

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)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Турыгин Юрий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кутергин Владимир Алексеевич,
ООО «Белфингрупп», председатель
совета директоров холдинга «Белфингрупп».

кандидат технических наук, доцент
Закураев Виктор Владимирович,
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», заведующий кафедрой «Технология машиностроения».

Ведущая организация: ФГБУН «Институт механики»
Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «24» декабря 2015 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7, ИжГТУ. E-mail: dissovet@istu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «20» октября 2015 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

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

В.Н. Сяктерев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие современного производства требует постоянного повышения качества ответственных изделий, получаемых путём применения технологий электронно-лучевой сварки (ЭЛС). 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 ракетостроение, судостроение, атомная энергетика, энергетическое машиностроение, электровакуумное, приборное и релейное производство, автомобильная и авиамоторная промышленности.

Для получения высококачественных сварных соединений необходимы установки для ЭЛС, представляющие собой сложный комплекс, в который входят прецизионное электромеханическое, высокопроизводительное вакуумное и мощное энергетическое оборудование. Электромеханическое оборудование представлено устройствами перемещения электронно-лучевой пушки (ЭЛП) и заготовки. С целью обеспечения подвижности пушки и заготовки используют различные манипуляторы, являющиеся исполнительными механизмами мехатронных модулей движения (ММД) в составе автоматизированного электронно-лучевого технологического комплекса (АЭЛТК).

Процесс ЭЛС характеризуется высокой скоростью сварки (до 30 мм/с), прецизионностью и ограниченными возможностями визуального наблюдения. Это создает трудности в управлении, как процессом сварки, так и процессом позиционирования ЭЛ. Под позиционированием в данной работе понимаем прохождение сварного стыка электронным лучом по точкам траектории с заданной точностью.

В настоящее время недостаточно разработана математическая модель процесса позиционирования ЭЛ по стыку как объекта управления и не формализованы зависимости, по которым можно контролировать положение ЭЛ при ЭЛС для обеспечения заданной точности и стабильности процесса. Существующие автоматические устройства позиционирования луча по стыку не в полной мере удовлетворяют современным требованиям точности и надежности наведения луча на стык. Причиной этого являются погрешности электромеханического оборудования АЭЛТК. Поэтому актуальной является задача исследования и разработки новых моделей позиционирования ЭЛ по стыку и создание на их основе средств автоматизации процесса позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС. Этому вопросу и посвящена настоящая диссертационная работа.

Степень разработанности темы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач проведен анализ работ ученых, внесших значительный вклад в изучение объекта исследования. Вопросы технологии ЭЛС рассмотрены в работах отечественных учёных Е.О. Патона, Б.Е. Патона, О.К. Назаренко, Н.М. Бронштейна, В.Д. Лаптёнка, В.А. Кривенкова, Н.Н. Рыка-

лина, Е.Л. Мамутова, К.С. Акопянца, Ю.Н. Пастушенко, А.В. Мурыгина, В.Я. Бравермана, Г.А. Спыну, В.М. Язовских и других.

Вопросам повышения качества сварных соединений и исследованию точности позиционирования ЭЛ при ЭЛС посвящены работы Н.А. Ольшанского, В.Д. Лаптёнка, В.В. Башенко, В.Я. Беленького, С.Г. Баякина, В.Б. Вихмана, Д.Н. Трушников, зарубежных учёных Ф. Карселя, Ж. Анжели, Ж. Делора (Франция), К. Хара (Япония), Ю. Фрозьен, Х. Решне, К.-Р. Шульце (Германия) и др.

Манипуляционные механизмы ЭЛП и заготовки можно отнести к мехатронным модулям движения, исследование точности позиционирования которых основывается на работах Ю.В. Подураева, Ю.А. Судника, О.Д. Егорова, А.С. Вострикова, Ю.Е. Гуревича, А.С. Ющенко, К.В. Фролова, Е.И. Воробьёва, Е.И. Юревича и др. Эти работы легли в основу обоснования выбранных критериев обеспечения точности позиционирования и построения математического аппарата, применяемого при обеспечении заданной точности позиционирования современных ММД.

Цель исследования: развитие алгоритмов управления точностью позиционирования электронного луча как средство повышения качества сварных соединений, получаемых методом ЭЛС.

Для достижения цели необходимо решить **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 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 электронного луча при ЭЛС.

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

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами паспорта специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» «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 ки-

нематических и динамических характеристик сварочного технологического оборудования АЭЛТК.

Методология и методы исследования

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

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 содержит контур обратной связи, отличающийся контролем погрешности позиционирования, что позволяет достигать требуемой точности позиционирования.

5. Экспериментально установлено, что применение предложенной модели позволяет повысить точность позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС. Экспериментальные зависимости показывают закономерности изменения положения выходного звена опытной установки 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», «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*).

Степень достоверности и апробация результатов Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановки задачи, обоснованностью использованных теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов; подтверждается работоспособностью математической модели, применением общепринятых методов и методик планирования и проведения экспериментов, сравнительным анализом результатов, полученных при научном обосновании и в результате экспериментальных исследований.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизация и управление технологическими и производственными процессами» (Уфа, Россия, 2011), V Всероссийской конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах» (Санкт-Петербург, Россия, 2012), XV Международной конференции по мехатронике «Мехатроника-2012» (Прага, Чешская республика), II и III Всероссийских научно-технических конференциях 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 (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, четырех глав, заключения, библиографического списка из 131 наименования и приложений. Объем работы составляет 134 страницы, включая 28 иллюстраций и 11 таблиц. В приложениях приведены акты использования результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертационной работы, определены задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения работы, выносимые на защиту, показана область исследования и приведены сведения об апробации результатов работы.

В первой главе работы приведен тематический обзор, основанный на анализе отечественных и зарубежных литературных источников. Определен уровень теории и прикладных исследований технологии ЭЛС и процесса позиционирования ЭЛ по сварному стыку. Установлено, что для наведения на стык и позиционирования ЭП были использованы различные методы и системы. Проведена классификация подобных систем по типу датчика положения стыка. Определено, что в настоящее время применяются вторично-эмиссионные и рентгеновские датчики положения ввиду их высокой эффективности.

Установлено, что ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, однако для получения качественных, геометрически рассчитанных швов необходимо обеспечивать высокую точность позиционирования ЭЛ по стыку в процессе сварки на основе точности перемещений манипуляторов ЭЛП и заготовки. Установлено, что современный АЭЛТК включает в себя следующие системы, обеспечивающие позиционирование ЭЛ по стыку: фокусирующая система, отклоняющая система, электромеханический комплекс (вспомогательное технологическое оборудование). Выявлены особенности оборудования АЭЛТК (рис. 1) и определены требования к системе управления ЭЛС.

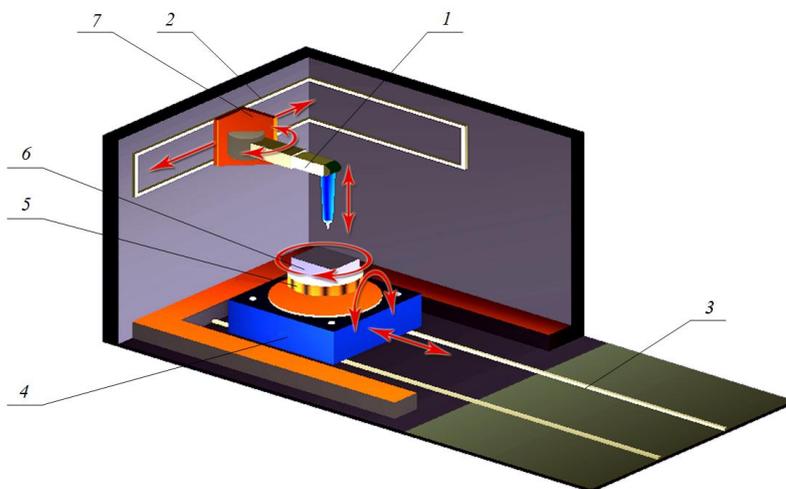


Рисунок 1 - Автоматизированный электронно-лучевой технологический комплекс с внутрикамерным расположением пушки: 1 – ЭЛП; 2 – направляющие модуля продольного перемещения ЭЛП; 3 - направляющие модуля продольного перемещения заготовки; 4 – модуль продольного перемещения; 5 – поворотное устройство; 6 –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

Проведен анализ параметров, определяющих точность позиционирования ЭЛ при ЭЛС. К ним относятся точность фокусировки ЭП Δ_{ϕ} , угол падения отклоненного пучка на поверхность свариваемого изделия θ и полная погрешность манипуляторов АЭЛТК Δr . Кроме этого, наиболее важными конструктивными параметрами процесса сварки являются тип и геометрия стыкового соединения и пространственное положение сварного шва и ЭП.

Анализ погрешностей манипуляторов в составе АЭЛТК показал, что среди прочих параметров ММД не учитываются их динамические характеристики. Однако возникающая при этом динамическая погрешность системы оказывает значительное влияние на точность перемещения ЭЛ по стыку, особенно в случае пространственного криволинейного стыка. Учитывая, что ЭЛС представляет собой сложный и быстротекущий процесс, то для обеспечения требуемой точности позиционирования ЭЛ предлагается разработать математическую модель процесса позиционирования ЭЛ при обработке траектории, учитывающая кинематические и динамические характеристики манипуляторов АЭЛТК. По результатам проведенных исследований сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена выбору и обоснованию критериев обеспечения точности позиционирования ЭЛ по стыку при ЭЛС. Было отмечено, что в определение полной погрешности ММД не входит погрешность, возникающая вследствие динамических нагрузок. Основные параметры процесса позиционирования ЭЛ с учетом динамической погрешности представлены в виде целевой функции разрабатываемой модели процесса позиционирования:

$$F = f(\Delta_{\phi}, \theta, \Delta r, \Delta_{\text{дин}}), \quad (1)$$

где Δ_{ϕ} - точность фокусировки электронного луча; θ – угол отклонения ЭП от оси, перпендикулярной поверхности свариваемого изделия; Δr – полная погрешность мехатронной системы АЭЛТК; $\Delta_{\text{дин}}$ – динамическая погрешность.

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

$$R_i[l]: \{\Delta F_i[l] \rightarrow \min\}, \quad (2)$$

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

В результате анализа полной погрешности ММД установлено, что при перемещении ЭЛ по стыку погрешность позиционирования луча зависит от погрешности системы управления и двигателей, кинематической и динамической погрешностей ММД в составе АЭЛТК, мёртвого хода и податливости преобразователей движения. Величина полной погрешности определяется как сумма перечисленных погрешностей.

На рис. 2 показана геометрическая модель объекта исследования, которая представляет собой положение фокального пятна нагрева ЭЛ на поверхности стыка с учётом конструктивных характеристик стыкового соединения.

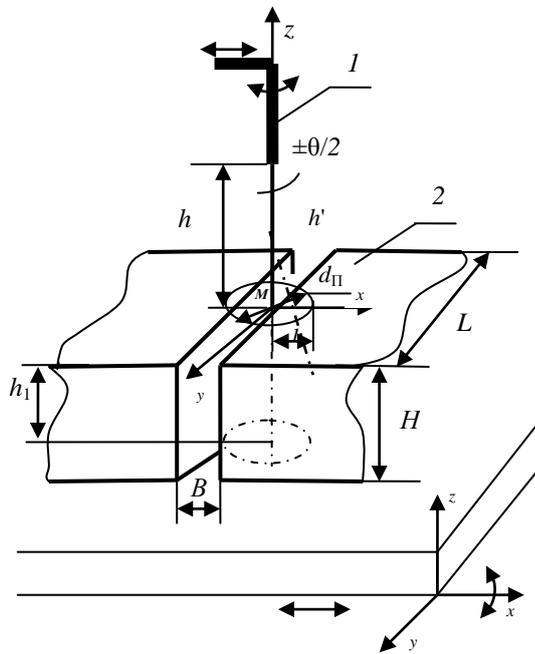


Рисунок 2 – Положение фокального пятна нагрева ЭЛ на поверхности стыка с учётом конструктивных характеристик стыкового соединения: где d_{Π} – диаметр ЭП; h – расстояние от среза сварочной пушки до плоскости сварного шва (длина ЭП); h' – длина отклонённого на угол θ ЭП; H – толщина свариваемых изделий; l – смещение центра пятна нагрева M при отклонении оси ЭЛ от перпендикулярности; M – центр пятна нагрева ЭЛ; h_1 – глубина проплавления; L – длина сварного шва; B – ширина зазора в стыке; 1 – ЭЛП; 2 – свариваемое изделие.

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

1. Учёт влияния полной погрешности мехатронных модулей движения АЭЛТК, а также динамической погрешности, K_1 .

2. Обеспечение постоянства взаимного положения оси симметрии электронного пучка и плоскости симметрии стыка, K_2 .

3. Обеспечение сохранения неизменным диаметра фокального пятна нагрева d_{Π} на поверхности стыка свариваемых деталей (сохранение круглой формы пятна нагрева, обеспечение перпендикулярности оси ЭЛ 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 .

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

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \Delta r, \\ K_2 &= \theta \leq (6-7)^\circ, \\ K_3 &= B \leq d_{\Pi} \leq 2B, \\ K_4 &= h = h_{\text{задан}} = \text{const}, \\ K_5 &= \begin{cases} h_1 = \text{const}, d_{\Pi} = \text{var}, \\ h_1 = \text{var}, d_{\Pi} = \text{const} \end{cases} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

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

Кинематический инвариант I_K может быть представлен в виде квадрата модуля скорости концевой точки выходного звена n -звенного манипулятора:

- в декартовых координатах:

$$I_K = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2, \quad (4)$$

где v_x, v_y, v_z - проекции вектора скорости на оси системы координат;

- в виде симметричной квадратичной формы обобщённых скоростей:

$$I_K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \frac{d\bar{q}_i}{dt} \frac{d\bar{q}_j}{dt}, \quad (5)$$

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

$\frac{d\bar{q}}{dt} = (\frac{d\bar{q}_1}{dt}, \frac{d\bar{q}_2}{dt}, \dots, \frac{d\bar{q}_n}{dt})$ - вектор-столбец ($n \times 1$) обобщённых скоростей механизма.

Динамическим инвариантом I_D является полная кинетическая энергия многозвенного механизма T и его также можно представить как симметричную квадратичную форму обобщённых скоростей:

$$I_D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{d\bar{q}_i}{dt} \frac{d\bar{q}_j}{dt}, \quad (6)$$

где I_{ij} - элементы тензора инерции I ($n \times n$) 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. Это позволит получить графическое представление множества скоростей концевых точек ММД.

Определение динамических характеристик системы методом Лагранжа-Эйлера позволяет на основе кинематической схемы манипулятора получить эмпирические зависимости отклонения выходного звена робота от заданного положения от величины кинетической энергии системы. Полученные зависимости показывают изменение динамической точности манипулятора в исследуемых точках, учитывая динамические характеристики исполнительных устройств в составе АЭЛТК.

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

$$F(\Delta) = \begin{cases} \Delta r(\Delta q, \delta_\Sigma, J_\Sigma, \Delta q', \Delta_{\text{дин}}, I_K, I_D, v, m, n) \\ f_{T.П.}(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, v_{св}) \end{cases}, \quad (7)$$

где Δr - полная погрешность мехатронной системы АЭЛТК; Δq - погрешность системы управления и двигателя; δ_Σ и J_Σ - 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; $v_{св}$ - скорость сварки.

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 после отработки траектории сварного стыка.

Предложенная математическая модель включает обеспечение критериев позиционирования ЭЛ, 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.

Кинематическая схема n -звенного манипулятора приведена на рисунке 3.

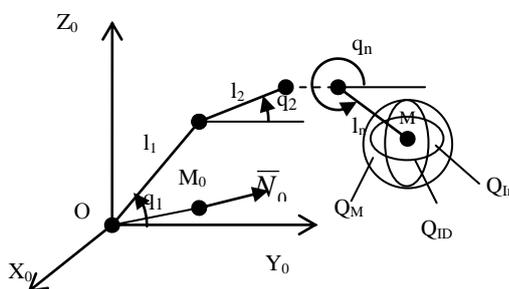


Рисунок 3 – Кинематическая схема n – звенного манипулятора.

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:

$$(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \cap Q_{IK} \cap Q_{ID} \in Q_S \quad (8)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_n – множества положений концевых точек выходных звеньев ММД, $n = 1 \dots k$ – 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.

Предложена структура 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 характеристик ММД АЭЛТК.

Задача управления заключается в разработке алгоритма управления, кото-

рый обеспечивает точное позиционирование ЭЛ по стыку на основе методики учета кинематической и динамической погрешностей механической части АЭЛТК. Объект управления – положение фокального пятна нагрева ЭЛ, положение которого определяется параметрами ЭЛП и геометрическими характеристиками сварного стыка. Относительные положения звеньев манипулятора ЭЛП характеризуются вектором обобщенных координат (или их приращений), выступающих в роли управляющих параметров:

$$\Delta R = R(q) - R_c \leq \Delta r_{\text{задан}}, \quad (9)$$

где $q = (q_1, q_2, q_3)$ – вектор обобщенных координат; $R(q)$, R_c – величины векторов и углов текущего и целевого положений манипулятора; ΔR – 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).

На рисунке 4 показана структурная схема системы управления процессом позиционирования ЭЛ на основе учета погрешностей ММД АЭЛТК, реализующая обратную связь от объекта управления к системе управления процессом ЭЛС. Контур контроля величины ΔR включает в себя датчик положения, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и блок расчета полной погрешности ММД АЭЛТК. При сравнении текущего и заданного значения ΔR и выполнении условия точности (5) происходит переход к следующей опорной точке сварного стыка, в противном случае в блоке корректировки проводится решение обратной задачи кинематики (ОЗК) и обратной задачи динамики (ОДК) по известной методике. Таким образом, происходит регулирование положения ЭЛ по стыку при ЭЛС до достижения конца сварного стыка L , что свидетельствует о завершении алгоритма управления.

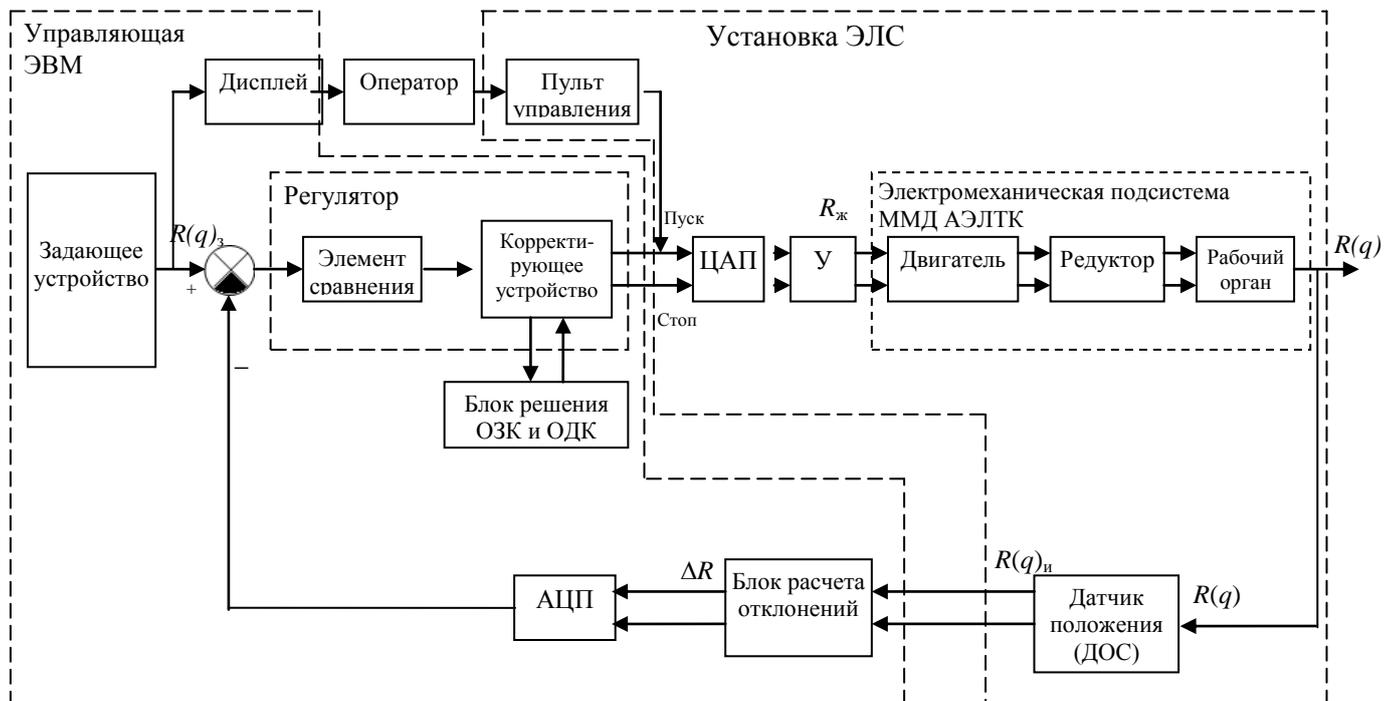


Рисунок 4 – Структурная схема автоматизированной системы управления процессом позиционирования ЭЛ при ЭЛС на основе учета погрешностей ММД АЭЛТК, где У - усилитель; ДОС – датчик обратной связи.

Алгоритм управления процессом позиционирования ЭЛ по стыку, реализующий предложенную математическую модель, представлен на рисунке 5.

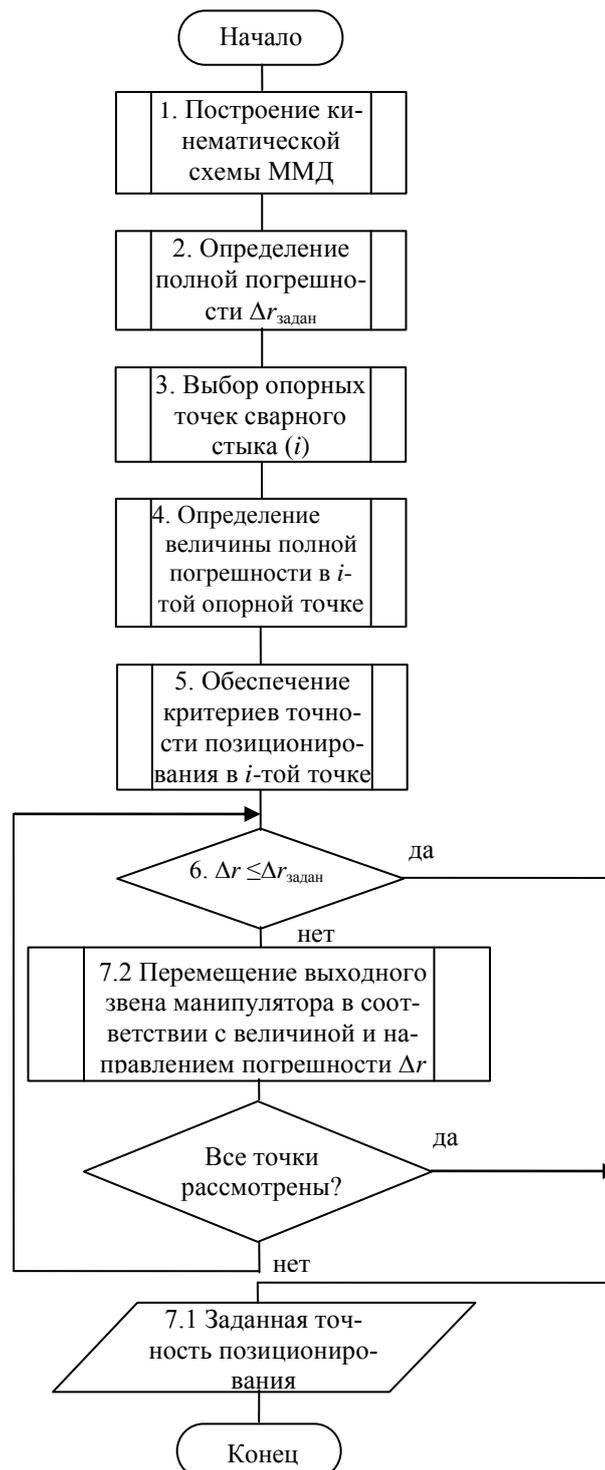


Рисунок 5 - Блок-схема алгоритма обобщённой модели обеспечения точности позиционирования выходного звена с учётом полной погрешности ММД.

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.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию процесса позиционирования ЭЛ и оценке влияния полной погрешности ММД на точность отработки траектории сварного стыка выходным звеном манипулятора. Разработана методика проведения экспериментального исследования, включая планирование эксперимента и обработку полученных результатов. Приведено описание оборудования для проведения экспериментальных исследований.

Применение полного факторного эксперимента и последующего регрессионного анализа позволило установить взаимосвязь между положением выходного звена и динамическими параметрами ММД опытной установки.

В качестве основных факторов, выбранных для проведения регрессионного анализа и влияющих на величину отклонения выходного звена ММД от заданного положения при ЭЛС, выбраны:

1. Максимальная линейная скорость выходного звена робота v_{max} в тестовом и автоматическом режимах, мм/с.
2. Масса нагрузки (ЭЛП) m_n , кг.

Каждый из факторов рассматривается на двух уровнях, верхнем и нижнем.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6. 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 датчика, в цифровые сигналы для обработки на ЭВМ используется блок усилителей сигналов и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7.

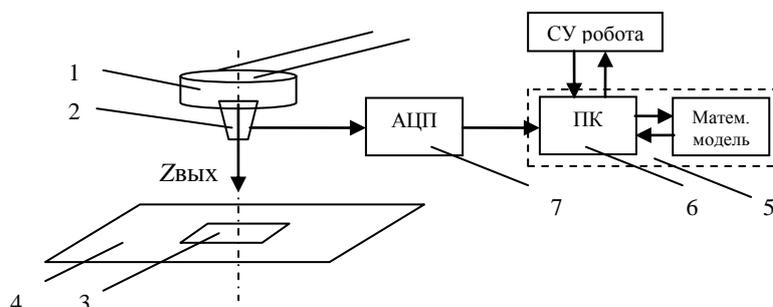


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки для исследования точности позиционирования выходного звена робота

Величина полной погрешности манипулятора Δr определялась численным методом на основании кинематической схемы манипулятора, его характеристик и расчетных данных в соответствии с методикой. Экспериментально-теоретическим путем определена зависимость изменения отклонения ЭЛ от заданного положения от величины кинетической энергии в исследуемых точках.

Проведено три серии экспериментов по определению точности выходного звена: без применения разработанной модели, с учетом кинематической погрешности и с учетом полной погрешности манипулятора (рис.7).

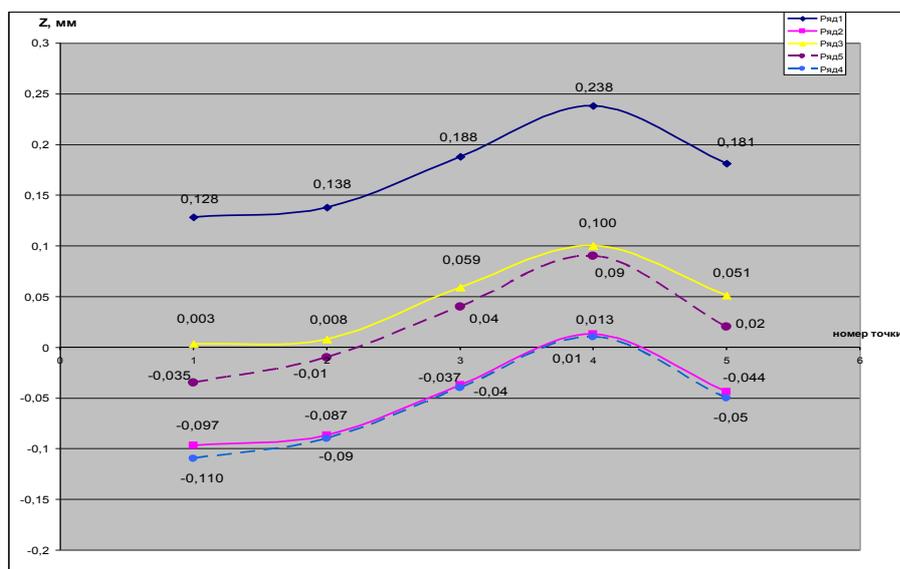


Рисунок 7 – Положение выходного звена манипулятора: ось X (значение 0) – заданная (идеальная) траектория; ряд 1 – реальная траектория, полученная на основе данных от датчика; ряд 2 – траектория, полученная от датчика с учётом кинематической погрешности; ряд 3 – траектория, полученная от датчика с учётом полной (кинематической и динамической) погрешности; ряд 4 – расчетная траектория с учетом кинематической погрешности; ряд 5 – расчетная траектория с учетом полной погрешности манипулятора.

Экспериментально установлено, что учет кинематической погрешности уменьшает погрешность позиционирования выходного звена МС более чем на 50%, а учет полной (кинематической и динамической) погрешности - на 75%. В условиях эксперимента среднее значение отклонения выходного звена от заданного положения составило 0,176 мм при незначительной стабилизации процесса позиционирования на 10 %.

Установлено, что эмпирическое уравнение взаимосвязи между положением выходного звена и динамическими характеристиками ММД АЭЛТК имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y_I &= 0,1538 + 0,000123 m_n + 0,00032 v_{max} \\
 Y_{II} &= -0,05 - 0,000037 m_n + 0,000053 v_{max} \\
 Y_{III} &= 0,0267 + 0,000034 m_n + 0,00027 v_{max},
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Адекватность полученных уравнений (10) была проверена по критерию Фишера для 5%-го уровня значимости. Средние расхождения 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.

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.

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

$$\Delta r = \Delta q + \delta_{\Sigma} + J_{\Sigma} + \Delta q' + \Delta_{дин} \quad , \quad (11)$$

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

На основании (10) определяем величину полной погрешности выходного звена ММД в соответствии с видами преобразователей движения, образующих манипуляционные механизмы перемещения ЭЛП и свариваемого изделия.

Для анализа динамических характеристик манипуляторов используют полную кинетическую энергию многозвенных механизмов. 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:

$$\Delta_{дин} = f(T_i) \quad , \quad (12)$$

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

Полная кинетическая энергия механической системы:

$$T = T_a + T_p \quad , \quad (13)$$

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

Определив согласно (13) 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 (12), учитывающие инерционные характеристики исполнительных устройств в составе АЭЛТК.

В соответствии с предложенным алгоритмом обеспечения заданной точности позиционирования ЭЛ по стыку (рис. 5) необходимо обеспечить выполнение установленных критериев K_1 - K_5 .

Траектория криволинейного пространственного сварного стыка определяется совокупностью точек, среди которых выбираются опорные точки. Они устанавливаются там, где траектория сварного стыка изменяет направление и необходимо проводить расчет величины полной погрешности ММД. После определения величины полной погрешности ММД (11) в каждой опорной точке траектории необходимо сделать вывод об условии обеспечения заданной точности позиционирования выходного звена ММД:

$$\Delta r \leq \Delta r_{задан} \quad , \quad (14)$$

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

Таким образом, предложенная методика включает в себя:

- определение величины полной погрешности манипулятора АЭЛТК, приведенной к выходному звену, включая кинематическую погрешность, мертвый ход звеньев манипулятора и погрешность, вызванную податливостью преобразователей движения;
- определение динамической погрешности на основе эмпирических зависимостей (12);
- обеспечение критериев точности K_1 - K_5 ;
- вывод об условии обеспечения заданной точности позиционирования выходного звена манипулятора (14).

Методика носит итерационный характер, и при невыполнении условия обеспечения точности проводится корректировка данных, и расчеты повторяются до выполнения этого условия.

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

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 Δr , включая динамическую погрешность; обеспечение постоянства взаимного положения оси симметрии ЭЛ и плоскости симметрии стыка, что определяется углом θ , 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 обеспечива-

ет 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 проведенного 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 «Ижпрэст» (г. Ижевск). Результаты проведенных исследований внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова».

Публикации по теме диссертации
в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Динамическая составляющая погрешности позиционирования выходного звена мехатронного комплекса / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Вестник ИжГТУ. - 2012 г. - № 2. - с. 43-46.

2. Экспериментальное исследование влияния кинематической погрешности на точность позиционирования выходного звена мехатронного комплекса / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Интеллектуальные системы в производстве, 2013 г. №2. – с. 100-104.

3. Исследование точности позиционирования выходного звена мехатронной системы / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова, Р. Гартянски // Журнал «Мехатроника, автоматизация, управление». - 2014 г. - № 7. – с. 35-41.

в других изданиях:

4. Математическая модель управления процессом позиционирования электронного луча при электронно-лучевой сварке / Ю.В. Зубкова // Автоматизация и прогрессивные технологии: Труды V межотраслевой научно-технической конференции. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2007. – Том I. - с. 23-24.

5. 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», 23 April 2008 – Izhevsk, Russia. - pp. 127-128.

6. Electron beam positioning in electron beam welding / J.V. Zubkova // Proceedings of 2nd Conference of PhD, students «Kondor 2008». - Trenčín, Slovakia, 2008. – pp. 113-114.

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

8. 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. - Trencianske Teplice, Slovakia, 2011. – pp. 89-92.

9. 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.

10. Модель позиционирования электронного луча при ЭЛС / Ю.В. Зубкова, Ю.В. Турыгин // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011). - Геленджик, Россия. – 2011 г. – с. 415-417.

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

12. Особенности учёта динамических характеристик при обеспечении точности позиционирования выходного звена мехатронной системы / Ю.В. Туры-

гин, 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.

13. Исследование точности позиционирования выходного звена мехатронной системы / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах». – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «Электроприбор», 2012. – с. 814-817.

14. 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.

15. 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.

16. Экспериментальное исследование точности позиционирования робота / Ю.В. Зубкова // 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. - с. 329-333.

17. 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. Turygin, Yu.V. Zubkova, N.P. Snegirev. – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. – pp. 339-342.

18. Экспериментальное исследование динамической погрешности выходного звена манипулятора при отработке траектории движения / Ю.В. Турыгин, Ю.В. Зубкова // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс]: электронное научное издание: сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 22-23 апреля 2015 года / 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.

19. 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.

Подписано в печать 15.10.2015.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Times. Печать на ризографе.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № __

Издательство Ижевского государственного технического университета
имени М.Т. Калашникова

Отпечатано в типографии Издательства ИжГТУ. 426069, Ижевск, Студенческая, 7