение данных, полученных при расчете с использованием предложенной математической модели, с натурным экспериментом не более 8%, что указывает на достаточную точность совпадения теоретических исследований с экспериментальными данными в рамках диссертационного исследования.

## **ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В ходе диссертационной работы выполнены теоретические и экспериментальные исследования процесса позиционирования, позволившие провести практическую апробацию результатов работы [48,97]. Разработанная методика расчета кинематической и динамической погрешностей реализует результаты проведенных исследований процесса позиционирования электронного луча по стыку в реальном масштабе времени с учетом режимов ЭЛС.

В таких областях промышленности как ракетостроение, судостроение, атомная энергетика, авиамоторная и автомобильная промышленности широко применяются ответственные изделия, полученные путем применения технологии ЭЛС с использованием АЭЛТК. Особое внимание уделяется качеству сварных швов и повышенных требований к точности позиционирования ЭЛ по стыку.

На точность позиционирования ЭЛ по стыку влияет множество факторов:

- погрешности электромеханической части АЭЛТК, включая динамическую погрешность;
- конструктивные характеристики стыкового соединения, в том числе положение траектории сварного стыка в пространстве (рис.1.5);
- высокая скорость сварки (до 30 мм/с);
- технические характеристики фокусирующей и отклоняющей систем АЭЛТК.

Степень влияния этих факторов на точность позиционирования ЭЛ различна и зависит от характеристик оборудования АЭЛТК, режимов его работы и параметров процесса ЭЛС. Для обеспечения заданной точности позиционирования ЭЛ необходимо провести анализ преобразователей движения на основе кинематической схемы манипулятора и определить величину полной погрешности, приведённой к выходному звену.

## 4.1 Методика обеспечения точности позиционирования электронного луча при ЭЛС

В разделе приводится описание методики обеспечения процесса позиционирования ЭЛ по стыку на основе разработанной математической модели процесса позиционирования ЭЛ, учитывающей кинематическую и динамическую погрешности механической части АЭЛТК.

### 4.1.1 Расчет полной погрешности манипулятора ЭЛП

Величина полной погрешности выходного звена манипулятора определяется численным методом на основании кинематической схемы манипулятора АЭЛТК и его характеристик.

Полную погрешность выходного звена ММД определяем в виде [22,33,41, 42]:

$$\Delta r = \Delta q + \delta_{\Sigma} + J_{\Sigma} + \Delta q' + \Delta_{дин} \quad , \quad (4.1)$$

где  $\Delta q$  - погрешность системы управления и двигателя;  $\delta_{\Sigma}$  - кинематическая погрешность преобразователя движения;  $J_{\Sigma}$  - мертвый ход преобразователя движения;  $\Delta q'$  - погрешность, вызванная податливостью преобразователя движения;  $\Delta_{дин}$  - динамическая погрешность.

**Определение погрешности системы управления и двигателя.** Погрешность системы управления и двигателя, приведенная к выходному звену преобразователя движения, может быть определена в виде [42]:

$$\Delta q = \frac{\Delta \varphi_{\delta \vartheta}}{u} \quad (4.2)$$

где  $u$  - передаточное отношение преобразователя движения;  $\Delta \varphi_{\delta \vartheta}$  - погрешность угла поворота двигателя. В случае отсутствия точных данных приближенно можно принимать  $\Delta \varphi_{\delta \vartheta} = 5...10$  угловых минут.

**Определение кинематической погрешности преобразователей движения ММД АЭЛТК.** Кинематическая погрешность ММД АЭЛТК зависит от вида и числа преобразователей движения, образующих механическую часть МС (манипулятора) [6,17,34,62,63,110,120]. Рассмотрим определение кинематической погрешности каждого вида преобразователя движения в отдельности в соответствии с типовыми кинематическими схемами манипуляторов[24,106,120].

**а). Кинематическая погрешность передачи зубчатым ремнём.**

Методика определения кинематической погрешности передачи зубчатым ремнём описана в работах [5,13,37, 55,90].

Полное смещение зуба ремня  $I$  можно записать:

$$I = (F\Psi / bZ_0)c + (Q/b)\lambda, \quad (4.3)$$

где  $F$  – усилие нагружения ремня;  $\Psi = F_1/F_{cp}$ ;  $F_1$  – нагрузка на первый зуб ремня, Н;  $F_{cp}$  – средняя нагрузка на зубья ремня, Н;

$\Psi$  – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между зубьями:  $\Psi = F_1/F_{cp}$ ;  $F_1$  – нагрузка на первый зуб ремня, Н;  $F_{cp}$  – средняя нагрузка на зубья ремня, Н;

$b$  – ширина ремня;

$Z_0$  – число зубьев ремня;

$Q$  – натяжение ведущей ветви ремня;

$c$  – суммарный коэффициент податливости зуба ремня;

$\lambda$  – коэффициент податливости.

Формула (4.4) учитывает величину погрешности, вызванную податливостью преобразователя движения.

**б). Кинематическая погрешность червячной передачи [25,40,42,114].**

Минимальное значение кинематической погрешности червячной передачи при расчете по методу максимума – минимума определяется в виде, мкм:

$$F'_{iomin} = 0,62[0,7(f_{hk}+f_{f1}) + F'_{i2}] \quad (4.4)$$

Максимальное значение кинематической погрешности передачи, мкм:

$$F'_{io\max} = 0,8\sqrt{(f_{hk} + f_{f1})^2 + E_{\Sigma M1}^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M2}^2} \quad (4.5)$$

где  $f_{hk}$  - допуск, на погрешность винтовой линии на длине нарезанной части червяка, мкм;

$f_{f1}$  - допуск, на погрешность профиля витка червяка, мкм;

$F'_{i2}$  - допуск на наибольшую кинематическую погрешность червячного колеса, мкм:

$$F'_{i2} = F_p + f_{f2} \quad (4.6)$$

$F_p$  - допуск на накопленную погрешность шага червячного колеса, мкм;

$f_{f2}$  - допуск на погрешность профиля зуба червячного колеса, мкм;

$E_{\Sigma M1}$  — суммарная приведенная погрешность монтажа червяка, мкм:

$$E_{\Sigma M1} = 1,2\sqrt{e_{a1}^2 + (e_{r1} \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\gamma)^2}, \quad (4.7)$$

где  $\alpha = 20^\circ$  - торцовый угол профиля червяка, град;  $\gamma$  – угол подъема линии витка червяка по делительной окружности, град;  $e_{a1} \approx 5 \dots 15$  мкм - осевое биение червяка, мкм;  $e_{r1} \approx F_{r1}$  - радиальное биение червяка, мкм [42].  $E_{\Sigma M2}$  - суммарная приведенная погрешность монтажа зубчатого колеса, мкм:

$$E_{\Sigma M2} = \sqrt{\left(\frac{e_{r2} \cdot \operatorname{tg}\alpha}{\cos\beta}\right)^2 + (e_{a2} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2}. \quad (4.8).$$

#### **в). Кинематическая погрешность шарико-винтовой пары [42,51].**

Максимальное и минимальное значения кинематической погрешности, мкм, шарико-винтовой передачи на длине  $l_p$ , мм, рабочего участка резьбы винта определяют в виде:

$$F'_{io\max} = e_p \pm \frac{V_{np}}{2}, \quad (4.9)$$

где  $e_p$  — среднее значение кинематической погрешности передачи, мкм [42, табл. 9.7];  $V_{np}$  — ширина полосы колебаний кинематической погрешности на рабочей длине ( $l_p$  резьбы винта, мкм [42, табл. 9.7]).

#### **г). Кинематическая погрешность зубчатой конической передачи [40,42].**

Минимальное и максимальное значения кинематической погрешности определяют в виде, мкм:

$$F'_{io\min} = AK_s (F'_{i1} + F'_{i2}) \quad (4.10)$$

$$F'_{io\max} = K \left[ \sqrt{(F'_{i1})^2 + (E_{\Sigma M1})^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + (E_{\Sigma M2})^2} \right] \quad (4.11)$$

с учётом

$$F'_i = F_p + 1,15f_c, \quad (4.12)$$

где  $f_c$  – допуск на погрешность обката зубцовой частоты;

$F_p$  – допуск на накопленную погрешность шага зуба.

Для мелко модульных конических передач:

$$F'_i = F_p + 1,15f_f, \quad (4.13)$$

где  $f_f$  – допуск на погрешность профиля зуба.

**д). Кинематическая погрешность волновой зубчатой передачи** [32,42,107].

Минимальное и максимальное значения кинематической погрешности передачи в минутах (...'):

$$\delta\varphi_{min} = 3,67 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{40 + d_1}, \quad \delta\varphi_{max} = 4,67 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{40 + d_1} \quad (4.14)$$

и радианах, (рад):

$$\delta\varphi_{min} = 10,67 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{(40 + d_1) \cdot 10^4}, \quad \delta\varphi_{max} = 13,58 \frac{F_{r1} + F_{r2}}{(40 + d_1) \cdot 10^4}, \quad (4.15)$$

где  $F_{r1}$  и  $F_{r2}$  – допуски на радиальные биения зубчатых венцов гибкого и жёсткого зубчатых колёс, мкм;  $d_1$  – делительный диаметр гибкого зубчатого колеса, мм.

**Суммарная кинематическая погрешность** многоступенчатых преобразователей движения при расчете по методу максимума-минимума равна [16,33,42,61,110]:

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \delta_i, \quad (4.16)$$

где  $\delta_i$  - кинематическая погрешность  $i$ -й передачи:

-  $\delta\varphi_i$ , рад (минуты), при преобразовании вращательного или  $F'_{i0}$ , м, поступательного движения во вращательное;  
 -  $F'_{i0}$ , м, при преобразовании поступательного или  $\delta\varphi_i$ , рад, вращательного движения в поступательное;  
 $\varepsilon_i$  - передаточный коэффициент погрешности  $i$ -й передачи, учитывающий изменение кинематической погрешности передачи при приведении ее к выходному звену кинематической цепи:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{u_{i+1,n}} = \frac{1}{\prod_{k=i+1}^n u_k}, \quad (4.17)$$

где  $u_{i+1,n}$  - передаточное отношение между  $i+1$ -й передачей и выходным звеном многоступенчатого механизма;  $u_k$  - передаточное отношение  $k$ -й передачи;  $n$  - число передач.

**Определение мёртвого хода преобразователей движения мехатронного модуля АЭЛТК.** Мертвый ход преобразователей движения приводит к ошибкам перемещения мехатронных модулей, поэтому его стремятся уменьшить или устранить [42].

**1. Передача зубчатым ремнём:** величина мёртвого хода характеризуется коэффициентом неравномерности распределения нагрузки между зубьями  $\Psi$  [13,37, 55,90].

**2. Червячная передача:** при расчёте по методу максимума-минимума минимальное значение мёртвого хода, мкм [42]:

$$J_{tmin} = \frac{J_{nmin}}{\cos\alpha \cdot \cos\beta}, \quad (4.18)$$

где  $J_{nmin}$  - гарантированный боковой зазор, мкм.

Максимальное значение мёртвого хода, мкм:

$$J_{tmax} = 0,94E_{SS} + \sqrt{0,9(T_S^2 + G_{a1}^2) + 2(f_a^2 + f_{ac}^2) + G_{r1}^2 + G_{r2}^2}, \quad (4.19)$$

где  $E_{SS}$  - наименьшее отклонение, мкм, толщины витка червяка по хорде;

$\pm f_{ac}$  - предельное отклонение, мкм, межосевого расстояния в обработке,  
 $\pm f_{ac} = 0,75 f_a$ ;

$f_a$  - предельное отклонение межосевого расстояния червячной передачи.

**3. Шарико-винтовая пара:** максимальное и минимальное значения мёртвого хода, мкм, с учётом упругих деформаций соединения винт-гайка, винта и опор [42,51]:

$$J_{t_{min}} = 2 \cdot 10^3 (0,01d_{ш} - \Delta d_{ш}) \sin \beta + \Delta_{\epsilon..м} + \Delta_{\epsilon} + \Delta_{on}, \quad (4.20)$$

*max*

$d_{ш}$  – диаметр шарика, мм;  $\Delta d_{ш}$  – предельное отклонение диаметра шарика, мм;  $\beta = 45^\circ$  - угол контакта шариков с винтом и гайкой;  $\Delta_{\epsilon..м}$  - упругая деформация соединения винт-гайка, мкм;  $\Delta_{\epsilon}$  - упругая деформация винта, мкм;  $\Delta_{on}$  - упругая деформация опор, мкм.

**4. Зубчатая коническая передача:** максимальное значение мёртвого хода конической зубчатой передачи определяют в виде [40,42]:

$$J_{t_{max}} = 0,94(E_{\bar{S}S_1} + E_{\bar{S}S_2}) + \sqrt{0,46[(f_{AM1} \sin \delta_1)^2 + (f_{AM2} \sin \delta_2)^2 + (G_{a1} \sin \delta_1)^2 + (G_{a2} \sin \delta_2)^2 + E_{\Sigma}^2 + (G_{r1} \cos \delta_1)^2 + (G_{r2} \cos \delta_2)^2]} + 0,9(T_{\bar{S}_1}^2 + T_{\bar{S}_2}^2), \quad (4.21)$$

где  $E_{\bar{S}S_1}$  и  $E_{\bar{S}S_2}$  - наименьшее отклонение, мкм, средней делительной толщины зуба первого и второго колёс по хорде;  $\pm f_{AM}$  - предельное осевое смещение, мкм, зубчатого венца;  $G_{a1} = e_{a1}$  и  $G_{a2} = e_{a2}$  – осевой зазор, мкм, в опоре вращения первого и второго зубчатых колёс;  $\pm E_{\Sigma}$  - предельное отклонение, мкм, межосевого угла;  $T_{\bar{S}_1}$  и  $T_{\bar{S}_2}$  - допуск, мкм, на среднюю делительную толщину зуба первого и второго зубчатых колёс по хорде;  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – угол делительного конуса первого и второго зубчатых колёс передачи, град.

**5. Мёртвый ход волновой зубчатой передачи** ввиду многопарности зацепления и в зависимости от точности изготовления её отдельных элементов можно приближённо считать  $1' \dots 9'$  [32,42,107].

**Суммарный мертвый ход** многоступенчатого преобразователя движения при расчете по методу максимума-минимума равен [42,57]:

$$J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i J_i, \quad (4.22)$$

где  $J_i$  — мертвый ход  $i$ -й передачи;

-  $J_{\phi i}$ , рад (минуты), при преобразовании вращательного или  $J_{ti}$ , м, поступательного движения во вращательное;

-  $J_{ti}$ , м, при преобразовании поступательного или  $J_{\phi i}$ , рад, вращательного движения в поступательное.

**Определение погрешности мехатронного модуля АЭЛТК, вызванная податливостью преобразователя движения.** Звенья преобразователя движения мехатронного модуля не являются абсолютно жесткими. Под действием нагрузок они деформируются. Вследствие этого происходит изменение положения выходного звена, т.е. возникновению погрешности мехатронного модуля.

В мехатронном модуле, состоящем из двигателя  $M$  и преобразователя движения  $ПД$  от действия внешней нагрузки  $Q$  возникает погрешность положения выходного звена мехатронного модуля [42]:

$$\Delta q' = e_{П} Q, \quad (4.23)$$

где  $e_{П}$  - приведенная податливость преобразователя движения мехатронного модуля;  $Q$  – внешняя нагрузка, которая может определяться геометрическим сложением  $F$  и  $T$ , где  $F$  — сила сопротивления, Н, при линейном перемещении выходного звена;  $T$  — момент сопротивления, Нм, при угловом перемещении выходного звена.

Для каждого вида передачи существуют свои аналитические зависимости определения величины податливости [42].

#### 4.1.2 Определение динамической погрешности исполнительных устройств манипуляторов АЭЛТК

Для анализа динамических характеристик манипуляторов используют полную кинетическую энергию многозвенных механизмов. Исследование и анализ кинетической энергии манипуляторов лежит в основе ряда ранее разработанных динамических моделей [41,79,121]. Однако учитывая сложность построения динамических моделей многозвенных манипуляторов сварочной пушки и устройства перемещения заготовки, можно получить эмпирические зависимости изменения перемещения выходного звена манипулятора от полученных значений кинетической энергии в виде:

$$\Delta_{дин} = f(T_i), \quad (4.24)$$

где  $\Delta_{дин}$  - погрешность манипулятора, связанная с его динамическими характеристиками в исследуемых точках  $i$ .

Полная кинетическая энергия механической системы:

$$T = T_a + T_p, \quad (4.25)$$

где  $T_a$ ,  $T_p$  - кинетическая энергия манипулятора и рабочего органа.

Уравнение динамики  $i$ -звенного манипулятора:

$$T_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [m_i (v_{0ix}^2 + v_{0iy}^2 + v_{0iz}^2) + (J_{x_i} \varpi_{ix}^2 + J_{y_i} \varpi_{iy}^2 + J_{z_i} \varpi_{iz}^2)], \quad (4.26)$$

где  $m_i$  - масса звена  $i$ ;  $v_{0i}$  - скорость некоторой точки звена  $O_i$ , принятой за полюс;  $J_{xi}$  - момент инерции звена относительно оси  $X$ ;  $\varpi_i$  - вектор угловой скорости звена в принятой системе координат.

Из формулы (4.26) полная кинетическая энергия системы зависит от массы, линейных и угловых скоростей, моментов инерции и геометрических параметров звеньев манипуляторов.

Определив согласно (4.24 - 4.26) значения кинетической энергии  $T_i$  в контрольных точках траектории и на основе экспериментальных данных, можно

получить эмпирические зависимости изменения динамической точности манипулятора в исследуемых точках в виде (4.24), учитывающие инерционные характеристики исполнительных устройств в составе АЭЛТК.

На основании (4.1) определяем величину полной погрешности выходного звена ММД в соответствии с видами преобразователей движения, образующих манипуляционные механизмы перемещения ЭЛП и свариваемого изделия.

#### **4.2 Определение параметров, обеспечивающих критерии позиционирования ЭЛ по стыку**

Основные параметры, определяющие процесс ЭЛС и, в частности, процесс позиционирования ЭЛ, представлены в формуле (1.1). Их можно разделить на две группы:

- *технологические параметры*, связанные с процессом ЭЛС:

$U_{\text{уск}}$  - ускоряющее напряжение электронной пушки В;

$I_{\text{п}}$  - сила тока электронного пучка, А;

$t_{\text{имп}}$  – продолжительность импульсов и пауз, с;

$v_{\text{п}}$  - скорость перемещения луча по поверхности изделия, мм/с;

$m_{\text{н}}$  - масса рабочего органа (ЭЛП), кг;

- *параметры, определяющие положение фокального пятна нагрева ЭЛ на поверхности стыка с учётом конструктивных характеристик стыкового соединения* (рис. 1.5):

$d_{\text{п}}$  – диаметр электронного пучка, мм;

$h$  – расстояние от среза сварочной пушки до плоскости сварного шва, мм;

$H$  – толщина свариваемых изделий;

$M$  – центр пятна нагрева ЭЛ (заданные координаты), мм;

$h_1$  – глубина проплавления;

$L$  – длина сварного шва;

$B$  – ширина зазора в стыке;

$\Delta_{\phi}$  - точность фокусировки электронного пучка;

$\theta$  – угол падения отклоненного ЭП на поверхность свариваемого изделия;

$\Delta r$  – полная погрешность мехатронных модулей АЭЛТК.

В соответствии с предложенным алгоритмом обеспечения заданной точности позиционирования ЭЛ по стыку (п. 2.5) необходимо выполнить обеспечение следующих критериев:

Критерий  $K_1$ : Перпендикулярность оси ЭЛ к плоскости симметрии стыка достигается отклонением ЭЛ на угол  $\theta$ , величина которого не превышает  $\theta \leq \pm(6-7)^\circ$  и зависит от конструктивных параметров сварного стыка. Если дальнейшее отклонение ЭЛ с помощью отклоняющей системы невозможно, то в процесс позиционирования луча по стыку включается работа электромеханического комплекса АЭЛТК.

Критерий  $K_2$ : Стабилизацию диаметра фокуса ЭЛ осуществляют высокоточным щелевым датчиком для обеспечения точного наведения фокального пятна нагрева на стык при  $B = const$  по всей длине сварного стыка [52]. При этом для обеспечения полного проплавления должно выполняться условие (4.27):

$$B \leq d_{\Pi} \leq 2B. \quad (4.27)$$

Критерий  $K_3$ : Для позиционирования ЭЛ по стыку необходимо обеспечивать постоянство расстояния от среза сварочной пушки до поверхности свариваемого изделия  $h$ , оно задаётся в соответствии с геометрией сварного стыка:

$$h = \frac{l}{\operatorname{tg}\theta} \quad (4.28)$$

и может быть определено по методу «двойного края» [52].

Критерий  $K_4$ : Для сохранения постоянной глубины проплавления  $h_1$  необходимо обеспечивать либо стабильность фокусного расстояния, изменяя при этом диаметр пятна нагрева ( $h_1 = const, d_{\Pi}(I_{\phi}) = var$ ), либо неизменность диаметра фокуса ( $h_1 = var, d_{\Pi}(I_{\phi}) = const$ ), при этом фокусное расстояние варьируется перемещением сварочной пушки и/или заготовки.

**Вывод об обеспечении заданной точности позиционирования электронного луча.** Траектория криволинейного пространственного сварного стыка определяется совокупностью точек, среди которых выбираются опорные точки. Их выбор связан с изменением направления траектории сварного стыка, и их количество может быть различным. Таким образом, опорные точки устанавливаются там, где траектория сварного стыка изменяет направление и необходимо проводить расчет величины полной погрешности ММД.

После определения величины полной погрешности ММД (4.1) в каждой опорной точке траектории необходимо сделать вывод об условии обеспечения заданной точности позиционирования выходного звена ММД:

$$\Delta r \leq \Delta r_{\text{задан}}, \quad (4.29)$$

где  $\Delta r$  – расчетная погрешность манипулятора;  $\Delta r_{\text{задан}}$  – максимальная погрешность обработки траектории.

Основываясь на определении шара точности с радиусом  $\Delta r_{\text{задан}}$  (рис. 1.6), и центром в точке  $M$  сварного стыка (рис. 1.4, 1.5), можно определить геометрическое место точек  $Q_S$  (рисунок 4.1), удовлетворяющих условию (4.29).

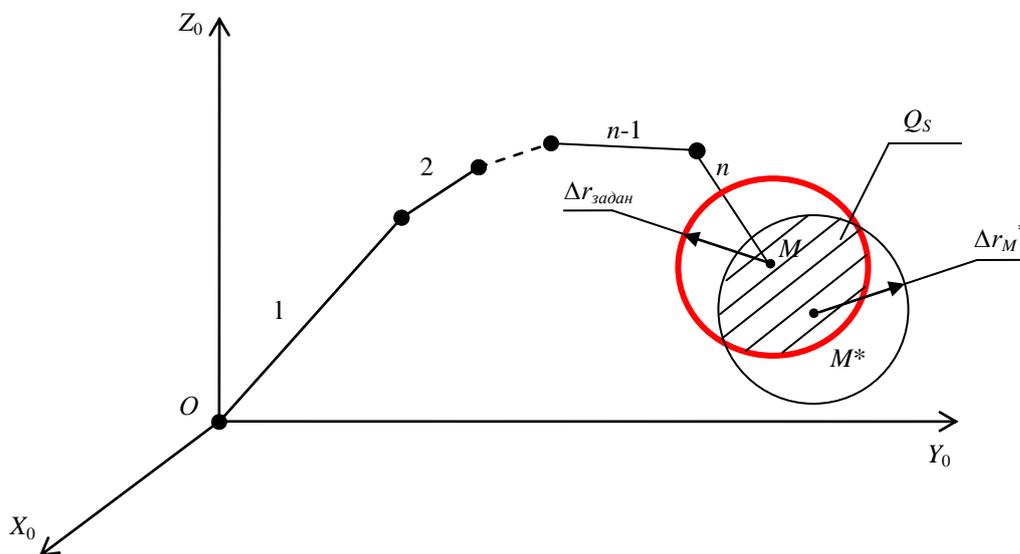


Рисунок 4.1 – Область обеспечения точности  $Q_S$

Точка  $M^*$  является центром шара точности, описывающего положение концевой точки манипулятора с учетом величины полной погрешности  $\Delta r$ . То-

гда множество  $Q_S$  представляет собой те возможные положения концевой точки манипулятора (электронного луча), которые удовлетворяют требованию обеспечения точности позиционирования.

При невыполнении условия (4.29), т.е. при «непопадании» концевых точек  $M$  выходных звеньев всех ММД в полученную область шара точности  $Q_S$ , величина которой определяется кинематическими и инерционными характеристиками манипуляторов, производится корректировка положения выходного звена путем решения обратной задачи кинематики (ОЗК) и обратной задачи динамики (ОЗД) [19,27,67, 79,94,107,109,120] для данной точки сварного стыка.

Типовая кинематическая схема ММД в составе АЭЛТК обычно включает в себя манипулятор сварочной пушки и устройство перемещения свариваемого изделия (рисунок 1.4). Тогда при  $n > 1$  необходимо совмещать полюс устройства перемещения сварочной пушки (точка  $M_1$ ) с точкой середины сварного стыка (точка  $M_2$ ), при этом эти точки должны принадлежать области  $Q_S$ . Область  $Q_S$  определяет множество возможных перемещений концевых точек всех ММД, как модулей перемещения сварочной пушки, так и модулей перемещения заготовки, при обеспечении критериев точного позиционирования ЭЛ по стыку.

### 4.3 Выводы по главе

1. Анализ полученных результатов исследований полной погрешности манипуляторов позволяет уточнить возникающие отклонения концевых точек рабочих органов от заданного положения при позиционировании выходных звеньев манипуляторов с учётом действующих сил, скоростей и ускорений.

2. Предложенная методика обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС учитывает особенности и характеристики сварочного технологического оборудования при определении величины полной погрешности ММД АЭЛТК.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача повышения качества сварных соединений, получаемых с помощью технологии ЭЛС, путем развития алгоритмов управления точностью позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС. Проведенные исследования позволили получить следующие результаты и выводы:

1. На основании проведенного анализа параметров, определяющих процесс позиционирования ЭЛ по стыку, предложены и формализованы критерии обеспечения точности позиционирования ЭЛ, а именно: учёт влияния полной погрешности мехатронных модулей движения АЭЛТК  $\Delta r$ , включая динамическую погрешность; обеспечение постоянства взаимного положения оси симметрии ЭЛ и плоскости симметрии стыка, что определяется углом  $\theta$ , величина которого не должна превышать  $\pm(6-7)^\circ$ ; обеспечение стабилизации диаметра фокального пятна нагрева  $d_{\text{П}}$  на поверхности стыка свариваемых деталей для обеспечения полного проплавления, где  $B \leq d_{\text{П}} \leq 2B$ ; соблюдение расстояния  $h$  от среза сварочной пушки до поверхности свариваемой детали; обеспечение сохранения постоянной глубины проплавления  $h_1$  либо за счет стабильности фокусного расстояния  $h$ , изменяя при этом диаметр пятна нагрева ( $h_1 = \text{const}$ ,  $d_{\text{П}}(I_{\text{Ф}}) = \text{var}$ ), либо за счет неизменности диаметра фокуса ЭП ( $h_1 = \text{var}$ ,  $d_{\text{П}}(I_{\text{Ф}}) = \text{const}$ ), изменяя фокусное расстояние перемещением сварочной пушки и/или заготовки.

2. Разработана математическая модель процесса позиционирования ЭЛ при отработке заданной траектории сварного шва, отличающаяся учётом кинематических и динамических характеристик ММД в составе АЭЛТК, что обеспечивает повышение точности позиционирования ЭЛ при ЭЛС. Установлено, что основными факторами, влияющими на величину отклонения ЭЛ от заданного положения являются параметры манипуляторов: линейная скорость выходного звена и масса нагрузки (рабочего органа).

3. Разработана физическая модель объекта исследования, представленная в данной работе совокупностью кинематической и динамической моделей ММД АЭЛТК. Уравнения кинематики и динамики движения манипулятора могут быть получены традиционным методом Лагранжа – Эйлера, обеспечивающие строгое описание динамики манипулятора, либо с использованием инвариантов на основе тензорного анализа, который является эффективным методом создания аналитических зависимостей.

4. Предложена структура подсистемы управления позиционированием ЭЛ, отличающаяся тем, что она замкнута по определяемым критериям обеспечения точности. Разработана структурная схема автоматизированной системы управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку, реализующая алгоритмы управления на основе разработанной математической модели процесса позиционирования, обеспечивающая выполнение критериев точности позиционирования и учитывающая полную погрешность исполнительных устройств АЭЛТК.

5. Предложен обобщенный алгоритм управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку, учитывающий кинематические и динамические характеристики технологического сварочного оборудования АЭЛТК. Показано, что учет величины полной погрешности ММД АЭЛТК, определяемой в опорных точках сварного стыка, обеспечивает более высокую точность позиционирования ЭЛ при ЭЛС в режиме реального времени.

6. Полученные результаты проведённого экспериментального исследования точности позиционирования выходного звена манипулятора подтверждают, что учет кинематической погрешности уменьшает погрешность позиционирования выходного звена МС более чем в 1,2 раза, а учет полной погрешности, включая кинематическую и динамическую составляющие погрешности, повышает точность позиционирования в среднем в 2 раза. При этом стабилизация процесса позиционирования увеличивается на 10 %.

7. Проведено сравнение результатов численного эксперимента по определению величины полной погрешности манипулятора и результатов измерений в рамках эксперимента. Среднее расхождение данных, полученных при расчете с использованием предложенной математической модели, с натурным экспериментом не более 8%, что указывает на достаточную точность совпадения теоретических исследований с экспериментальными данными в рамках диссертационного исследования.

8. Разработана методика обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС, учитывающая особенности и характеристики сварочного технологического оборудования при определении величины полной погрешности ММД АЭЛТК. Получены акты использования результатов работы в ООО «Иж-прэст» (г. Ижевск). Результаты проведенных исследований внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. - М. : Наука, 1976. – 279 с.
2. Алексанкин, Я.Я. Автоматизированное проектирование систем автоматического управления / Я.Я. Алексанкин., А.Э. Бржозовский, В.А. Жданов и др.: Под ред. В.В. Солодовникова . – М.: Машиностроение, 1990. – 332 с.: ил.
3. Алиев, А.В. Математическое моделирование в энергомашиностроении. Часть 1. Построение математических моделей: Учебное пособие для студентов вузов. - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2001. – 164 с.
4. Андре, А. Математика для электро- и радиоинженеров. Пер. с франц.: Под общ. ред. К.С. Шифрина. – М.: Наука, 1985. – 780 с.
5. Арбузов, М.О. Выбор оптимального профиля зуба ремня в плоскозубчатой передаче с точки зрения облегчения входа его в зацепление с зубом шкива// Механические передачи. - М., 1971. – с.152-161.
6. Артоболевский, И.И. Теория машин и механизмов. – М., 1975.
7. А.с. № 2024372 МКИ В 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и устройство для его осуществления / Язовских В. М., Беленький В. Я., Кабаев Н. В., Углов А. А., Зуев И. В. Опубл. 15.12.94.
8. Атаманчук, В.А. Сварочное оборудование. Каталог-справочник. Часть девятая / Сост.: В.А. Атаманчук и др. - Киев, 1989.
9. Башенко, В.В. Контроль и стабилизация глубины проплавления при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению сварочной ванны / В.В. Башенко, В.Д. Лаптенко, С.Г. Баякин, В.Г. Угрюмов // Сварочное производство. - 1989. - № 5. - с. 35-36.
10. Беленький, В.Я. Получение бездефектных швов при электронно-лучевой сварке / В.Я. Беленький, В.М. Язовских, Л.Н. Кротов, Д.Н. Трушников // Наука производству. - №5. - 2000. - с.42-44.

11. Беленький, В.Я. Контроль электронно-лучевой сварки с использованием плазменных явлений в области сварочной ванны / В.Я. Беленький, В.М. Язовских // Сварочное производство. - 1997. - № 1. - с. 7-9.
12. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб: Профессия, 2003. – 752 с.
13. Бойков, В.П. Зубчатые ремни / В.П. Бойков, Ю.Н. Городничев, Г.Г. Козачевский. – М: Химия, 1989. – 192 с.
14. Бородин, И.Ф. Автоматизация технологических процессов. Учебник для студентов вузов / И.Ф. Бородин, Ю.А. Судник. – М.: КолосС, 2005. – 344 с.: ил.
15. Бройнль, Т. Встраиваемые робототехнические системы: проектирование и применение мобильных роботов со встроенными системами управления. – Ижевск, Ижевский институт компьютерных исследований, 2012. – 520 с.
16. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: Изд. 13-е испр. / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
17. Бруевич, Н.Г. Основы теории прочности механизмов / Н.Г. Бруевич, Е.А. Правоторова, В.И.Сергеев. – М: Наука, 1988. – 238 с.
18. Брюханов, В.Н. Теория автоматического управления: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / М.Г. Косов, С.П. Протопопов и др.; Под ред. Ю.М. Соломенцева. – 3-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2000. – 268 с.: ил.
19. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
20. Виноградова, Н.М. Общая теория статистики. / В.Т. Евдокимов, Е.М. Хитарова, Н.И. Яковлева. - Москва, 1968. - 381с.
21. Волченко, В.Н. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов / В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др. Под ред. В.В. Фролова. - М.: Высшая школа, 1988. - 559 с.
22. Вopilкин, Е.А. Расчёт и конструирование механизмов приборов и

систем: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 463 с., ил.

23. Воротников, С.А. Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.; ил.

24. Геттерт, В. Сварочные роботы / Г. Герден, Х. Гюттнер и др.; Под ред. Г. Гердена; пер. с нем. Г.Н. Клебанова, Д.Г. Тесменицкого. – М., 1988. – 288 с.: ил.

25. ГОСТ 3675-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи червячные цилиндрические. Допуски. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 64 с.

26. ГОСТ 27843-2006. Испытания станков. Определение точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением. – М.: Стандартиформ, 2007. – 16 с.

27. ГОСТ 25686-85. Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. – 6 с.

28. ГОСТ 8.051-81. Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 11 с.

29. ГОСТ 9038-90. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.

30. ГОСТ 25142 – 82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1982. – 22 с.

31. ГОСТ 2789 – 73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. - М.: Стандартиформ, 2005. – 7 с.

32. ГОСТ 30078.1-93. Передачи волновые. Общие технические требования. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. – 8 с.

33. ГОСТ 2789 21098-82. Цепи кинематические. Методы расчета точности. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 30 с.
34. Градецкий, В.Г. Кинематическая модель экзоскелета руки человека и определение ошибки позиционирования / В.Г. Градецкий, И.Л. Ермолов, М.М. Князьков, Е.А. Семёнов, А.Н. Суханов // Журнал «Мехатроника. Автоматизация. Управление». - 2014 г. - № 5. – с. 37-41.
35. Гришин, В.К. Статистические методы анализа и планирования экспериментов. – М.: Изд-во МГУ, 1975.
36. Гудвин, Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. - М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004.
37. Гуревич, Ю.Е. Исследование зубчато-ременной передачи: дисс. канд. техн. наук. - М.: 1972. - 202 с.
38. Дэниел, К. Применение статистики в промышленном эксперименте. – М.: Мир, 1979.
39. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004.
40. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. - 4-е издание, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985.
41. Егоров, О.Д. Точность манипуляционных механизмов роботов. – М., 1989.
42. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. – М: ИЦ МГТУ «Станкин», 2004. – 360 с.
43. Зориктуев, В.Ц. Автоматизация технологических процессов и производств / В.Ц. Зориктуев, Р.Р. Загидуллин, А.Г. Лютов, Ю.А. Никитин, А.Г. Схиртладзе; под ред. В.Ц. Зориктуева. – М.: Машиностроение, 2008. – 428 с.
44. Зорин, Ю. Н. Повышение эффективности электронно-лучевой сварки // Изв. вузов. Машиностроение. - 1985. - № 12. - с. 92-95.
45. Зубкова, Ю.В. Математическая модель управления процессом позиционирования электронного луча при электронно-лучевой сварке // Автомати-

зация и прогрессивные технологии: Труды V межотраслевой научно-технической конференции. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2007. – Т. I. - с. 23-24.

46. Зубкова, Ю.В. Позиционирование электронного луча при ЭЛС // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами». – Уфа: УГАТУ, 2011. – с. 240-243.

47. Зубкова, Ю.В. Исследование влияния полной погрешности при позиционировании электронного луча в АЭЛТК. Актуальные проблемы машиностроения // Материалы Всероссийской молодёжной интернет-конференции. - Владимир, 2011. – с. 8-13.

48. Зубкова, Ю.В. Исследование кинематической погрешности для обеспечения точности позиционирования выходного звена мехатронной системы / Ю.В. Зубкова, М.В. Красноперов, Р.И. Тазмиев, Н. П. Снегирев // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всеросс. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Ч.4. – с. 19–22.

49. Зубкова, Ю.В. Экспериментальное исследование точности позиционирования робота // Сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые учёные – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». – Ижевск, «ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – 2013 г. - с. 329-333.

50. Зуев, И.В. Выбор режимов ЭЛС с учетом тепловой эффективности процесса проплавления металла / И.В. Зуев, Д. Буруис, В.Е. Онищук //Сб. научн. трудов МЭИ №207. - М., 1989 - с. 9-14.

51. Илюхин, Ю.В., Подураев Ю.В. Проектирование исполнительных систем роботов. Линеаризованные системы / Ю.В. Илюхин, Ю.В. Подураев. – М., 1989.

52. Кайдалов, А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: «Экотехнология», 2004. – 260 с.

53. Капустин, Н.М. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учеб. для вузов / П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высш. шк., 2004. – 415 с.: ил.

54. Карнаухов, Н.Ф. Прецизионное позиционирование схвата промышленного робота с помощью лазерного целеуказателя / Н.Ф. Карнаухов, В.В. Мартынов. // Проектирование технологических машин: Сб. науч. тр. – М.: Станкин, 1998. – 39 с.

55. Кожевников С.Н. Конструирование и расчёт механизмов с зубчатыми ременными передачами / С.Н. Кожевников, А.П. Погребняк. - Киев.: Наукова думка, 1984. – 112 с.

56. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

57. Куцоконь, В.А. Расчёт статических моментов и мёртвых ходов в кинематических цепях точных приборов: Справочник / В.А. Куцоконь, И.В. Шевченко-Грабский. – Л., 1968.

58. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH / А.В. Леоненков. - СПб.: БХВ-Петербург, 2003.

59. Лаптенко, В.Д. Управление электронно-лучевой сваркой / А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверман. - Красноярск: САА, 2000. - 234 с.

60. Лаптенко, В.Д. Автоматизированная система управления электронно-лучевой сваркой (АСУЭЛС) / А. В. Мурыгин, Серегин Ю. Н., С. В. Балайтисов // Технология машиностроения, 2002. - № 4. - с. 52–54.

61. Литвин, Ф.Л. Расчёт и конструирование механизмов и деталей приборов. - М.: Машиностроение, 1975.

62. Лойцинский, Л.Г. Курс теоретической механики: В 2-х т. / Л.Г. Лойцинский, А.И. Лурье. - Т. II: Динамика. Изд. 6-е перераб. и доп. – М.: Наука, 1983. – 640 с.

63. Лурье, А.И. Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1961.

64. Люкшин, В.Е. Устройство СУ-174 для наведения пучка электронов на стык / Ю.И. Пастушенко, П.П. Стрекаль и др. – Киев, 1983.
65. Мамутов, Е.А. Электронно-лучевая сварка деталей большой толщины. Инженерный поиск. - М: Машиностроение, 1992. – 232 с.
66. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. - СПб.: Питер, 2005.
67. Мэтьюз, Д. Г. Численные методы. Использование MATLAB / Д. Г. Мэтьюз, К. Д. Финк. – М., СПб.: Вильямс, 2001. – 716 с.
68. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
69. Назаренко, О.К. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко др. Под ред. Б.Е.Патона. - Киев: Наукова думка, 1987 - 256 с.
70. Небылов, А.В. Гарантирование точности управления. – М.: Наука. Физматлит, 1998. – 304 с.
71. Ноф, Ш. Справочник по промышленной робототехнике: В 2-х кн. Кн. 1 / Пер. с англ. Д. Ф. Миронова и др. – М.: Машиностроение, 1989.
72. Ольшанский, Н.А. Оборудование и технология электронно-лучевой сварки: Тематический сборник. Выпуск 475. – М., 1980.
73. Орлов, И.Н. Системы автоматизированного проектирования электро-механических устройств: Учеб. пособие для вузов / И.Н. Орлов, С.И. Маслов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 286 с.: ил.
74. Орлов, П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 2-х кн. – изд. 3-е, испр. – М.: Машиностроение, 1988.
75. Пантюшин, С.В. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: Учеб. пособие для вузов/ В. М. Назаретов, О.А. Тягунов и др.; Под ред. И.М. Макарова. – М.: Высш. шк., 1986.
76. Пат. 4400609 США, МКИ В 23 К 15/00. Устройство для индикации

стыка свариваемых кромок с помощью сканирующего луча / Ю.И. Пастушенко, Г.А. Спыну, О.К. Назаренко и др. – Оpubл. 23.08.83.

77. Патент № 2183153 В 23 К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки/ В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов, Д.Н. Трушников. Оpubл. 10.06.2002.

78. Письменный, Г.В. Системы технического зрения в робототехнике. - М.: Машиностроение, 1991.

79. Подураев, Ю.В. Мехатроника: методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.: ил.

80. Попов, Е.П. Основы робототехники. Введение в специальность: Учеб. для вузов по спец. «Робототехн. системы и комплексы» / Е.П. Попов, Г.В. Письменный. – М.: Высш. шк., 1990. – 224 с.: ил.

81. Попов, Е.П. Системы оцувствления и адаптивные промышленные роботы. / В.В. Ключев, Б.В. Брагин, Ю.Г. Войлов, Ю.Д. Жаботинский и др. - М., 1985. – 256 с.

82. Радкевич, Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. для вузов / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007. – 791 с.: ил.

83. Раппопорт, Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие / Э. Я. Раппопорт. – М.: Высшая школа, 2005. – 292 с.

84. Рыкалин, Н. Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / А.А.Углов, И.В.Зуев и др. - М.: Машиностроение, 1985.-496 с.

85. Силадьи, М. Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. – М., 1990. – 639 с.: ил.

86. Советов, Б.Я. Моделирование систем: Учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.: ил.

87. Сольницев, Р.И. Автоматизация проектирования гибких производственных систем / Р.И. Сольницев, А.Е. Кононюк, Ф.М. Кулаков. – Л.: Машино-

строение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 415 с.: ил.

88. Сольнищев, Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. системах». – М.: Высш. шк., 1991. – 335 с.: ил.

89. Судник, В.А. Основы научных исследований и техника эксперимента. Компьютерные методы исследования процессов сварки: Учебное пособие / В.А. Судник, В.А. Ерофеев. – Тула: Тульский орден Трудового Красного Знамени политехнический институт, 1988. – 95 с.

90. Тарасов, А.Р. Зубчато-ременные передачи: Учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / В.С. Балбаров, В.П. Балдаев, А.Н. Павлов. - Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ, 2006. - 40 с. // Единое окно доступа к информационным ресурсам. URL:<http://window.edu.ru/resource/741/40741> (дата обращения: 01.06.2014).

91. Тимченко, В.А., Сухомлин А.А. Роботизация сварочного производства. – К.: Техника, 1988.

92. Тимченко, В.А. Роботизация производства сварных конструкций: Сборник научных трудов // АН УССР. ИЭС им. Е.О.Патона; Редкол.: Тимченко В.А. и др. – Киев, 1988. – 146 с.

93. Тихоненко, Д. В. Автоматическое определение ошибки наведения на стык деталей при ЭЛС / Д. В. Тихоненко // Вестник НИИ СУВПТ : сб. научн. трудов. Красноярск: НИИ СУВПТ, 2008. - Вып. 26. - С. 75-77.

94. Тихонов, А.Н. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении/ В.Д. Кальнер, В.Б. Гласко. – М., 1990. – 264 с.

95. Турыгин, Ю.В. Динамическая составляющая погрешности позиционирования выходного звена мехатронного комплекса / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Вестник ИЖГТУ. - 2012 г. - № 2. - с. 43-46.

96. Турыгин, Ю.В. Математическая модель управления процессом позиционирования электронного луча при ЭЛС / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова, В.Н.

Смирнов // Сборник статей 1-ой науч. исслед. конф. студентов, магистрантов и аспирантов факультета «Управление качеством» ИжГТУ «К компетенциям через качество». – Ижевск: ИжГТУ, 2008. – с. 24-27.

97. Турыгин, Ю.В. Исследование динамической модели мехатронного модуля АЭЛТК / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова, В.Н. Смирнов // Сборник научных трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Технологии и оборудование ЭЛС-2011». - Санкт-Петербург, Россия. – 2011г. - с. 291-297.

98. Турыгин, Ю.В. Модель позиционирования электронного луча при электронно-лучевой сварке / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011). - Геленджик, Россия. – 2011 г. – с. 415-417.

99. Турыгин, Ю.В. Особенности учёта динамических характеристик при обеспечении точности позиционирования выходного звена мехатронной системы / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Сборник трудов VII международной научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии в атомной отрасли» (АПТ-2012). – Новоуральск: Изд-во Форд-Диалог, 2012. – с. 257-261.

100. Турыгин, Ю.В. Исследование точности позиционирования выходного звена мехатронной системы / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (УТЭОСС-2012). – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Электроприбор», 2012. – с. 814-817.

102. Турыгин, Ю.В. Исследование кинематической погрешности в передаточных механизмах мехатронной системы / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова, Д. Мага // Сборник трудов 15-й Международной конференции по мехатронике «МЕХАТРОНИКА-2012». - Прага, Чешская республика. – 2012 г. - с.351-354.

103. Турыгин, Ю.В. Экспериментальное исследование влияния кинематической погрешности на точность позиционирования выходного звена меха-

тронного комплекса / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Интеллектуальные системы в производстве, 2013 г. - №2. – с. 100-104.

104. Турыгин, Ю.В. Исследование точности позиционирования выходного звена манипулятора АЭЛТК / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова, Р.Гартянски // Мехатроника, автоматизация, управление, 2014 г. - № 7. – С. 35-41.

105. Турыгин, Ю.В. Обеспечение точности позиционирования электронного луча при ЭЛС / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова, Р. Гартянски // Сборник трудов 23-й Международной конференции «Robotic in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2014)», 2014. – Смоленица, Словакия.

106. Турыгин, Ю.В. Экспериментальное исследование динамической погрешности выходного звена манипулятора при отработке траектории движения / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Молодые ученые – ускорению научно-техн. прогресса в XXI веке [Электронный ресурс]: электрон. науч. издание: сборник материалов III Всеросс. научно-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участ., Ижевск, 22-23 апреля 2015 г. / ФГБОУ «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Электрон. дан. (1 файл: 33,2 Мб.). – Ижевск: ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, изд-во ИННОВА, 2015. – С. 177-180.

107. Фёдоров, В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 312 с.

108. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: Изд. 8-е. – М.: Наука, 1970.

109. Фролов, К.В. Механика промышленных роботов: Учебное пособие для втузов: В 3 кн./Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 2: Расчёт и проектирование механизмов / Е.И. Воробьева, О.Д. Егоров, С.А. Попов. – М.: Высш. шк., 1988. – 367 с.: ил.

110. Фролов, К.В. Теория машин и механизмов: Учеб. для втузов / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др.; Под ред. К.В. Фролова. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 496 с.: ил.

111. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. – М.: Мир,

1989. – 624 с.

112. Хабиб, А.М. Приближенный метод расчета погрешностей обработки роботами программных траекторий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / А.М. Хабиб. - Санкт-Петербург, 2003. – 24 с.

113. Цветков, Э.И. Процессорные измерительные средства. Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с. ил.

114. Шаповалов, Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций. – М., 1990. – 288 с.: ил.

115. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972.

116. Шкунаев, Э.К. Червячные передачи приборов точной механики. – М., 1973.

117. Штриплинг, Л.О. Расчет кинематической погрешности планетарной передачи с применением вероятностных методов / Л.О. Штриплинг, Д.В. Дерябин, А.Ф. Емельянов // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2006. - № 3. - с. 20-22.

118. Ющенко, А.С. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. // Сборник научных трудов IV-го международного научно-практического семинара. - М.: Физматлит, 2007. - с. 69.

119. Ямпольский, В.М. Сварка и свариваемые материалы в 3-х т. Т.2. Технология и оборудование. Справ. изд. - Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 574 с.

120. Ярушкина, Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: Учебное пособие. - М.: Финансы и статистика, 2004.

121. Baschenko, V.W. Untersuchungen zur Durchdringungsund Riickstreustrahlung aus dem Dampfkanal beim Elektronenstrahlschweißen / V.W. Baschenko, K.-O. Mauer // ZIS -Mitteilungen. - 1976. - № 9. - PP. 923-936.

122. Ceccarelli, M. Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation. - Kluwer Academic Publishers, 2004.

123. Dietrich, R. New high-speed beam current control and deflection system

improve electron beam welding application / R. Dietrich, W. Mayer // *Welding Journal*. - 1977. - № 6. - P. 35.

124. Giurgiutiu, V. *Micromechatronics modeling, analysis, and design with MatLAB* / by Victor Giurgiutiu and Sergey Edward Lyshevski. – 2<sup>nd</sup> ed. – 2006.

125. Mauer, K.-O. Untersuchungen zum Folgefrequenz des Riiikstrenund Werkstückstromes beim Elektronenstrahlschweißen // *ZIS - Mitteilungen*. - 1979. -№ 2. - pp. 198-208.

126. Shida, T., Development of back current controller for improvement of back bead formation in electron beam welding / H. Okamura, S. Kokura, H. Kita. // *Tokio: Hitachi*,1984. - pp. 26.

127. Turygin, G.V. Electron beam positioning process of electron-beam welding / G.V. Turygin, V.N. Smirnov, J.V. Zubkova // «First forum of young researchers» in the framework of International Forum «EQ-2008». - 2008 – Izhevsk, Russia. - pp. 127-128.

128. Turygin, G.V. The total error of mechatronic module in control model of electron beam positioning process during electron beam welding / G.V. Turygin, V.N. Smirnov, J.V. Zubkova // *Proceedings of 14th International conference on mechatronics*. - 2011. - Trencianske Teplice, Slovakia. - pp. 154-157.

129. Turygin, Yu.V. Algorithm of positioning accuracy assurance of manipulator output member of automatic electron beam production complex (AEBPC) / Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum «Education Quality –2014» / Yu.V. Zubkova, N.P. Snegirev. – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. – pp. 339-342.

130. Zubkova, J.V. Electron beam positioning in electron beam welding//*Proceedings of 2<sup>nd</sup> Conference of PhD, students «Kondor 2008»*. - Trenčín, Slovakia, 2008. - pp. 113-114.

131. Zubkova, Yu.V. Experimental investigation of dynamic error for manipulator output link during its motion path / Yu.V. Turygin, Yu.V. Zubkova // *Tryout Acta Mechanica Slovaca*, 2015. - Volume 19, Issue 3. - pp. 34–37.



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ООО «Ижпрэст»  
Плешков В.С.  
» \_\_\_\_\_ 2014 г.

**Акт**

**об использовании результатов**  
диссертационной работы Зубковой Юлии Валерьевны  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

Председатель: **Плешков В.С.**, директор  
Члены комиссии: **Ураков Р.Ф.**, главный специалист, канд. техн. наук  
**Балобанов А.С.**, руководитель направления по автоматизации процессов ЭЛС  
**Кулигин А.Н.**, зам. директора ЭМП

Комиссия рассмотрела результаты диссертационной работы Зубковой Ю.В. «Обеспечение точности позиционирования электронного луча при электронно-лучевой сварке» и констатирует следующее:

- Рассмотрены результаты проведенных исследований, которые выражены в методике обеспечения точности позиционирования электронного луча при ЭЛС. Особенностью предложенной методики является учет кинематических и динамических характеристик оборудования, что является важным при обеспечении точности позиционирования исполнительных механизмов.
- ООО «Ижпрэст» планирует использовать результаты предложенной методики и алгоритмов при разработке программного обеспечения систем управления для оборудования с ЧПУ.

Председатель комиссии:

В.С. Плешков

Члены комиссии:

Р.Ф. Ураков  
А.С. Балобанов  
А.Н. Кулигин

