

На правах рукописи



Носиков Максим Владимирович

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВНУТРИКАМЕРНЫМИ
РАДИАЦИОННО-СТОЙКИМИ
МАНИПУЛЯТОРАМИ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск, 2020

Работа выполнена на кафедре «Автоматика» филиала ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» в г. Миассе.

Научный руководитель: Войнов Игорь Вячеславович
доктор технических наук, профессор,
директор филиала ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет (национальный ис-
следовательский университет)» в г. Миассе,
профессор кафедры «Автоматика»

Официальные оппоненты: Маленков Михаил Иванович
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
АО «Научно-технический центр «РОКАД»,
г. Санкт-Петербург

Гапонов Игорь Юрьевич
кандидат технических наук, профессор,
профессор института робототехники и компьютер-
ного зрения
АНО ВО «Университет Иннополис»,
г. Иннополис

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный техни-
ческий университет имени Н.Э. Баумана (нацио-
нальный исследовательский университет)»,
г. Москва

Защита состоится 26 октября 2020 г. в 17:00 часов на заседании диссертационно-
го совета Д212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский университет)» по адресу:
454080, г. Челябинск, пр. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-
Уральский государственный университет (национальный исследовательский
университет)» и на сайте [https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229803/nosikov-
maksim-vladimirovich](https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229803/nosikov-maksim-vladimirovich).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим вы-
слать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ
(НИУ)», Ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-93-69

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук, доцент



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На предприятиях атомной промышленности при проведении работ, связанных с переработкой радиоактивных материалов, используются различные технологические процессы. Специфической особенностью данных процессов является отсутствие прямого контакта персонала с обрабатываемым материалом на всех этапах производства продукции. Защита персонала и окружающей среды от воздействия ионизирующего излучения обеспечивается, в частности, применением герметичных («горячих») камер, оснащенных внутрикамерными средствами автоматизации. Широкое распространение на предприятиях, входящих в структуру Госкорпорации «Росатом», получили электромеханические манипуляторы МЭМ-10, разработанные в 70-х годах прошлого века. Управление манипуляторами, с помощью которых осуществляются захват и перемещение технологической тары с радиоактивными материалами, выполняется оператором вручную посредством перемещения кинематически подобного задающего органа, связанного с манипулятором через систему управления и расположенного на рабочем месте оператора за пределами герметичной камеры. Данный принцип заложен в основу большинства манипуляторов, выпускаемых в настоящее время в разных странах. Экстремальные условия эксплуатации (высокий уровень радиации, химически активная среда, наличие мелкодисперсных взвесей) наряду с техническими сложностями демонтажа, дезактивации и ремонта внутрикамерного оборудования делают практически невозможным использование хорошо исследованных и серийно выпускаемых роботов-манипуляторов общепромышленного назначения (сборочных, сварочных, покрасочных и т. д.) для автоматизации названных технологических процессов.

В связи с этим задача исследования и создания роботов-манипуляторов для работы в герметичных камерах на предприятиях атомной промышленности, оснащенных системами автоматического и автоматизированного управления и обучения персонала, является актуальной для дальнейшего развития науки и решения прикладных задач производства.

Степень разработанности темы

Вопросам автоматизации производств на основе робототехнических комплексов, промышленных роботов и манипуляционной вспомогательной оснастки посвятили свои работы известные российские ученые П.И. Белянин, Е.И. Воробьев, Ю.А. Дольников, С.В. Елисеев, С.В. Емельянов, А.Е. Кобринский, В.А. Козловский, Ю.Г. Козырев, А.И. Корендяев, В.С. Кулешов, И.М. Макаров, Е.И. Юревич, А.С. Ющенко, Б.А. Петров, Е.И. Семенов, Ю.А. Степаненко, А.В. Тимофеев и др., а также зарубежные ученые Н. Асада, Р. Гонсалес, Р. Пол, Д. Стокич, К. Фу и др. Вопросам создания и применения отдельных радиационно-стойких компонентов манипуляторов и систем управления посвящены работы ученых Ю.С. Смирнова, Д.А. Каца. Комплексные вопросы проектирования, испытаний, эксплуатации манипуляторов и систем управления для работы в экстремальных средах (в том числе в радиационных полях) отражены в работах И.В. Войнова, Б.А. Морозова.

Объектом исследования является класс многокоординатных (многостепенных) радиационно-стойких манипуляторов с вращательными степенями свободы, устанавливаемых в герметичных камерах предприятий

атомной промышленности.

Предметом исследования являются архитектура системы управления и алгоритмы управления манипуляторами данного класса в автоматизированном и автоматическом режимах работы.

Целью диссертационной работы является синтез комбинированной адаптивной системы управления манипулятором (функционирующей в автоматизированном и автоматическом режимах) для повышения эффективности выполнения технологических операций, выполняемых с использованием радиационно-стойких манипуляторов в условиях экстремальной среды внутри герметичных камер атомных производств.

Поставленная цель определяет необходимость решения следующих **задач**:

1. Анализ существующих методов и средств автоматизации технологических операций внутри герметичных камер. Анализ условий эксплуатации используемого оборудования, технических требований к конфигурации и конструкции манипуляторов, системам управления и человеко-машинным интерфейсам.
2. Синтез аппаратной и программной структуры комбинированной системы управления, разработка алгоритмов автоматизированного и автоматического режимов управления.
3. Разработка методики, структуры и алгоритмов работы системы тренажерного обучения операторов.
4. Изготовление и проведение натуральных испытаний опытного образца робота-манипулятора и его системы управления в условиях реального производства. Оценка корректности и эффективности предложенных научных и технических решений (конструкция, структура, методики, алгоритмы, программное обеспечение).

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Для рассматриваемого класса 6-степенных манипуляторов с кинематическими парами вращательного типа, с учетом специфических требований к условиям эксплуатации (ионизирующие излучения и химически активная среда) синтезирована новая структура системы управления манипулятором и разработан человеко-машинный интерфейс «оператор – манипулятор».
2. Предложен способ комбинированного адаптивного управления манипулятором от двух задающих органов типа «многокоординатный джойстик», на основе которого реализованы режимы управления по заданной траектории движения либо по текущим командам оператора.
3. Предложен новый алгоритм формирования управляющих воздействий на приводы манипулятора (в автоматизированном режиме работы), отличающийся тем, что в уравнение вычисления управляющих воздействий введены матрицы оценки приближения манипулятора к граничным условиям и адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающих органов, что позволяет исключить ударные механические воздействия на манипулятор при некорректных и/или несвоевременных действиях оператора.
4. Предложен алгоритм автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора на основе информации, поступающей от системы оптического детектирования объектов, идентифицированных двухмерным

QR-кодом, позволяющий осуществить выбор объекта и автоматическое подведение к нему рабочего органа (как правило, схвата манипулятора).

5. Разработаны архитектура и алгоритмы системы тренажерного обучения и регистрации действий операторов, структура базы данных системы.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке (синтезе) и исследовании новой, оригинальной системы управления классом многостепенных радиационно-стойких манипуляторов, работающих в герметичных камерах и управляемых в автоматическом режиме либо оператором посредством задающих органов типа джойстик, разработке методик и алгоритмов реализации различных режимов управления манипулятором, человеко-машинного интерфейса и программного обеспечения системы управления и тренажера для обучения персонала. Результаты исследований опубликованы в ряде изданий.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенных научно-технических решений при проектировании, изготовлении и эксплуатации на предприятиях атомной промышленности внутрикамерных манипуляторов, обладающих существенными преимуществами по сравнению с применяемыми в настоящее время. Созданный в процессе работы опытный образец робота-манипулятора защищен патентом РФ, разработанное программное обеспечение имеет ряд свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют:

- методы математического моделирования;
- методы анализа и синтеза цифровых систем управления;
- методы планирования эксперимента и статистической обработки информации;
- методы проведения полунатурных и натуральных экспериментов.

Внедрение результатов работы

Работа выполнена в рамках договоров на выполнение опытно-конструкторских работ «Разработка рабочей конструкторской документации роботизированного манипулятора для герметичных камер» и «Изготовление опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер» с ФГУП ПО «Маяк». Основные результаты диссертационной работы (архитектура и алгоритмы работы системы управления, программные модули системы управления) в составе опытного образца радиационно-стойкого манипулятора МР-48 успешно прошли испытания на ФГУП ПО «Маяк» Госкорпорации «Росатом». Результаты диссертационной работы также используются в учебном процессе и научно-исследовательских работах кафедры «Автоматика» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Структура системы управления и человеко-машинный интерфейс «оператор–манипулятор» для класса внутрикамерных многостепенных радиационно-стойких манипуляторов, позволяющие существенно расширить функциональные возможности системы в целом.
2. Способ комбинированного адаптивного управления манипулятором от задающих органов типа «многокоординатный джойстик».

3. Алгоритм формирования управляющих воздействий на приводы манипулятора с введенными матрицами оценки вектора приближения манипулятора к граничным условиям и адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающих органов, позволяющий исключить ударные механические воздействия на манипулятор при некорректных и/или несвоевременных действиях оператора.
4. Алгоритм автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора на основе информации, поступающей от системы оптического детектирования объектов, идентифицированных двумерным QR-кодом.
5. Архитектура системы тренажерного обучения и регистрации действий операторов, структура ее базы данных, алгоритмы работы системы, позволяющей выполнять эффективное обучение операторов в режиме «инструктор–оператор» и «ЭВМ–оператор».

Достоверность результатов определяется корректным использованием современных методик исследований, математического и натурального моделирования. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность системы и соответствие полученных результатов с выводами теоретической части работы.

Апробация результатов диссертации

Основные положения, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника – 2019» (ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, 2019) и «Экстремальная робототехника – 2018» (ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, 2018), международной конференции «Цифровая индустрия: состояние и перспективы (GloSIC – 2018)» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2018), международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг – 2018» (г. Москва, г. Челябинск, 2018), IX Российской конференции с международным участием «Радиохимия – 2018» (г. Санкт-Петербург, 2018), 67, 69, 70-й научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников ЮУрГУ (г. Челябинск, 2015, 2017, 2018).

Публикации

Основное содержание работы опубликовано в 11 печатных работах, в том числе 2 – в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, 3 статьи индексированы в международной базе цитирования Scopus. Получен 1 патент РФ на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы, содержащего 107 наименований, 5 приложений. Диссертация изложена на 199 страницах машинописного текста и содержит 74 рисунка и 30 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обосновывается актуальность решаемой научной задачи, формулируются цель и задачи исследования, перечисляются подходы и методы решения задач, приводятся результаты, выносимые на защиту, отмечается их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен обзор и сделан анализ современного состояния вопроса использования роботизированных манипуляторов при работе с радиоактивными материалами в герметичных камерах на предприятиях атомной промышленности, определены условия эксплуатации и сформулированы общие требования к манипуляторам данного класса и их системам управления.

На рисунке 1 представлена принятая в настоящее время схема работы с использованием электромеханического манипулятора МЭМ-10 с кинематически подобным задающим органом, системой управления типа «сельсин-датчик – сельсин-приемник» и оператором в контуре управления.

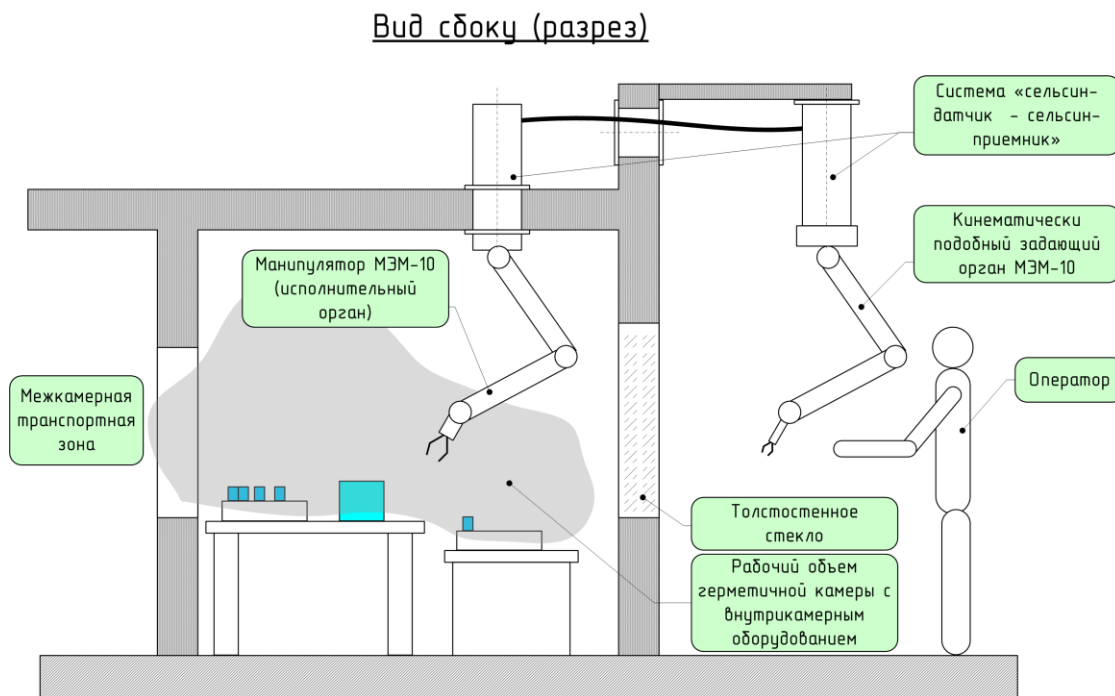


Рисунок 1 – Электромеханический манипулятор МЭМ-10
в герметичной камере

К недостаткам данного оборудования относятся:

- отсутствие автоматического режима запоминания и воспроизведения заданной траектории движения схвата;
- значительные механические усилия, прикладываемые оператором к задающему органу;
- ограниченность визуального обзора рабочей зоны, поскольку оператор наблюдает за процессом исключительно со своего рабочего места через замутненное (как правило) толстостенное стекло герметичной камеры;
- ограниченная точность выхода схвата манипулятора в заданную точку, что обусловлено наличием химически активной среды и частиц пыли внутри ка-

меры, попаданием этих частиц в негерметизированные сочленения манипулятора и образованием люфтов в этих сочленениях.

Рассмотрены подходы к синтезу аппаратно-программного состава и алгоритмов функционирования системы управления радиационно-стойкими манипуляторами с оператором в контуре управления, способы построения прямого канала управления «оператор – система управления – манипулятор» с несколькими типами задающих органов, варианты построения контура наблюдения «манипулятор – оператор» и различные способы представления информации о состоянии и параметрах движения манипулятора. Проведен анализ современных программных архитектур, операционных систем и инструментальных средств для синтеза систем управления роботов-манипуляторов.

На основе проведенного анализа:

- обоснован выбор кинематической схемы манипулятора (6-степенной, с кинематическими парами вращательного типа) с герметичными сочленениями и вынесенной за пределы герметичной камеры системой управления;
- сформулированы задачи синтеза системы управления и человеко-машинного интерфейса внутрикамерного манипулятора, определены задачи исследования и обоснована необходимость и актуальность их проведения.

Во второй главе сформулирована постановка задачи управления многозвенным манипулятором в автоматизированном и автоматическом режимах управления в трехмерном пространстве сложной геометрической конфигурации, определен состав и функциональные требования к подсистемам, определен перечень режимов управления манипулятором, проведен анализ и выбор способа решения задачи кинематического управления и синтеза программных траекторий, выполнен синтез комбинированной системы управления и алгоритмов управления манипулятором.

Для постановки и решения задач управления манипулятором с выбранной кинематической конфигурацией использован перечень типовых операций, осуществляемых в герметичной камере (Таблица 1).

Таблица 1 – Перечень операций, выполняемых внутрикамерным манипулятором

№	Тип/наименование операции
1.	Взятие, удержание в течение требуемого времени, освобождение объекта манипулирования (технологической тары, материала)
2.	Взятие и перенос объекта из приемной зоны камеры в рабочую зону и обратно
3.	Плоско-параллельное перемещение удерживаемого объекта между рабочими поверхностями
4.	Угловое ориентирование удерживаемого объекта при выполнении технологических операций
5.	Перенос объекта и его фиксация (подъем) в зоне измерения
6.	Взятие, замена требуемого инструмента

Перечень операций показывает, что структура открытой кинематической цепи манипулятора должна обеспечивать требуемое позиционирование объекта в пространстве и его требуемую ориентацию. Анализ кинематических структур манипуляторов, с учетом габаритных размеров внутреннего объема камеры, спо-

собоу установки манипулятора, характера выполняемых операций подтверждает, что выбранная кинематическая схема манипулятора с шестью степенями подвижности и кинематическими парами вращательного типа обеспечивает выполнение данных операций при соответствующих геометрических размерах звеньев манипулятора и углах поворота в его сочленениях. На рисунке 2 приведена выбранная кинематическая структура внутрикамерного манипулятора.

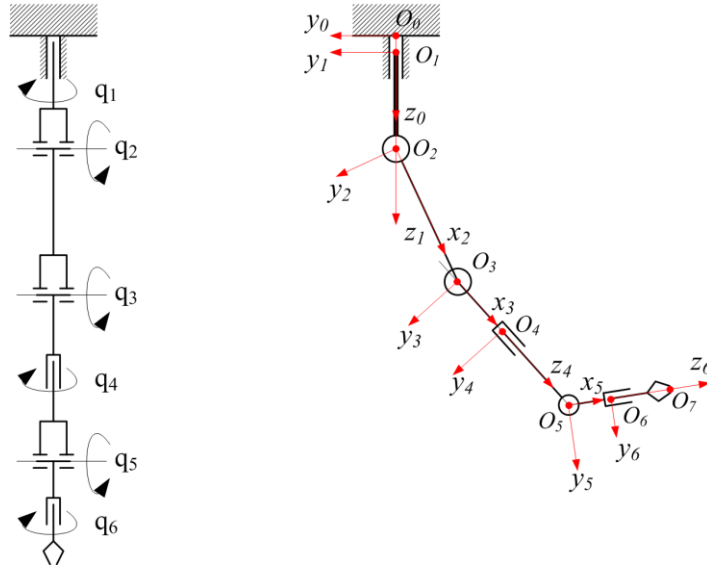


Рисунок 2 – Кинематическая структура 6-степенного манипулятора

Рассматривая исполнительный орган манипулятора как объект управления, обладающий определенными геометрическими и массо-габаритными параметрами и имеющий по каждой степени подвижности исполнительный привод, датчики скорости и положения, задача управления манипулятором с n степенями подвижности сводится к заданию исполнительным приводам манипулятора управляющих воздействий $\mathbf{Y}(t)$ таким образом, чтобы в автоматизированном (с человеком в контуре управления) и автоматическом режимах реализовывалась требуемая траектория движения схвата путем формирования расчетной кинематической конфигурации манипулятора (его обобщенных координат $\mathbf{q}(t) = \{q_1(t), \dots, q_n(t)\}$), при этом обеспечивались заданные значения целевых функций

$$G = f(Z), T = f(Z, t), \quad (1)$$

где

$$Z = \{(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_k, y_k, z_k)\}$$

– множество координат узловых точек траектории Z манипулятора;

$$G = \sqrt{(x_k - x_q)^2 + (y_k - y_q)^2 + (z_k - z_q)^2}$$

– функция ошибки позиционирования схвата манипулятора;

$$T = f(Z, t)$$

– функция времени выполнения траектории Z ;

$$(x_q, y_q, z_q)$$

– координаты цели.

Формальную постановку задачи управления можно представить в виде функций

$$Y_p(t) = \Phi(M(t)) \cdot \begin{pmatrix} O(t) \\ U(t) \\ S(t) \\ E_m(t) \end{pmatrix}, \quad Y_D(t) = \Phi(M(t)) \cdot \begin{pmatrix} O(t) \\ U(t) \\ S(t) \\ E_M(t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$Y_p(t), Y_D(t)$ – векторы управляющих воздействий на пропорциональные и дискретные исполнительные приводы манипулятором;

$\Phi(M(t))$ – функция режима управления M ;

$O(t)$ – вектор управляющих воздействий (команд, уставок), формируемый оператором манипулятора посредством воздействия на задающие органы;

$U(t)$ – вектор управляющих воздействий (команд, уставок), формируемый системой управления в автоматических режимах управления;

$S(t)$ – вектор состояния манипулятора и его подсистем;

$E_m(t)$ – вектор состояния внешней среды;

$M(t)$ – режим управления манипулятором – некоторое целое число из множества MP , описывающего возможные режимы и подрежимы работы системы управления.

В работе выделены и конкретизированы следующие подмножества режимов управления MP :

1. $MP_M \subset MP$ – подмножество автоматизированных режимов управления, выполняемых оператором: управление в обобщенных координатах манипулятора по скорости; управление линейными координатами и скоростью схвата в базовой СК; управление линейными координатами и скоростью схвата в связанной с ним системе координат; режим записи траектории и т. д.
2. $MP_A \subset MP$ – подмножество автоматических режимов управления, выполняемых системой управления (синтез и последующее воспроизведение траекторий движения манипулятора).
3. $MP_{MAS} \subset MP$ – подмножество автоматизированных режимов с функционирующими одной или несколькими подсистемами контроля и управления. В данном случае реализуются алгоритмы комбинированного управления с элементами адаптации.

Исходя из необходимости решения поставленных задач управления, проведен синтез и предложена структура комбинированной системы управления манипулятором (Рисунок 3):

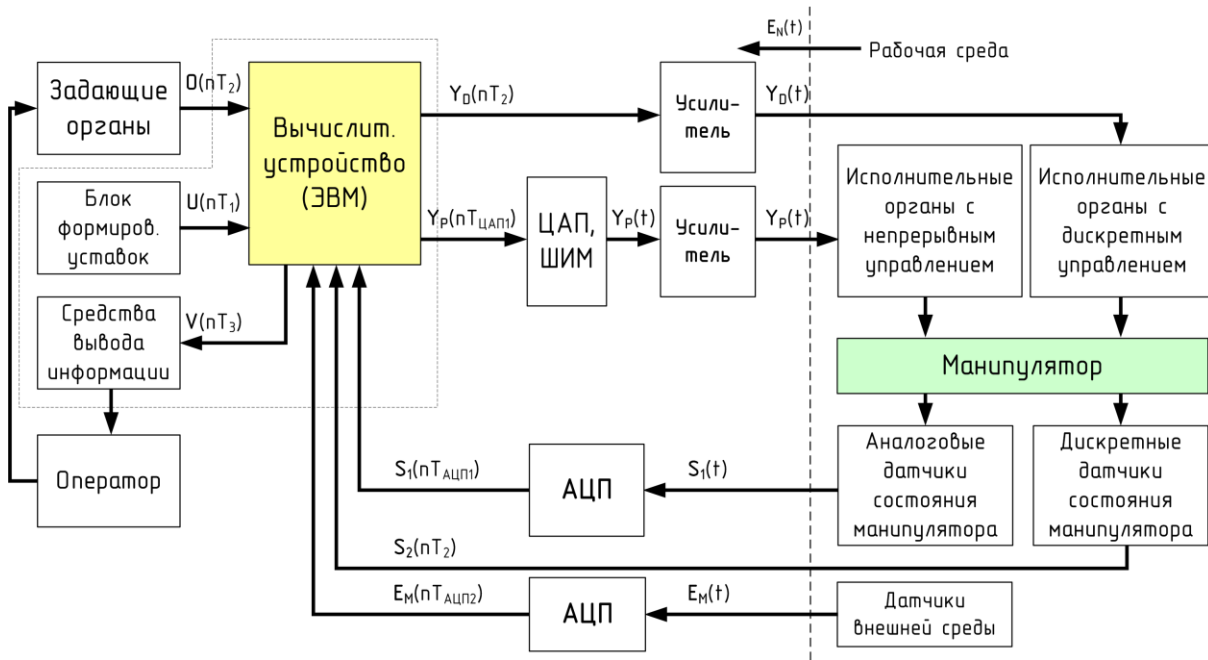


Рисунок 3 – Структура системы управления манипулятором

В соответствии с теорией управления робототехническими системами представляется целесообразным декомпозиция системы управления на локальные системы управления (далее – ЛСУ) отдельными исполнительными приводами звеньев и систему управления (далее – СУ) манипулятора, реализующую высокоуровневые контуры управления (Рисунок 4).

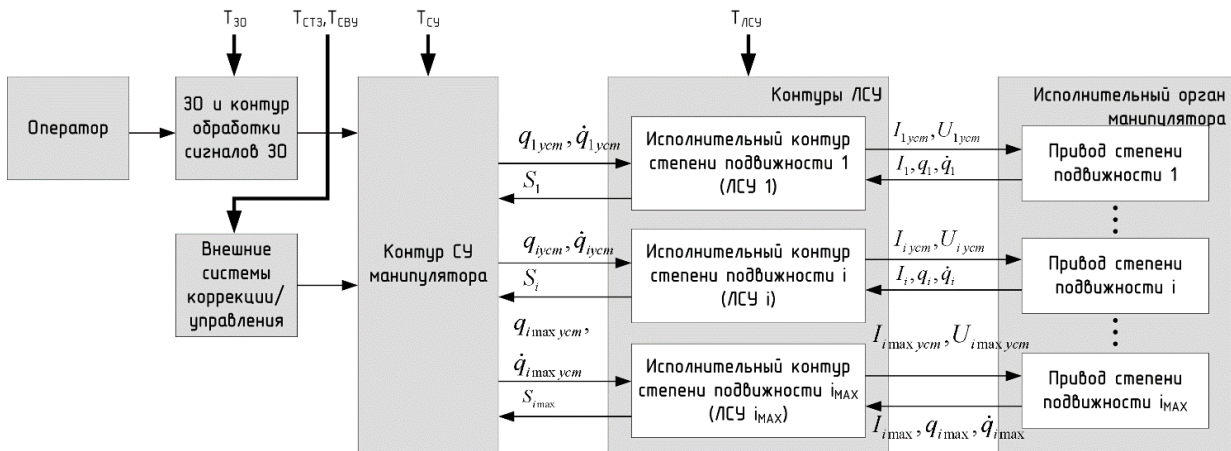


Рисунок 4 – Структура декомпозированной на контуры системы управления

Базируясь на том, что манипулятор является динамическим объектом, при синтезе контуров ЛСУ необходимо осуществлять решение задач динамики движения системы твердых тел, описываемых в задачах робототехники, как правило, в форме уравнений Лагранжа второго рода. Для отдельного звена данное уравнение представляется в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, \dots, n, \tag{3}$$

где

- L – функция Лагранжа (Лагранжиан);
- Q_i – движущий момент сил, приведенная к оси i -го звена.

Уравнение (3) может быть представлено в скалярно-координатном

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijk} \dot{q}_k \dot{q}_j + c_i = M_i, i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

или векторно-матричном виде:

$$A(q) \ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q, \quad (5)$$

где:

- $A(q) \ddot{q}$ – векторная функция сил инерции, пропорциональных ускорению;
- $A(q)$ – матрица, описывающая инерционные свойства механической системы;
- $b(\dot{q}, q)$ – n -мерный вектор скоростных сил (центробежных, кориолисовых, сил трения и т.д.);
- $c(q)$ – n -мерный вектор сил тяжести;
- Q – вектор обобщенных движущих сил.

Для моделирования динамики движения манипулятора с учетом моментных (силовых) возможностей его исполнительных приводов система уравнений (5) дополняется уравнениями динамики исполнительного привода и представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} x = f(q) \\ q = A_M(Q_{ДВ}, Q_B), \\ Q_{ДВ} = A_{ДВ}(u_{ДВ}) \end{cases} \quad (6)$$

где

- q – вектор обобщенных координат манипулятора;
- x – вектор выходных координат манипулятора;
- $u_{ДВ}$ – вектор управляющих воздействий на входе привода;
- $A_M, A_{ДВ}$ – операторы механической системы и системы приводов;
- $Q_{ДВ}$ – вектор движущих моментов на выходе приводов манипулятора;
- Q_B – вектор сил, действующих по n степеням подвижности.

Теоретические выводы и практические результаты подтверждают, что при невысоких скоростях движения схвата манипулятора (0,1–0,15 м/с) динамическое взаимовлияние приводов достаточно мало, допустимо не учитывать взаимовлияние звеньев по ускорению и скорости, т. е. пренебречь недиагональными элементами матрицы $A_M(q)$ и смешанными произведениями скоростей в выражении $b(\dot{q}, q)$ (5). Кроме того, при наличии в приводах редукторов с большим передаточным соотношением возможно пренебречь моментами инерции звеньев по сравнению с моментами инерции приводов. С учетом этого, моделирование и реализацию контуров управления ЛСУ возможно выполнить по схеме ПИ- либо ПИД-регулирования с использованием метода фиксированных, вычисляемых или динамически назначаемых от системы верхнего уровня коэффициентов регулирования в соответствии со следующей структурной схемой (Рисунок 5), где параметрами q и P обозначены вектор обобщенных координат манипулятора и вектор параметров регулятора, передаваемых от СУ верхнего уровня.

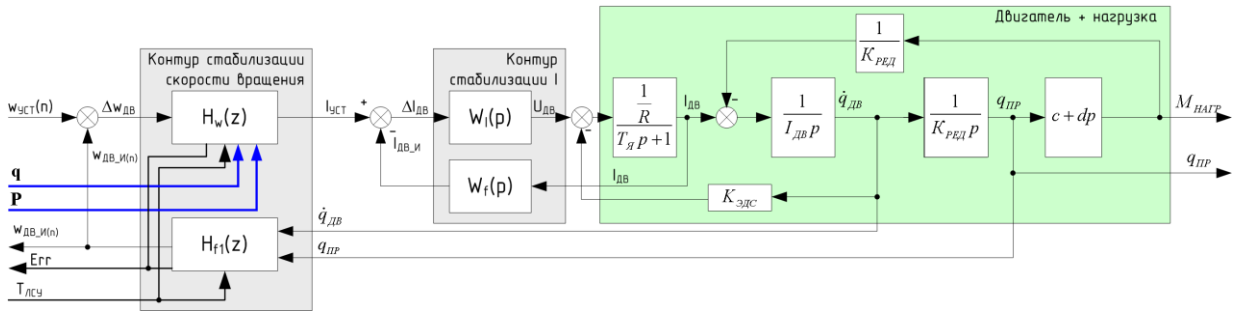


Рисунок 5 – Структура контура ЛСУ

Исходя из предложенной двухуровневой структуры СУ, синтезирована многозадачная расширяемая программная архитектура верхнего уровня с распараллеливанием вычислительных процессов и применением событийно-управляемой модели обработчиков системных и пользовательских аппаратных и программных событий. Целью данного синтеза являлось создание масштабируемой (в части функциональных возможностей и информационного обмена) системы управления с возможностью унификации и интеграции с внешними СУ и системами АСУ ТП для построения информационно-измерительных внутрикамерных комплексов. При создании данной архитектуры предложены: состав программных модулей СУ верхнего уровня, структуры межмодульных информационных сообщений, протоколы обмена с контурами ЛСУ, а также методика и соответствующее программное обеспечение для автоматизированного генерирования шаблонов исходного кода модулей СУ, позволяющая минимизировать время разработки и подключения новых программных модулей.

На основе проведенного в главе 1 анализа реализацию автоматизированных режимов управления и организацию переключения между ними предложено осуществлять при помощи задающих органов типа джойстик с пропорциональными $O_p(t)$ и дискретными $O_D(t)$ выходными координатами управления. Анализ известных кинематических схем задающих органов данного типа позволяет сделать вывод о целесообразности применения многокоординатных задающих органов с числом управляемых выходных координат ≥ 2 . С учетом возможности оператора осуществлять манипуляции двумя руками, предложен комбинированный способ управления путем сочетания двух задающих органов с наличием $(m_1 + m_2)$ пропорциональных и $(n_1 + n_2)$ дискретных каналов управления (расположенных в зоне досягаемости рук оператора при отклонении ЗО (на рукоятке ЗО)). Следует отметить, что в качестве базового режима управления принят режим управления по скорости ($\dot{q} = f(\mathbf{O}(t))$), при котором скорость движения отдельных звеньев манипулятора либо линейная скорость его схвата пропорциональна значению отклонения соответствующей оси задающего органа. На рисунке 6 представлен внешний вид рассматриваемых задающих органов с указанием их степеней подвижности и соответствующих компонентов вектора $\mathbf{O}(t)$.

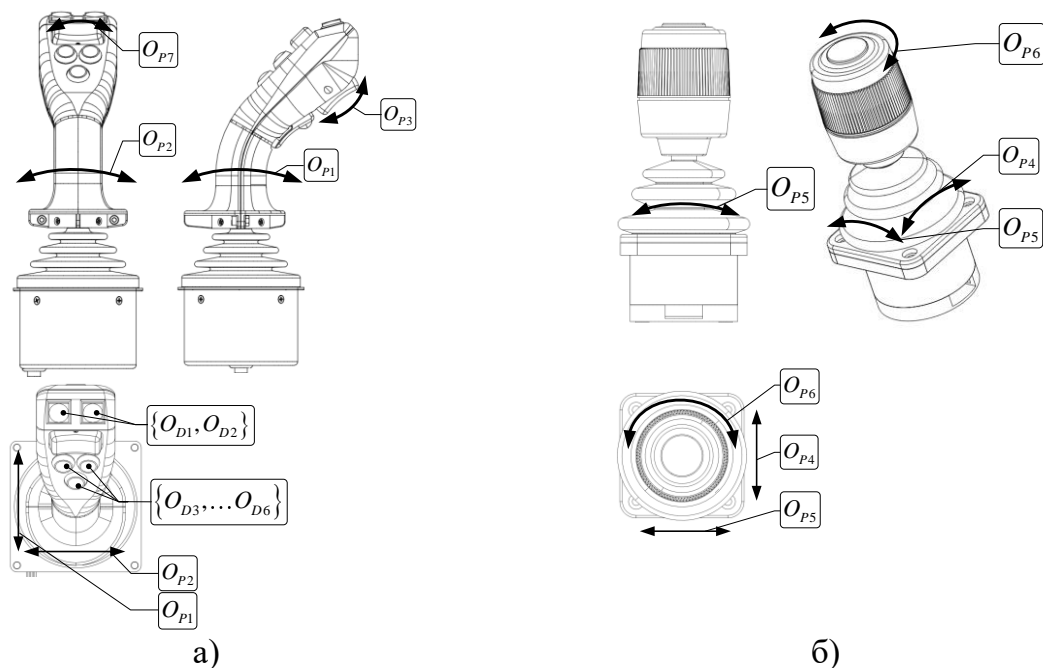


Рисунок 6 – Многокоординатные задающие органы (джойстики) типа 1 (а) и типа 2 (б)

Для реализации расширенных возможностей управления манипулятором, осуществления ряда алгоритмов защит, а также учета индивидуальных особенностей оператора предложены два следующих подхода (алгоритма):

1. Алгоритм адаптивного формирования вектора обобщенных выходных координат задающего органа, передаваемого в систему управления в виде:

$$\mathbf{O}_{OUT}(t) = \min\{\mathbf{C}\} \cdot \begin{pmatrix} k_{S_1 O_{P_1}} & k_{S_1 O_{P_2}} & \dots & k_{S_1 O_{P_n}} & k_{S_1 O_{D_1}} & k_{S_1 O_{D_2}} & \dots & k_{S_1 O_{D_k}} \\ k_{S_2 O_{P_1}} & k_{S_2 O_{P_2}} & \dots & k_{S_2 O_{P_n}} & k_{S_2 O_{D_1}} & k_{S_2 O_{D_2}} & \dots & k_{S_2 O_{D_k}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{S_j O_{P_1}} & k_{S_j O_{P_2}} & \dots & k_{S_j O_{P_n}} & k_{S_j O_{D_1}} & k_{S_j O_{D_2}} & \dots & k_{S_j O_{D_k}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} O_{PC1}(t) \\ \vdots \\ O_{PCm}(t) \\ O_{DC1}(t) \\ \vdots \\ O_{DCk}(t) \end{pmatrix} \quad (7)$$

где

$\mathbf{O}_{OUT}(t)$ – вектор управляющего воздействия от задающего органа к СУ;

$O_{PCi}(t)$ – компоненты вектора величины отклонения по пропорциональным каналам задающих органов (углы отклонения по осям джойстиков);

$O_{DCi}(t)$ – компоненты вектора состояния дискретных каналов задающих органов (нажатия кнопок и тумблеров джойстиков);

\mathbf{C} – матрица оценки приближения манипулятора к граничным условиям;

$k_{S_i O_{P_k}}$, – коэффициенты передачи k -го пропорционального (дискретного) канала управления джойстика в выходную i -ю обобщенную координату вектора O_{OUT} .

$k_{S_i O_{D_k}}$

В общем случае $k_{S_i O_{P_k}}$, $k_{S_i O_{D_k}}$ являются функцией времени, текущего режима

работы манипулятора, его кинематической конфигурации, информации от подсистем контроля состояния СУ, оценки воздействий оператора.

С целью повышения эффективности управления манипулятором в автоматизированном режиме в матрично-векторное выражение вычисления управляющих воздействий (7) введена матрица оценки приближения к граничным условиям C . Компоненты данной матрицы являются весовыми коэффициентами оценки приближения вектора состояния манипулятора к определенному виду кинематических ограничений:

1. Величины приближения значений обобщенных координат манипулятора к предельным ограничениям их возможного диапазона ($C_{1,1}, \dots, C_{1,n}$);
2. Текущих ограничений по скоростям вращения в кинематических парах ($C_{2,1}, \dots, C_{2,n}$);
3. Текущей дистанции от промежуточных сочленений манипулятора до внутренних препятствий ($C_{3,1}, \dots, C_{3,n}$);
4. Величины приближения манипулятора к вырожденным конфигурациям C_4 (требуется при управлении в пространстве декартовых координат):

$$C = \begin{pmatrix} C_{1,1} & \dots & C_{1,n} \\ C_{2,1} & \dots & C_{2,n} \\ C_{3,1} & \dots & C_{3,n} \\ C_4 & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad C_{i,k} \in [0 \dots 1], \quad \forall i, k \quad (8)$$

n – число степеней подвижности

Соответствующие алгоритмы контроля состояния манипулятора формируют значения весовых коэффициентов $C_{i,k}$ таким образом, чтобы при наступлении некоторых пороговых ограничений значение величины $C_{i,k}$ уменьшалось до нуля и оставалось равным единице в противном случае (при нормальных условиях эксплуатации). Вычисление выходного управляющего воздействия выполняют по критерию минимального значения матрицы C : $\min_{\substack{j=1 \dots k \\ k=1 \dots n}} \{C_{j,k}\}$, т. е. при одно-

временном наступлении нескольких ограничений выбирается приоритетный по условию минимального значения. При этом информация о наступлении условий по остальным критериям должна быть донесена до системы управления и оператора.

2. Алгоритм коррекции характеристики «отклонение задающего органа – выходной сигнал задающего органа».

Предлагаемым алгоритмом реализуется коррекция зависимости выходного сигнала задающего органа от углового отклонения его рукоятки. Данная, как правило, линейная зависимость не всегда эффективна с точки зрения эргономических особенностей оператора. Коррекцией данной характеристики достигается реализация следующих задач:

1. Повышение чувствительности оператора к перемещению задающего органа в зоне малых перемещений и максимальных отклонений задающего органа.
2. Учет индивидуальных психо-физических особенностей оператора при эксплуатации манипулятора.

Для обработки, анализа и использования скорректированных характеристик предложена структура базы данных, а также соответствующий программный код.

Предложенная в работе архитектура системы технического зрения (далее – СТЗ) совместно с системой идентификации объектов QR-кодом позволяет решить следующие задачи: а) получение информации о параметрах идентифицированного объекта; б) наведение схвата манипулятора на объект в автоматизированном режиме, т. е. формирование за определенный интервал кинематической конфигурации манипулятора таким образом, чтобы система координат, связанная с видеосенсором, была определенным образом позиционирована и ориентирована относительно системы координат, связанной с объектом (Рисунок 7 до и после наведения на объект). С учетом априорной или полученной в ходе анализа QR-кода информации о типе объекта (в том числе данных о его геометрических характеристиках) задачей системы наведения является синтез траектории и последующий автоматический вывод полюса схвата манипулятора (с учетом габаритных размеров используемого инструмента) в заданную точку пространства S , координаты которой вычислены в базовой системе координат. В ходе данного этапа работы синтезированы требования к первичным видеосенсорам, выполнен анализ и выбран способ расчета программных траекторий вывода полюса схвата, в частности, с использованием системы кинематических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{q}_0 = a_5 t_0^5 + a_4 t_0^4 + a_3 t_0^3 + a_2 t_0^2 + a_1 t_0 + a_0 \\ \dot{\mathbf{q}}_0 = 5a_5 t_0^4 + 4a_4 t_0^3 + 3a_3 t_0^2 + 2a_2 t_0 + a_1 \\ \ddot{\mathbf{q}}_0 = 20a_5 t_0^3 + 12a_4 t_0^2 + 6a_3 t_0 + 2a_2 \\ \mathbf{q}_1 = a_5 t_1^5 + a_4 t_1^4 + a_3 t_1^3 + a_2 t_1^2 + a_1 t_1 + a_0, \\ \dot{\mathbf{q}}_1 = 5a_5 t_1^4 + 4a_4 t_1^3 + 3a_3 t_1^2 + 2a_2 t_1 + a_1 \\ \ddot{\mathbf{q}}_1 = 20a_5 t_1^3 + 12a_4 t_1^2 + 6a_3 t_1 + 2a_2 \end{array} \right. \quad (9)$$

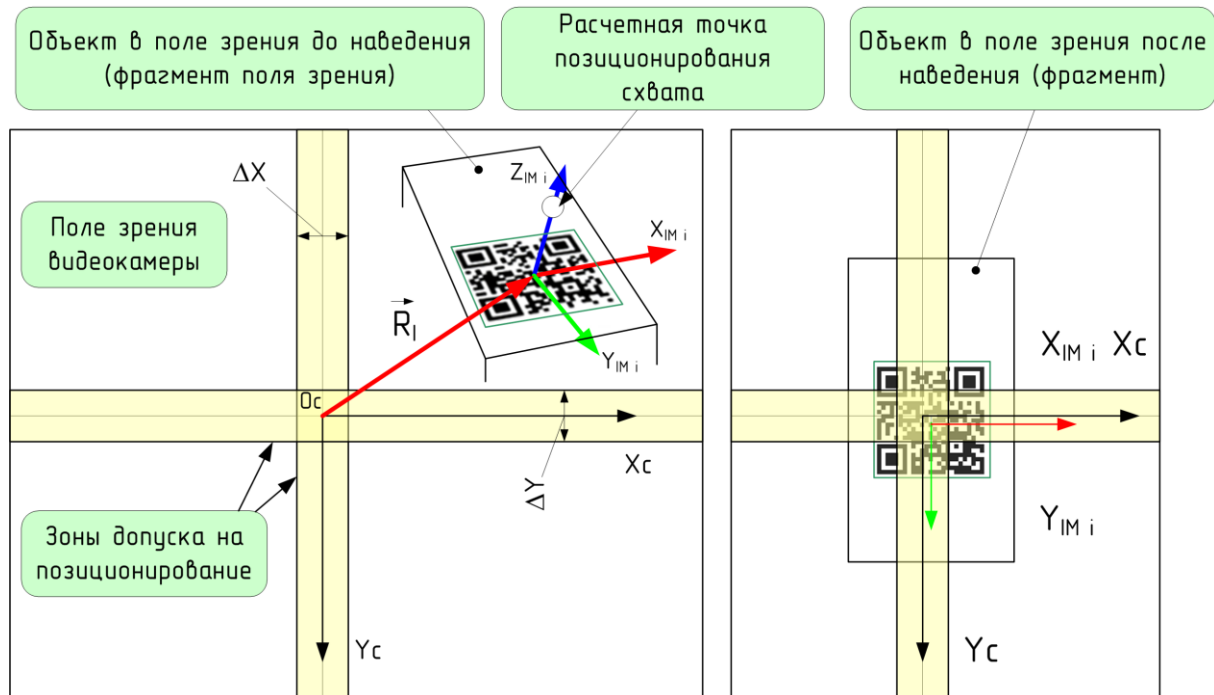


Рисунок 7 – Идентифицированный объект в поле зрения видеокамеры до и после наведения схвата манипулятора

Одной из задач процесса технического перевооружения предприятий атомной отрасли являются теоретическая подготовка, формирование, отработка и оценка практических навыков работы с новым типом оборудования. В рамках данной диссертационной работы предложена архитектура и программная реализация системы тренажерного обучения, регистрации и анализа действий операторов внутрикамерных манипуляторов, выполняющей следующие задачи: а) формирование набора обучающих и контрольных заданий для различных сценариев выполнения технологических операций; б) обеспечение гарантированной записи на информационный носитель всех управляющих векторов, векторов состояния, режимов и настроечных параметров системы; в) организация участия инструктора в процессе тренажерной сессии с целью оперативной коррекции действий обучаемого оператора. После накопления необходимого набора исходных данных о работе системы возможно поэтапное введение технологий машинного обучения. Для оценки качества освоения программы обучения введены следующие критерии: 1) время достижения требуемой по заданию конечной точки траектории; 2) сумма(-ы) квадратов отклонений декартовых координат схвата (радиус-вектора), обобщенных координат манипулятора и отклонений задающих органов от требуемых в учебно-тренировочном задании на всей реализуемой оператором траектории движения. Для формирования тренажерных заданий, оценки действий оператора в режиме реального и отложенного времени предложены необходимые аппаратные и программные средства визуализации, хранения и анализа данных.

Результатом проведенных теоретических исследований являются:

- синтезированная система управления манипулятором, обеспечивающая реализацию автоматического и автоматизированного режимов управления;
- обоснование эффективности применения системы технического зрения;
- архитектура и программная реализация системы тренажерного обучения персонала.

Третья глава посвящена исследованию разработанного и изготовленного опытного образца внутрикамерного манипулятора МР-48 в условиях действующего производства, проверке эффективности предложенных автором способов и алгоритмов управления и тренажерного обучения операторов. На рисунке 8 представлен внешний вид манипулятора МР-48 с шестью кинематическими параметрами вращательного типа (исполнительный орган). С целью защиты от воздействия окружающей среды корпус манипулятора выполнен из стали марки 12Х18Н10Т, исполнительные электроприводы, планетарно-цевочные передачи, датчики положения и скорости звеньев расположены внутри герметичных соединений, кабельная разводка проложена внутри полых звеньев манипулятора и выведена на внешний герметизированный разъем, через который осуществляется подключение к пульту управления. Основные технические характеристики МР-48 приведены в таблице 2.



Рисунок 8 – Внешний вид опытного образца манипулятора МР-48

Таблица 2 – Технические характеристики манипулятора МР-48

№	Параметр	Значение
1	Грузоподъемность максимальная, [кг]	10
2	Масса манипулятора, [кг]	35
3	Число степеней подвижности	6 + схват
4	Общая длина подвижных звеньев, [мм]	900
5	Погрешность позиционирования схвата, [мм]	±1
6	Погрешность ориентирования схвата, [угл. град.]	±0,2

На рисунке 9 приведен внешний вид пульта управления с двумя многокоординатными джойстиками (задающими органами).



Рисунок 9 – Пульт управления манипулятором МР-48

Основные контуры управления функционируют на промышленном компьютере с сенсорным экраном Advantix PPC-12FN, процессором Intel Pentium, функционирующим на частоте 2,9 ГГц.

Опытная эксплуатация МР-48 проводилась в лабораторных условиях и непосредственно в герметичной камере ФГУП ПО «Маяк» в течение более 1 000 часов в автоматизированном и автоматическом (по заданной траектории) режимах работы.

Непосредственно в процессе испытаний были экспериментально определены требования по эргономике, в результате чего была доработана конструкция пульта управления и формат представления оператору информации о текущем состоянии манипулятора.

При отладке алгоритмов адаптивного вычисления коэффициентов передачи «задающий орган – манипулятор» (в автоматизированном режиме) проведены серии экспериментов по определению допустимых границ зон безопасности по

следующим критериям: величине приближения к предельным угловым ориентациям в сочленениях манипулятора, величине приближения к вырожденным конфигурациям манипулятора, и приближению схвата манипулятора к внутрикамерным препятствиям. В частности, на рисунке 10 приведены графики зависимостей коэффициента передачи $k_{S_1O_{P_1}}$, положения схвата манипулятора и отклонения задающего органа по одной из координат при приближении к ограничению (рабочей поверхности), при заданной величине зоны безопасности $D_{MAX} = 0,1$ м. Точками t_1 , t_2 обозначены моменты входа/выхода схвата в зону безопасности. В процессе экспериментов выявлено, что для реализации алгоритмов защиты, как правило, достаточно формирования линейной зависимости коэффициента передачи от величины приближения к предельному значению контролируемого параметра, с сохранением минимальной величины коэффициента передачи около 3–5 % от номинального значения с целью обеспечения подвижности манипулятора в зоне минимального приближения к ограничению.

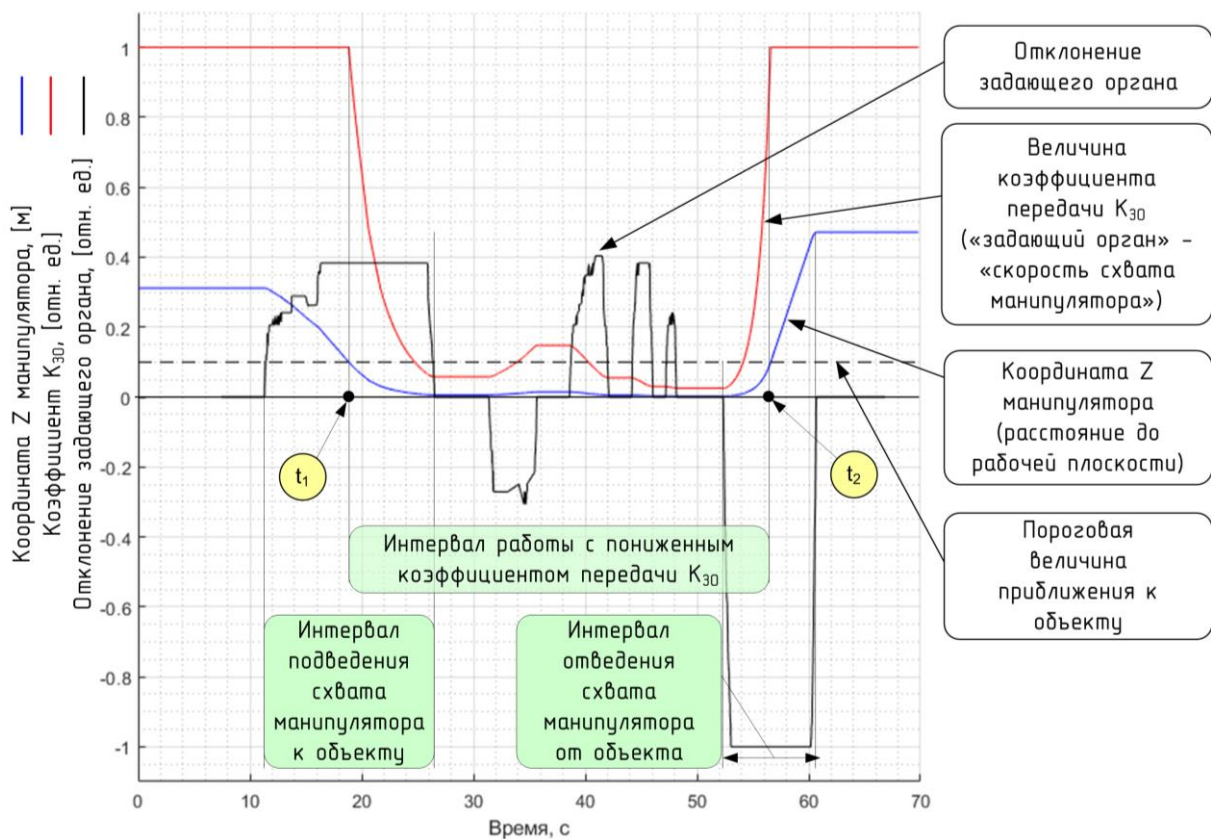


Рисунок 10 – Графики движения и управления манипулятором с адаптивным коэффициентом передачи управляющих воздействий

Предложенная в главе 2 архитектура и программная структура системы тренажерного обучения реализована в виде подсистемы, позволяющей инструктору задавать траектории движения манипулятора путем их формирования в реальном времени воздействием на задающие органы рабочей станции инструктора ($O_{PC_I}(t)$, $O_{DC_I}(t)$), либо выбирая их из набора типовых траекторий (базы данных заданий). В процессе освоения программы подготовки оператор формирует корректные воздействия на задающие органы пульта управления манипулятором ($O_{PC}(t)$, $O_{DC}(t)$) путем визуального контроля и совмещения положения меток за-

дающих органов на дополнительном экране контроля действий подсистемы визуализации информации. Целью эксперимента являлось определение степени эффективности подсистемы тренажерного обучения по следующим критериям:

- а) времени выполнения типовых технологических операций или операций управления манипулятором;
- б) значения среднеквадратического отклонения воздействий оператора (углов наклона и поворота джойстиков) на задающие органы от требуемой величины.

На рисунке 11 приведены результаты эксперимента по оценке действий оператора, осуществляющего перемещение схвата манипулятора МР-48 по одной обобщенной координате q_2 до и после программы обучения.

Оценка эффективности системы тренажерного обучения по вышеприведенным критериям была осуществлена путем анализа действий технического персонала (12 человек, не имеющих опыта управления манипулятором) при выполнении типовых технологических операций до и после процесса тренажерной подготовки. Средневзвешенные значения времени выполнения ряда типовых операций приведены в работе и показывают снижение времени выполнения типовых операций на 50–80 %. В результате проведенного эксперимента доказана эффективность предложенной системы тренажерного обучения персонала.

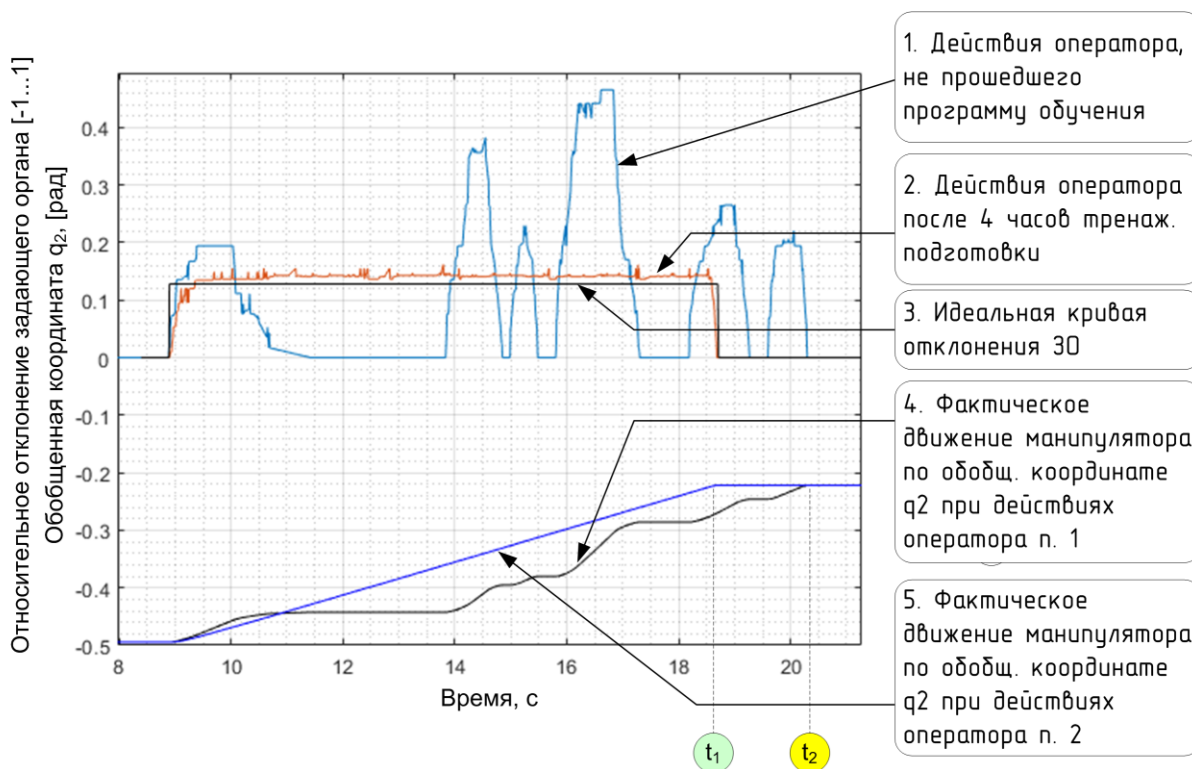


Рисунок 11 – Пример управляющих воздействий оператора до и после прохождения программы обучения

Для оценки применимости системы технического зрения в лабораторных условиях проведены испытания системы технического зрения по оценке времени детектирования QR-кода, определения точности измерения геометрического положения и ориентации QR-кода в зависимости от его размера, положения в пространстве, расстояния от схвата манипулятора до объекта, а также от степени освещенности рабочей сцены.

Экспериментальная программа проводилась с использованием видеокамеры оптического диапазона, установленной на манипуляторе таким образом, чтобы ее оптическая ось совпадала с осью вращения схвата. В качестве объектов манипулирования были выбраны прямоугольные геометрические фигуры нескольких типоразмеров с нанесенным на них QR-кодом. На рисунке 12 представлена схема эксперимента по определению дистанции гарантированного «захвата» QR-кода системой технического зрения с последующим наведением схвата на объект.

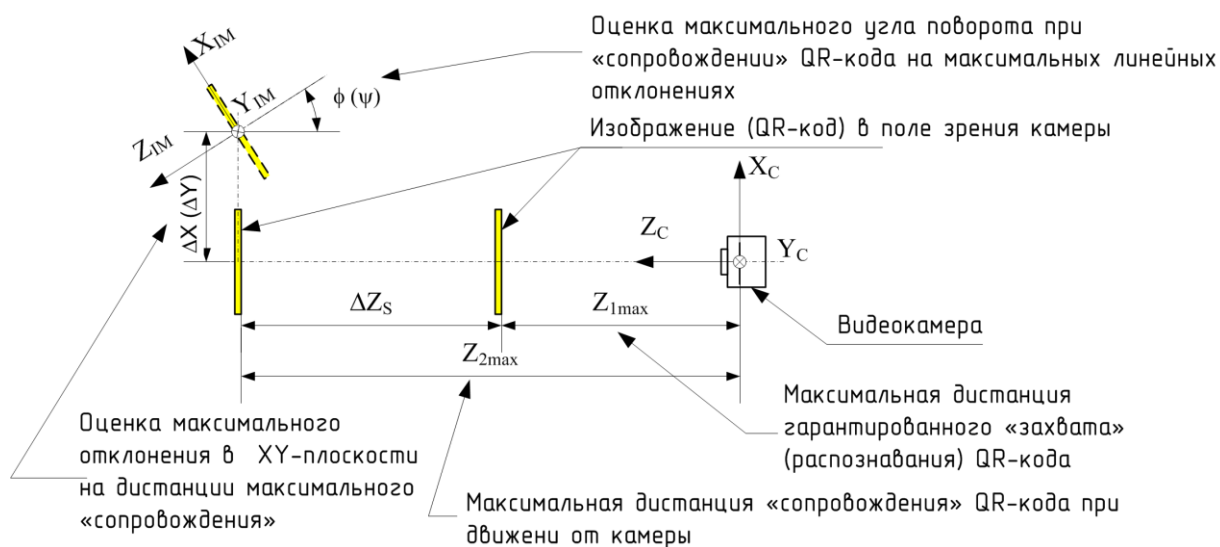


Рисунок 12 – Схема эксперимента по оценке дистанции гарантированного «захвата» и «сопровождения»

Полученные результаты исследований представлены в виде таблиц с числовыми значениями времени «захвата» (времени идентификации QR-кода и определения его положения и ориентации), дистанции и угла поворота объекта с нанесенным QR-кодом. Применение СТЗ в условиях реального производства позволит существенно сократить время транспортных операций внутри герметичной камеры при обеспечении заданной точности позиционирования. При выборе типа видеокамеры необходимо принимать во внимание, что радиационно-стойкие технические средства СТЗ имеют достаточно высокую стоимость и ограниченный ресурс работы.

В процессе экспериментальных исследований созданной системы управления получены результаты, подтверждающие правильность предложений и выводов теоретической части диссертации, в том числе:

- подтверждена работоспособность объекта управления (манипулятора) в заданных условиях эксплуатации с обеспечением требуемой точности, быстродействия, грузоподъемности и повторяемости траекторий движения всеми звеньями манипулятора;
- подтверждена ремонтпригодность, и обеспечена защита манипулятора от столкновений с другими объектами внутри камеры;
- система управления и ее отдельные подсистемы обеспечили выполнение манипулятором полного перечня необходимых операций с оператором и без оператора в контуре управления;

- подтвержден вывод о необходимости предварительного тренажерного обучения операторов и использовании системы технического зрения в процессе работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертационной работе содержится решение научной задачи синтеза системы управления радиационно-стойкими манипуляторами, функционирующими в условиях сильных радиационных полей и ограниченного рабочего пространства (герметичной камеры). В ходе диссертационного исследования получены следующие результаты:

1. Разработаны структура комбинированной системы управления манипулятором и ее программная архитектура, предложен способ комбинированного адаптивного управления б-степенными манипуляторами с кинематическими парами вращательного типа от задающих органов типа «многокоординатный джойстик» и наличием дискретных каналов управления. Комбинированный способ управления позволяет оператору выполнять управление скоростью движения и положением схвата манипулятора в системе координат (далее – СК), связанной со схватом, и в базовой СК, осуществляя при этом переназначение осей задающего органа в зависимости от ориентации СК схвата.
2. Предложен алгоритм формирования управляющих воздействий на приводы манипулятора в автоматизированном режиме, отличающийся тем, что в уравнение вычисления управляющих воздействий введены матрицы оценки приближения манипулятора к граничным условиям и адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающих органов, позволяющий исключить ударные механические воздействия на манипулятор при некорректных и/или несвоевременных действиях оператора при приближении манипулятора к препятствиям и предельным угловым положениям в его кинематических парах, а также в зонах, близких к вырожденным конфигурациям.
3. Предложен алгоритм автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора на основе информации, поступающей от системы оптического детектирования объектов, идентифицированных двумерным QR-кодом.
4. Предложена архитектура системы тренажерного обучения и регистрации действий операторов манипуляторов данного класса, позволяющая выполнять эффективное обучение операторов в режиме «Инструктор»–«Оператор» и «ЭВМ»–«Оператор», регистрацию и долговременное хранение векторов состояния манипулятора, системы управления и задающих органов, осуществлять статистический анализ данных и последующие этапы машинного обучения.
5. Разработан и изготовлен опытный образец радиационно-стойкого внутрикамерного манипулятора МР-48 с системой управления. Введенный в опытную эксплуатацию манипулятор реализован с использованием предложенных в работе научных и технических решений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравненных к ним:

1. Носиков, М.В. Архитектура тренажерной системы подготовки операторов радиационно-стойких манипуляторов. / М.В. Носиков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 38–53. DOI: 10.14529/ctcr190204.
2. Носиков, М.В. Система управления роботом-манипулятором с использованием нейросетевых алгоритмов ограничения рабочей области схвата. / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, Б.А. Морозов, М.В. Носиков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 29–36. DOI: 10.14529/ctcr170404.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования:

3. Nosikov, M.V. Architecture of Human-controlled Arm Manipulator Operator Training System / M.V. Nosikov // Proceedings of the Global Smart Industry Conference (GloSIC). – Chelyabinsk, 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570118.
4. Nosikov, M.V. Automatic and Manual Control Algorithms of Radiation-Proof Manipulators / I.V. Voinov, M.V. Nosikov // Proceedings of the Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 2018. pp. 1 – 6, DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570161.
5. Nosikov, M.V. Robot-Manipulator MR-48 for Nuclear Industry / I.V. Voinov, A.M. Kazantsev, M.V. Nosikov // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, 2018, pp. 1 – 6, DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8729125.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

6. Манипулятор МР-48 для атомной промышленности // Патент России №172431 U1, 07.07.2017. Бюл. № 19. / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, И.Ф. Круглов, Б.А. Морозов, М.В. Носиков.
7. Свидетельство 2019617582 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа для визуализации состояния и управления 6-степенным манипулятором с ангулярной системой координат / М.В. Носиков; Правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). – №2019616219; заявл. 29.05.19; опубл. 17.06.19, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
8. Свидетельство 2019663357 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа для регистрации действий операторского и инструкторского персонала тренажерной системы радиационно-стойких манипуляторов / М.В. Носиков; Правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). – №2019663357; заявл. 01.10.19; опубл. 15.10.19, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
9. Свидетельство 2020614430 Российская Федерация. Свидетельство о

государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа настройки и визуализации параметров задающих органов человеко-машинного интерфейса для управления радиационно-стойкими робототехническими комплексами в среде ROS / М.В. Носиков; Правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). – № 2020614430; заявл. 20.03.20; опубл. 08.04.20, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Другие статьи и материалы конференций:

10. Носиков, М.В. Архитектура и алгоритмы функционирования системы технического зрения радиационно-стойких манипуляторов / М.В. Носиков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 7. С. 11 – 24, DOI: 10.18698/0536-1044-2019-7-11-24.
11. Носиков, М.В. Использование двумерных матричных кодов для задач идентификации и наведения РТК на объекты / М.В. Носиков // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 71-й научной конференции ЮУрГУ. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. - С. 593-601.
12. Носиков, М.В. Синтез системы управления радиационно-стойким манипулятором МР-48 для защищенных камер / М.В. Носиков // Экстремальная робототехника (Proceedings of the International scientific and technological conference Extreme Robotics): труды 30-й Международной научно-технической конференции. – СПб.: ООО «Издательско-полиграфический комплекс «Гангут», 2019. – С. 425–440.
13. Войнов, И.В. Робот-манипулятор МР-48 для атомной промышленности / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, М.В. Носиков // Пром-Инжиниринг: труды IV Международной научно-технической конференции (Москва – Челябинск – Новочеркасск, 15–18 мая 2018 г.). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018 – С. 270–275.
14. Радиационно-стойкие манипуляторы и методы расширения их функциональных возможностей / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, Б.А. Морозов, М.В. Носиков // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции: труды 29-й Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 07–08 июня 2018 г.). – СПб.: ООО «Политехника Сервис», 2018. – С. 114–125.
15. Казанцев, А.М. Алгоритмическое обеспечение зон безопасности манипулятора МР-48 [Электронный ресурс] / А.М. Казанцев, М.В. Носиков // Наука ЮУрГУ: материалы 69-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 478–485.