

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Носиков Максим Владимирович

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИКАМЕРНЫМИ
РАДИАЦИОННО-СТОЙКИМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Войнов Игорь Вячеславович

Челябинск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Анализ современного состояния автоматизации технологических процессов в герметичных камерах и направлений их совершенствования	12
1.1 Типовые операции перемещения объектов манипулирования. Условия эксплуатации. Характеристики используемых манипуляторов	13
1.2 Кинематические схемы n-степенных манипуляторов. Режимы и задачи управления	16
1.3 Архитектура и режимы работы систем управления манипуляторами	20
1.4 Задающие органы манипуляторов	26
1.5 Программная архитектура систем управления манипуляторами	30
1.6 Системы технического зрения для внутрикамерных манипуляторов	34
1.7 Тренажерные системы в структуре систем управления манипуляторами	37
Выводы к главе 1	40
Глава 2. Синтез структуры и алгоритмов функционирования систем управления внутрикамерными радиационно-стойкими манипуляторами	41
2.1 Исполнительный орган манипулятора как объект управления	43
2.2 Синтез структуры комбинированной системы управления манипуляторами	51
2.3 Математический аппарат и алгоритмы управления 6-степенным исполнительным органом манипулятора	65
2.4 Синтез программной архитектуры систем управления	79
2.5 Синтез системы задающих органов человеко-машинного интерфейса	97
2.6 Синтез алгоритмов автоматизированного позиционирования схвата манипулятора с применением системы технического зрения	114
2.7 Синтез системы тренажерного обучения и анализа данных	129
Выводы к главе 2	139
Глава 3. Создание и экспериментальные исследования системы управления радиационно-стойким манипулятором для герметичных камер	140
3.1 Конструктивное исполнение и результаты лабораторно-отрабочных испытаний манипулятора	143

3.2 Реализация программной архитектуры и подсистемы визуализации информации	160
3.3 Экспериментальная программа оценки применимости системы технического зрения	164
3.4 Экспериментальные результаты оценки эффективности подсистемы тренажерного обучения	170
3.5 Результаты испытаний и опытной эксплуатации исполнительного органа и системы управления в условиях действующего производства	174
Выводы к главе 3	175
Основные выводы и результаты	177
Список сокращений и условных обозначений	179
Список литературы	181
Приложение А. Акт внедрения результатов кандидатской диссертационной работы (ООО «Научно-производственная компания «Калибр»)	190
Приложение Б. Акт о результатах испытания роботизированного манипулятора (ФГУП «Производственное объединение «Маяк»)	192
Приложение В. Акт об использовании в учебном процессе материалов и результатов диссертационного исследования	194
Приложение Г. Патент РФ на полезную модель «Манипулятор МР-48 для атомной промышленности»	196
Приложение Д. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ	197

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние производства промышленной продукции во многих странах характеризуется все более высокими темпами автоматизации различных технологических процессов, созданием и внедрением новых видов оборудования, робототехники и систем управления. На предприятиях отечественной промышленности используется технологическое оборудование, роботы, манипуляторы, АСУТП и АСТПП как отечественного, так и зарубежного производства. Наибольшее распространение в машиностроительной отрасли получили сборочные, сварочные и покрасочные роботы, которые заменили человека на трудоемких монотонных операциях и позволили исключить человеческий фактор при проведении соответствующих работ.

В отличие от машиностроения, где оборудование эксплуатируется в нормальных условиях окружающей среды, т.е. внутри зданий и сооружений, существуют отрасли, в которых присутствие человека при производстве работ в определенных зонах невозможно либо нежелательно из-за вредных факторов окружающей среды. К таким экстремальным средам можно отнести глубоководную, космическую, химически активную и взрывоопасную среды, а также среду с высоким уровнем радиоактивного ионизирующего излучения. В этих условиях использование робототехники направлено на сохранение жизни и здоровья человека.

Создание новых образцов робототехники базируется на современных достижениях в научной и технической сферах. Ведущими предприятиями, организациями и вузами России проводятся исследования и разрабатываются новые технологические процессы, оборудование и средства автоматизации, в системах управления которыми реализуются последние достижения в области IT-технологий.

Вопросам автоматизации производств на основе робототехнических комплексов, промышленных роботов и манипуляционной вспомогательной оснастки посвятили свои работы известные российские ученые Белянин П.И., Воробьев Е.И., Елисеев С.В., Емельянов С.В., Ющенко А.С. [12], Кобринский А.Е. [18], Юревич Е.И. [17, 59], Козловский В.А., Козырев Ю.Г., Корендясев А.И. [21, 22], Степаненко Ю.А., Кулешов В.С., Лакота Н.А.[25], Макаров И.М., Петров Б.А., Батюков А.И., Дольников Ю.А., Семенов Е.И., Бор-Раменский А.Е.[3], Логунов М.М. [28], Дольников Ю.И. и др., а также зарубежные ученые Корк П., Гонсалес Р., Накано Э., Пол Р., Стокич Д., Фу К. и др. Комплексные вопросы

проектирования, испытаний, эксплуатации манипуляторов и систем управления для работы в экстремальных средах (в том числе в радиационных полях) отражены в работах Войнова И.В., Морозова Б.А. [29, 38, 92]

В атомной промышленности РФ к началу XXI века сложилась следующая ситуация [51]:

- «были остановлены, но не выведены из эксплуатации более 175 ядерно- и радиационно- опасных объектов, подведомственных различным федеральным органам исполнительной власти, включая Федеральное агентство по атомной энергии (четыре блока атомных электростанций, 10 промышленных уранграфитовых реакторов и свыше 110 ядерно- и радиационно-опасных объектов иного назначения);

- накоплено свыше 18,5 тыс. тонн отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Показатели заполнения хранилищ отработавшего топлива на АЭС с реакторами типа РБМК и ЭГП-6, пристанционных хранилищ РАО были близки к критическим отметкам;

- не были реализованы в полной мере некоторые требования ратифицированных Россией международных актов в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности;

- эксплуатируемые по 50-60 лет инженерные системы ряда ядерно- и радиационно-опасных объектов требовали экстренной реконструкции и модернизации.

Для комплексного решения накопившихся проблем в соответствии с поручением Президента Российской Федерации от 16 марта 2006 года была разработана федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» (ФЦП ЯРБ-1) [52]. К концу 2015 года все установленные целевые индикаторы и показатели ФЦП ЯРБ-1 были выполнены. Для формирования и дальнейшей реализации перечня мер по обеспечению ядерной и радиационной безопасности в Российской Федерации принята федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности в Российской Федерации на 2016-2020 годы и на период до 2030 года».

Обе программы предусматривают пять направлений деятельности:

1. Создание основных объектов инфраструктуры по обращению с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами.
2. Практическое решение проблем, связанных с предшествующей деятельностью (ядерное наследие).

3. Создание и совершенствование систем обеспечения и контроля ядерной и радиационной безопасности в условиях нормальной эксплуатации и аварий.
4. Повышение защищенности персонала, населения и окружающей среды от радиационного воздействия.
5. Научное, информационно-аналитическое и организационное обеспечение деятельности в области ядерной и радиационной безопасности.

Настоящая диссертационная работа соответствует вышеперечисленным направлениям деятельности (направления 3-5) и посвящена решению конкретной научно-технической задачи – исследованию систем управления многостепенными радиационно-стойкими манипуляторами, работающими в условиях герметичных камер аналитических лабораторий.

Актуальность работы. На предприятиях атомной промышленности проводится целый комплекс работ, связанных с переработкой различных радиоактивных материалов. Специфической особенностью данного процесса является необходимость защиты персонала предприятий и окружающей среды от воздействия ионизирующего излучения. Международным агентством по атомной энергии введены жесткие нормы радиационной безопасности (в России – НРБ-99/2009 и ряд отраслевых стандартов), регламентирующие максимально допустимые дозы излучений для обслуживающего персонала. Обеспечение этих норм включает в себя как организационные, так и технические мероприятия. Характерным примером таких мероприятий является использование боксов и герметичных («горячих») камер, внутри которых проводятся работы с радиоактивными материалами, а персонал располагается снаружи, защищенный стенками камер от ионизирующего излучения. При этом операции внутри камеры осуществляются с использованием манипуляторов, управляемых оператором. Широкое распространение на предприятиях, входящих в структуру Госкорпорации «Росатом», получили электромеханические манипуляторы МЭМ-10, разработанные в 70-х годах прошлого века. Моральное и физическое старение названных манипуляторов делает актуальной задачу создания внутрикамерных роботов-манипуляторов, оснащенных системами управления и обучения персонала, на основе современных достижений науки и техники.

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.
2. Анализ технических требований к конфигурации и конструкции манипуляторов, системам управления и человеко-машинным интерфейсам.
3. Выбор кинематической схемы манипулятора. Синтез аппаратной и программной структуры комбинированной системы управления, разработка алгоритмов автоматизированного и автоматического режимов управления с использованием задающих органов или управляющих программ.
4. Повышение эффективности управления манипулятором путем введения системы технического зрения как части системы управления.
5. Разработка методики, структуры и алгоритмов системы тренажерного обучения операторов. Создание моделирующего комплекса.
6. Натурные испытания изготовленного образца робота-манипулятора МР-48 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 параметрами 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. Разработано соответствующее программное обеспечение.
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 вектора состояния манипулятора к граничным условиям и адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающего органа, что позволяет исключить ударные механические воздействия на манипулятор при некорректных и/или несвоевременных действиях оператора в зоне кинематических ограничений.
4. Обоснована целесообразность применения системы технического зрения (оптического детектирования объектов манипулирования, идентифицированных двумерным QR-кодом), позволяющая оператору осуществить выбор объекта и автоматическое подведение к нему рабочего органа (как правило, схвата манипулятора), что минимизирует время выполнения технологических операций. Разработан алгоритм автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора.
5. Разработана архитектура и алгоритмы подсистемы тренажерного обучения и регистрации действий операторов, позволяющие обеспечить качественную подготовку персонала к работе с новыми модификациями роботов-манипуляторов, отличающимися конструкцией исполнительного органа (в частности, герметичностью подвижных сочленений и наличием вычислительного устройства, обрабатывающего управляющие команды от двух джойстиков и сигналы от датчиков углов и угловых скоростей, установленных на манипуляторе).

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке (синтезе) комбинированной системы управления классом многостепенных радиационно-стойких манипуляторов, работающих в герметичных камерах и управляемых в автоматическом режиме либо оператором посредством задающих органов типа «джойстик», 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 к проектированию, изготовлению и внедрению 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 свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ.

Теоретическую и методологическую основу исследований 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 конструкторской документации опытного образца 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) использованы ООО НПК «Калибр» при разработке опытного образца радиационно-стойкого манипулятора «МР-48» по заказу ФГУП ПО «Маяк» (госкорпорация «РосАтом»), на котором проведены испытания данного образца при непосредственном участии автора. 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 адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающих органов, позволяющий исключить ударные механические воздействия на манипулятор при некорректных и/или несвоевременных действиях оператора при приближении манипулятора к кинематическим ограничениям.
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».
6. Результаты экспериментальных исследований спроектированного робота-манипулятора МР-48 в лабораторных условиях и в условиях реального производства.

Достоверность результатов определяется корректным использованием современных методик исследований, результатами математического и натурного моделирования, успешной экспериментальной апробацией моделей, способов и алгоритмов управления радиационно-стойкими манипуляторами. Достоверность положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами внедрения.

Апробация результатов диссертации

Основные положения, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника – 2019» (ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург, 2019), «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-ой, 69-ой, 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 работы

Диссертация содержит введение, три главы, основные выводы и результаты, список использованной литературы, содержащий 107 наименований, 5 приложений. Диссертация изложена на 199 страницах и содержит 74 рисунка и 30 таблиц.

ГЛАВА 1.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕРМЕТИЧНЫХ КАМЕРАХ И НАПРАВЛЕНИЙ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

В производственном цикле изготовления продукции на предприятиях атомной промышленности важную роль играет текущий контроль качества реализуемых технологических процессов. Контроль производится на различных стадиях и этапах путем взятия проб перерабатываемых радиоактивных материалов и последующего их исследования в аналитических лабораториях. В зависимости от типа техпроцесса пробы могут быть в жидкой, сыпучей или твердой форме, перемещение проб из основного производства в лабораторию производится в специальной технологической таре по защищенным транспортным путям (в частности, по пневмопочте).

На рисунке 1.1 представлена типовая схема аналитической лаборатории, в которой установлена линейка герметичных («горячих») камер, связанных между собой межкамерной транспортной системой с тележкой, перемещающейся по транспортному коридору с установленной на ней технологической тарой. Со стороны транспортного коридора каждая камера имеет приемную зону, через которую технологическая тара с пробой вещества подается в соответствующую камеру.

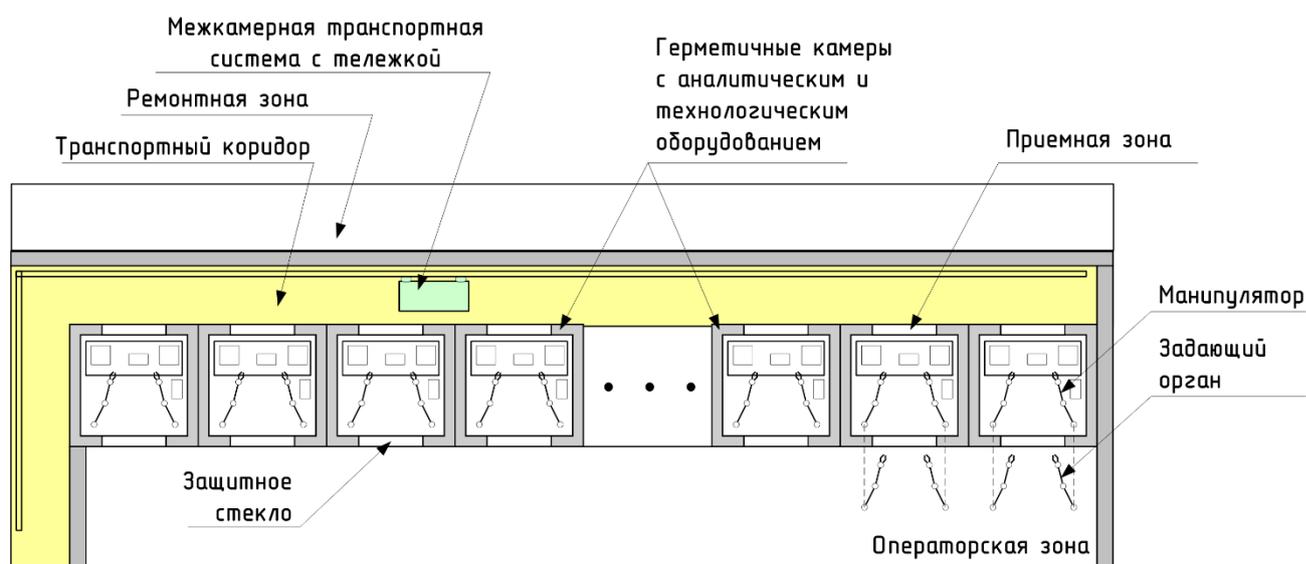


Рисунок 1.1 Планировка аналитической лаборатории

Противоположные стенки камер выполнены из толстого стекла, через которые оператор осуществляет визуальный контроль за ходом работы (рисунок. 1.2). Внутри каждой камеры размещено необходимое технологическое и аналитическое оборудование, а также

средства измерения, необходимые для проведения спектрального анализа, радиохимических исследований полученных образцов и т.д.

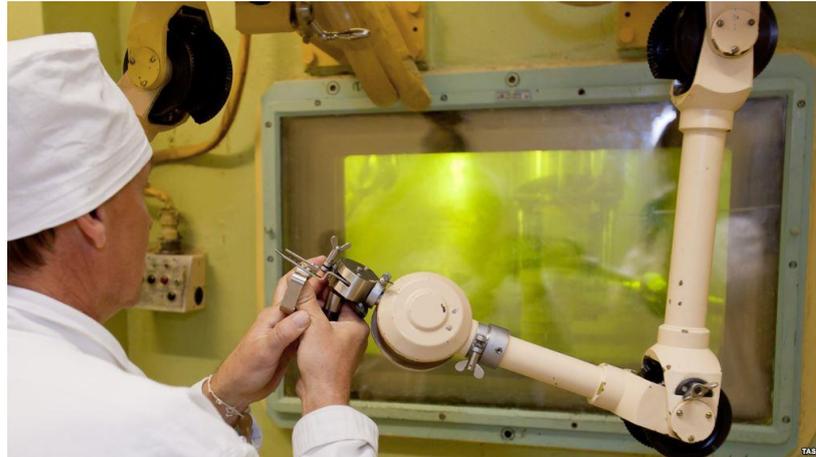


Рисунок 1.2 Оператор в процессе работы у герметичной камеры

Для перемещения технологической тары из приемного устройства в рабочую зону камеры (и обратно) используются многостепенные манипуляторы (как правило, не более двух в каждой камере). Управление манипуляторами осуществляет человек-оператор посредством кинематически подобного задающего органа. Стенки камер обеспечивают необходимую степень защиты персонала от воздействия ионизирующего излучения и других вредных факторов. Ремонт внутрикамерного оборудования производится в ремонтной зоне (рисунок 1.1) после проведения соответствующих процедур дезактивации.

1.1. Типовые операции перемещения объектов манипулирования.

Условия эксплуатации. Характеристики используемых манипуляторов

Объектами манипулирования в герметичной камере являются специальные технологические тары с пробами радиоактивных материалов, а также другие типы тары, в которых находятся кислотные или щелочные растворы, используемые при анализе качества проб. Возможно также применение определенных инструментов в процессе работы. Перечень типовых транспортных операций, которые должен выполнять манипулятор, приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Типы транспортных внутрикамерных операций

№	Тип/наименование операции
1	Взятие, удержание в течение требуемого времени, освобождение объекта манипулирования
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	Открытие/закрытие технологической тары
6	Перенос объекта и его фиксация в зоне измерения
7	Взятие, замена (отпускание + взятие) требуемого инструмента

Условия эксплуатации внутрикамерного оборудования, в том числе манипуляторов, характеризуются, в первую очередь, высоким уровнем ионизирующих излучений, что накладывает очень жесткие ограничения как на конструкцию исполнительного органа, так и на систему управления манипулятором. Анализ этих условий (таблица 1.2) позволяет сделать вывод о практической невозможности размещения полупроводниковых и оптических элементов систем управления непосредственно в камере. В свою очередь, наличие частиц радиоактивной пыли накладывает требования на конструкцию исполнительного органа (с целью исключения попадания этих частиц в подвижные сочленения манипулятора, что приводит к их износу и образованию люфтов).

Таблица 1.2 Условия эксплуатации внутрикамерного оборудования

№	Условия эксплуатации (окружающей среды)	Характеристики воздействующих факторов	Значения
1	Гамма-излучение	Максимальная мощность экспозиционной дозы с энергией от 0,1 до 3 Мэв, [Гр/ч],	до 10
2	Нейтронное излучение	Флюенс нейтронов при плотности потока 10^2 н/см ² со средней энергией 0,1 Мэв, [н/см ²]	до 10^8
3	Бета-излучение	Плотность потока бета-частиц, [1/мин см ²] Флюенс бета-частиц, [1/см ²]	1-10000 10-10000
4	Частицы пыли	Имеются в наличии	

Для решения поставленных задач в 60-70-е годы XX века была разработана и внедрена в эксплуатацию линейка отечественных механических манипуляторов копирующего типа (М-22, М-55, МЭМ-10 и др.) [12, 21, 22].

К достоинствам манипуляторов данного типа можно отнести однозначное соответствие кинематической конфигурации задающего и исполнительного органов. При этом оператор, перемещая задающий орган, формирует и визуально отслеживает необходимую траекторию движения исполнительного органа.

На рисунке 1.3 представлена принятая в настоящее время схема работы с радиоактивными материалами с использованием электромеханического манипулятора МЭМ-10 с кинематически подобным задающим органом, системой управления типа «сельсин-датчик»-«сельсин-приемник» и оператором в контуре управления.

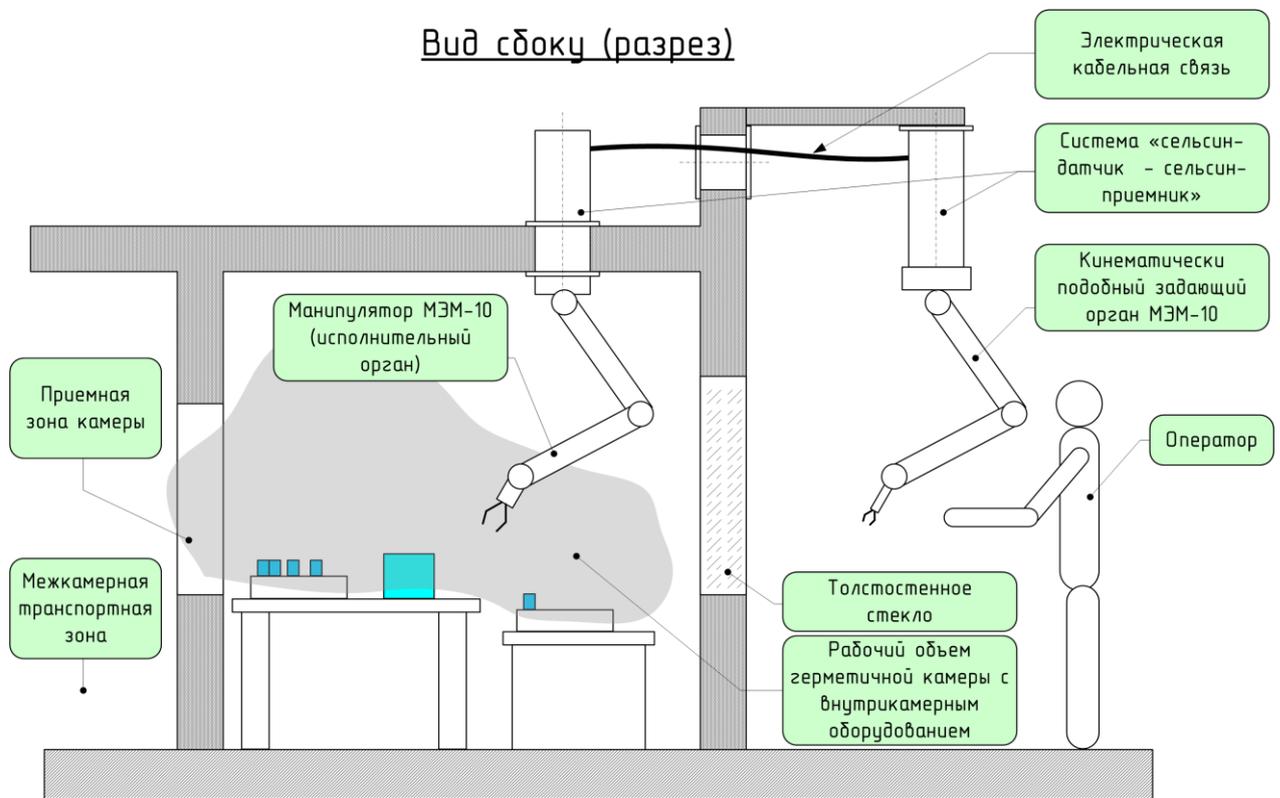


Рисунок 1.3 Электромеханический манипулятор МЭМ-10 в герметичной камере

Крепление исполнительного органа копирующего манипулятора, как правило, производится к верхней крышке герметичной камеры, а система управления вынесена за пределы камеры, что исключает воздействие ионизирующего излучения на элементы системы. При этом механическая связь «сельсина-приемника» с подвижными сочленениями манипулятора и задающего органа осуществляется посредством длинных полых валов и конических зубчатых передач (рисунок 1.4), что достаточно трудоемко при их изготовлении, регулировке, а также при ремонте (замене) в процессе эксплуатации.



Рисунок 1.4 Механические передачи исполнительного органа МЭМ-10

К недостаткам манипуляторов копирующего типа относятся:

- ограниченная точность позиционирования схвата манипулятора в заданной точке, что обусловлено наличием люфтов в его кинематических парах;
- 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;
- отсутствие автоматического режима запоминания и воспроизведения заданной траектории движения схвата.

1.2. Кинематические схемы n-степенных манипуляторов. Режимы и задачи управления

Рассмотренные в разделе 1.1. примеры практической реализации манипуляторов копирующего типа, с учетом заданных условий эксплуатации, показывают, что для выполнения типовых операций с объектами манипулирования структура открытой кинематической цепи манипулятора должна обеспечивать требуемое позиционирование и ориентацию объекта в пространстве. Во всех приведенных примерах данное требование удовлетворяется путем построения кинематической цепи с 6 степенями (подвижности) и дополнительной степенью подвижности схвата (сжатие-разжатие). При этом выбор кинематических пар вращательного типа (как правило, V класса) является более предпочтительным, чем пар поступательного типа, поскольку в первом случае возможно реализовать

более надежную в части герметичности конструкцию подвижных сочленений и практически исключить попадание различных частиц внутрь корпуса манипулятора. На рисунке 1.5 приведена кинематическая структура 6-степенного манипулятора с кинематическими парами вращательного типа.

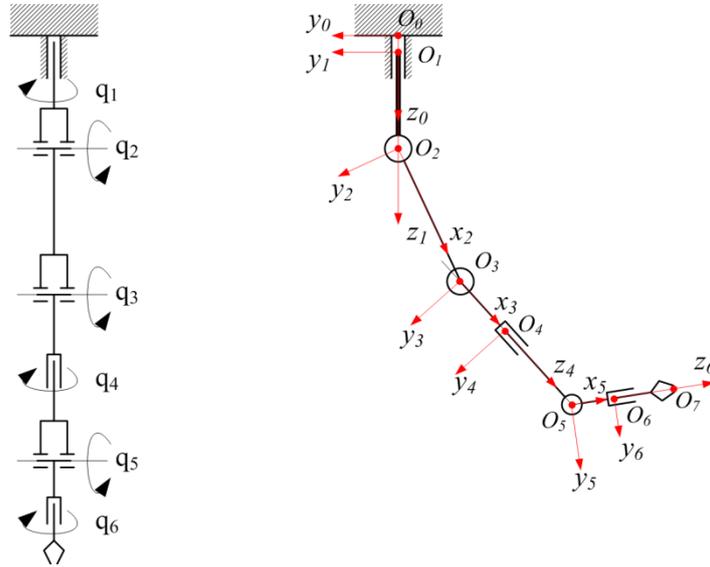


Рисунок 1.5 Кинематическая структура 6-степенного манипулятора

- q_1, \dots, q_6 – обобщенные (в данном случае вращательные) координаты манипулятора;
- $O_0 x_0 y_0 z_0$ – базовая (связанная с основанием манипулятора) система координат (СК);
- $O_i x_i y_i z_i$ – система координат, связанная со звеном i ($i = 1 \dots 6$) манипулятора;
- O_7 – конечная точка захватного приспособления (схвата) или инструмента.

Одной из задач системы управления манипулятором является позиционирование и ориентирование схвата или рабочего инструмента, закрепленного в схвате, в заданную точку трехмерного пространства (рисунок 1.6). При этом решается ряд подзадач: планирования и исполнения траектории движения, вычисления прямой задачи кинематики (ПЗК, т.е. вычисление положения и ориентации схвата в декартовой системе координат по вектору обобщенных координат \mathbf{q}), решения обратной задачи кинематики (требуемых значений компонент вектора обобщенных координат по заданному положению и ориентации схвата).

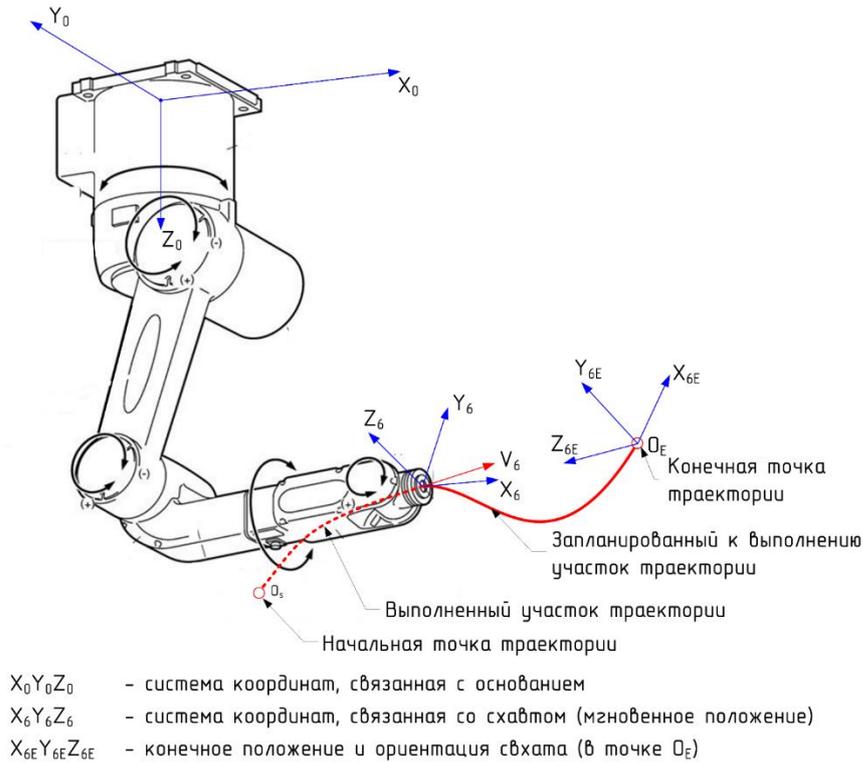


Рисунок 1.6 Траектория движения схвата (полюса) манипулятора

Положение и ориентация прямоугольной декартовой системы координат $O_i x_i y_i z_i$ относительно аналогичной системы координат $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$ однозначно описывается (определяется) матрицей однородных преобразований T :

$$T_i^{i-1} = \begin{pmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_i^{i-1} & s_i^{i-1} & a_i^{i-1} & p_i^{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & s_{1 \times 1} \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

где:

- $n_i^{i-1}, s_i^{i-1}, a_i^{i-1}$ – векторы, выражающие направления осей x_i, y_i, z_i относительно системы координат $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$;
- $R_{3 \times 3}$ – матрица вращения (поворота) системы координат $O_i x_i y_i z_i$ относительно системы координат $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$;
- $P_{3 \times 1} \in \mathbb{R}^3$ – вектор линейного смещения начала отсчета системы $O_i x_i y_i z_i$ относительно начала отсчета системы $O_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$;
- $f_{1 \times 3}$ – матрица преобразования перспективы, используемая в задачах машинного (технического) зрения и при калибровке изображений (в рассматриваемом частном случае все ее элементы равны нулю);
- $s_{1 \times 1}$ – коэффициент масштабирования (равен 1 при отсутствии изменения масштаба).

Итоговую матрицу T_n^0 , связывающую систему координат схвата и базовую систему координат, получают последовательным перемножением справа матриц T_i^{i-1}

$$T_n^0 = T_1^0(q_1)T_2^1(q_2)\dots T_n^{n-1}(q_n), \quad (1.2)$$

где:

- n – число степеней подвижности манипулятора;
- q_1, q_2, \dots, q_n – обобщенные координаты по соответствующим степеням подвижности.

Элементы матрицы T_n^0 и ее структура аналогична матрице однородных преобразований в общем виде. Компоненты вектора $P_{3 \times 1}$ матрицы T_n^0 однозначно определяют положение схвата манипулятора в базовой системе координат, а матрица $R_{3 \times 3}$ - его ориентацию. Известно [12, 25, 84], что 9 элементов матрицы поворота избыточным образом описывают взаимную ориентацию двух систем координат. Для восстановления углов ориентации СК схвата относительно базовой или иной СК может быть применен ряд известных методов [17, 21, 84].

Вычисление требуемой угловой скорости в кинематических парах требуется в случае управления манипулятором в скоростном режиме. В этом случае в состав системы управления входит контур стабилизации требуемой угловой скорости, осуществляющий формирование управляющих воздействий, минимизирующих отклонение фактической угловой скорости от требуемого значения с учетом силовых и моментных статических и динамических характеристик исполнительных приводов, массо-инерционных характеристик манипулятора и полезной нагрузки.

Как и в случае ПЗК и ОЗК по положению, для вычисления линейных скоростей движения звеньев манипулятора и его схвата в декартовой системе координат применяются следующие матричные выражения:

$$\chi(t) = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}(t), \quad (1.3)$$

где:

- $\chi(t) \in \mathbb{R}^6$ – агрегированный вектор линейных и угловых скоростей схвата (системы координат n), имеющий вид

$$\chi = \begin{bmatrix} v_n^0(t) \\ \omega_n^0(t) \end{bmatrix}; \quad (1.4)$$

- $v_n^0(t) \in \mathbb{R}^3$ – вектор линейной скорости поступательного движения системы координат n относительно базовой системы координат;

$\omega_n^0(t) \in \mathbb{R}^3$ – вектор угловой скорости вращательного движения системы координат n относительно базовой системы координат;

$\dot{\mathbf{q}}(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор скорости изменения обобщенных координат манипулятора;

\mathbf{J} – матрица Якоби, имеющая вид

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_v(q(t)) \\ \mathbf{J}_\omega(q(t)) \end{bmatrix}; \quad (1.5)$$

$\mathbf{J}_v(\cdot)$ – линейная компонента матрицы Якоби;

$\mathbf{J}_\omega(\cdot)$ – угловая компонента матрицы Якоби.

Решение обратной задачи кинематики по скорости для манипуляторов с количеством звеньев $n=6$ при условии, что матрица Якоби невырожденная, может быть получено умножением вектора $\chi(t)$ на обратную матрицу слева:

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}(t)) \chi(t). \quad (1.6)$$

Матрица Якоби связывает скорости обобщенных координат и схвата, при этом она зависит от кинематической конфигурации манипулятора, меняющейся во время движения. Возможны ситуации, когда матрица Якоби для определенных кинематических конфигураций вырождается, т.е. теряет ранг. Данные конфигурации возможны как на границах зон досягаемости, так и в некоторых зонах рабочей области. В сингулярных (вырожденных) конфигурациях ограниченные значения скорости, силы, вращающего момента схвата могут соответствовать неограниченным значениям обобщенных скоростей и моментов, что приводит к ударным нагрузкам на элементы манипулятора. В связи с этим, одной из актуальных задач системы управления является контроль приближения манипулятора к сингулярным зонам и коррекция соответствующих уставок по скоростям движения.

1.3 Архитектура и режимы работы систем управления манипуляторами

Управление манипуляторами основывается на базовых принципах построения систем управления, на свойствах системы и объекта управления быть наблюдаемыми и управляемыми, при этом система управления должна обеспечивать устойчивость и осуществлять управление объектом оптимальным образом по заданным критериям.

В общем виде структурная схема системы управления (СУ) представлена на рисунке 1.7.

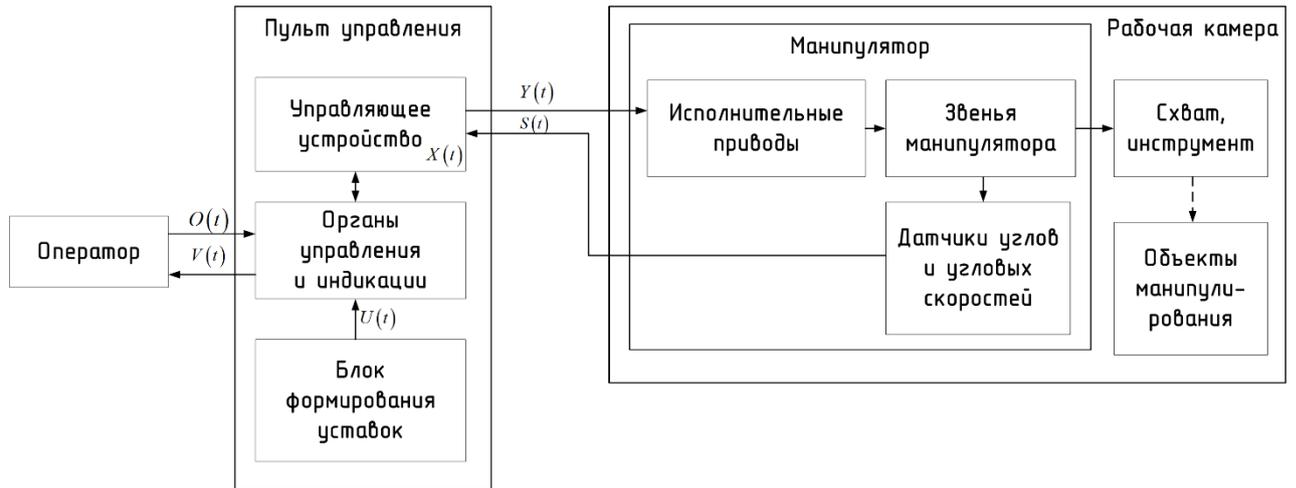


Рисунок 1.7 Общий вид системы управления манипулятором

На рисунке 1.7 введены обозначения:

- $X(t)$ – вектор состояния системы управления;
- $Y(t)$ – вектор выходных управляющих воздействий на исполнительные органы манипулятора;
- $S(t)$ – вектор состояния манипулятора, измеренный набором датчиков;
- $U(t)$ – вектор управляющих воздействий от блока автоматически формируемых уставок движения РТК;
- $V(t)$ – вектор выходной информации от системы управления, предоставляемой оператору техническими средствами СУ;
- $O(t)$ – вектор управляющих воздействий оператора, формируемый посредством задающих органов.

Задача управления манипулятором с n степенями подвижности в автоматизированном (с человеком в контуре управления) и автоматическом режимах для выполнения рабочих операций сводится к формированию исполнительным приводам манипулятора управляющих воздействий $Y(t)$ таким образом, чтобы реализовывалась требуемая траектория схвата, формируемая кинематической конфигурацией манипулятора (его обобщенными координатами $\mathbf{q}(t) = \{q_1(t), \dots, q_n(t)\}$), при этом обеспечивались заданные значения целевых функций

$$G = f(Z), T = f(Z, t), \quad (1.7)$$

где:

$Z = \{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_k, y_k, z_k)\}$ – множество координат узловых точек траектории J манипулятора;

$$G = \sqrt{(x_k - x_q)^2 + (y_k - y_q)^2 + (z_k - z_q)^2} \quad \text{– функция ошибки позиционирования схвата манипулятора;}$$

$$T = f(Z, t) \quad \text{– функция времени выполнения траектории } J;$$

$$(x_q, y_q, z_q) \quad \text{– координаты цели.}$$

Формальную постановку задачи управления можно представить в виде зависимости:

$$Y(t) = \Phi(M(t)) \cdot \begin{pmatrix} O(t) \\ U(t) \\ S(t) \\ X(t) \end{pmatrix}, \quad (1.8)$$

где

$\Phi(M(t))$ – функция от режима управления M .

Манипулятор как объект управления представляет собой совокупность исполнительных приводов, звеньев кинематической цепи, захватного устройства, датчиков собственных параметров (положения, скорости, усилия) (рисунок 1.8). Часть собственных параметров манипулятора не может быть измерена прямым образом и должна учитываться в модели системы и объекта, либо измеряться и корректироваться внешними по отношению к СУ измерениями. Речь, например, может идти о конструкционных деформациях, связанных с ограниченной жесткостью звеньев манипулятора, зависящих от величины полезной нагрузки, кинематической конфигурации манипулятора и т.д.

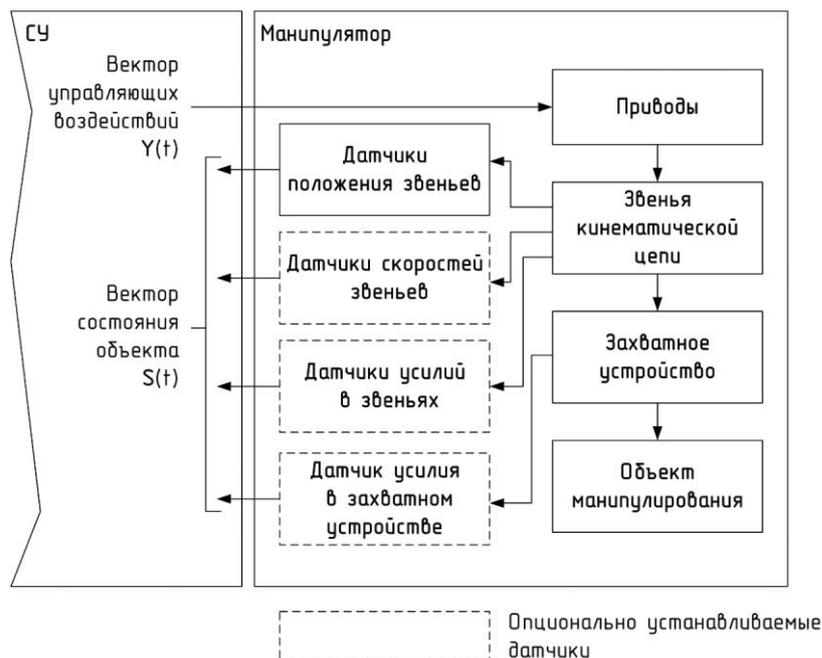


Рисунок 1.8 Структура манипулятора как объекта управления

Роль оператора в контуре управления является определяющей в силу разнообразия выполняемых задач и объектов манипулирования. Тем не менее часть функций возможно выполнять в автоматическом режиме. Для радиационно-стойких манипуляторов, работающих в условиях «горячих» камер, это могут быть операции автоматического позиционирования в требуемую кинематическую конфигурацию, выполнение нескольких типовых траекторий выхода в заданный сектор рабочей зоны. В целом, для данного класса манипуляторов можно говорить о комбинированном способе управления, в котором оператор либо полностью управляет движением в автоматизированном движении, либо выполняет функцию супервизора в автоматическом режиме.

Текущий режим управления M (1.8) выбирается из множества MP всех возможных режимов управления, которое можно разбить на следующие подмножества:

$MP_M \subset MP$ – подмножество автоматизированных режимов управления.

Элементами подмножества являются:

MP_{MQ} – режим управления обобщенными координатами по скорости;

MP_{MV1} – режим управления координатами схвата в базовой системе координат;

MP_{MV2} – режим управления координатами схвата в системе координат, связанной со схватом;

MP_{MP} – режим управления обобщенными координатами по положению;

$MP_A \subset MP$ – подмножество автоматических режимов управления;

Элементами подмножества являются:

$\{MP_{A1}, \dots, MP_{An}\}$ – режим воспроизведения траекторий $(1, \dots, n)$ движения манипулятора;

$MP_{AS} \subset MP$ – подмножество работы автоматизированных подсистем контроля и управления;

$MP_{MAS} = MP_M \cup MP_{AS}$ – подмножество автоматизированных режимов с функционирующими одной или несколькими подсистемами контроля и управления;

$MP_{AAS} = MP_A \cup MP_{AS}$ – подмножество автоматических режимов с функционирующими одной или несколькими подсистемами контроля и управления.

Элементами подмножества являются:

$\{MP_{AS1}, \dots, MP_{ASn}\}$ – режим автоматического управления манипулятором по информации, поступающей от системы автоматизированного контроля $(1, \dots, n)$.

При построении СУ целесообразно применять методы декомпозиции задачи управления и методику построения иерархических систем управления. Данный подход позво-

ляет упростить алгоритмы управления РТК, решать задачи формирования базовых управляющих воздействий локальными контурами управления, обеспечивая при этом требуемое быстродействие и точность. Такой подход отражен в работах [12, 59,60, 70, 76].

Иерархическая организация системы управления имеет следующие преимущества:

- упрощается анализ системы управления (исключаются несущественные для анализа особенности функционирования смежных контуров управления);
- позволяет реализовывать различные подходы к синтезу систем управления, в частности, с использованием программного обеспечения;
- обеспечивает преемственность в проектировании адаптивных систем управления манипулятора. Переход от программируемых манипуляторов к адаптивным при иерархическом подходе не требует коренной перестройки архитектуры СУ, а лишь добавления необходимых модулей и согласования интерфейса между соседними уровнями иерархии.

Функции системы управления манипулятором в виде уровней управления (иерархии) можно представить в следующем в виде таблицы 1.3.

Таблица 1.3 Функции системы управления манипулятором

1	Функции нижнего контура (уровня) управления
	<ul style="list-style-type: none"> – измерение величин выходных сигналов датчиков состояния манипулятора; – формирование пропорциональных (аналоговых) и дискретных управляющих воздействий на исполнительные приводы и устройства манипулятора; – измерение величин выходных сигналов задающего (-их) органа (-ов); – контроль аварийного состояния или неработоспособности датчиков и исполнительных органов без учета кинематической конфигурации манипулятора (наличия и допустимого уровня тока через электроприводы, уровней выходных напряжений и их выход за допустимый диапазон и т.п.)
2	Функции операторского контура управления
	<ul style="list-style-type: none"> – вычисление положения схвата манипулятора по сигналам датчиков углового (линейного) положения кинематических пар манипулятора (прямая задача кинематики); – вычисление (в случае необходимости) требуемого положения кинематических пар по заданному положению и ориентации схвата манипулятора (обратная задача кинематики); – вычисление требуемых управляющих воздействий на исполнительные приводы манипулятора в зависимости от заданного режима работы, управляющих воздействий оператора на задающие органы, кинематической конфигурации манипулятора; – отображение оператору визуальной информации о состоянии манипулятора

Продолжение таблицы 1.3

3	Функции уровня планирования движения
<ul style="list-style-type: none"> – запись требуемых траекторий движения манипулятора в режиме прямого обучения по действиям оператора; – вычисление требуемой траектории и параметров движения манипулятора по заданным начальным условиям; – исполнение (реализация) траектории движения в автоматическом режиме с заданными параметрами (например, требуемым временем ее исполнения) 	
4	Функции интеллектуального уровня управления
<ul style="list-style-type: none"> – контроль положения и ограничение подвижности манипулятора исходя из его кинематической конфигурации и априорной информации о допустимом рабочем пространстве, наличии в зоне работы статических и динамических препятствий; – автоматическое вычисление и последующее автоматизированное или автоматическое исполнение траекторий по информации от внешних систем (систем технического зрения, систем радиационного мониторинга и т.д.); – двунаправленный обмен данными с системами верхнего уровня; – интерактивные режимы обучения операторов, накопления статистики, адаптации системы управления 	

Следует отметить, что реализация вышеуказанных алгоритмов на различных уровнях управления требует создания системы с перестраиваемой структурой и, в общем случае, с адаптивными алгоритмами управления. Важнейшей чертой адаптивных алгоритмов является наличие процедуры (алгоритма) целенаправленной настройки параметров закона управления в процессе работы. По существу, данная процедура представляет собой активный поиск недостающей информации (обучение) и коррекцию закона управления (адаптацию) в соответствии с новой информацией, поступающей как от самой системы управления, так и от внешних систем (подсистем).

Характерным примером, требующим реализации функций интеллектуального управления, являются алгоритмы контроля положения манипулятора. При эксплуатации внутрикамерных манипуляторов существует вероятность его касаний и ударов о внутрикамерное оборудование, стенки камеры, рабочие поверхности. Это может привести к механическим повреждениям и потере работоспособности самого манипулятора, нарушению технологического процесса, необходимости проведения сложных процедур дезактивации оборудования и перемещения манипулятора в ремонтную зону лаборатории с последующим ремонтом.

В связи с этим, одной из важных задач системы управления является контроль нахождения манипулятора в допустимой рабочей зоне, предотвращение движения по недопустимым траекториям, коррекцию управляющих воздействий задающих органов в случае нетиповых (нежелательных) кинематических конфигураций.

Исходя из вышеизложенного, для радиационно-стойких манипуляторов, выполняющих операции в условиях сильных радиационных полей внутри герметичных камер, имеющих статические ограничения рабочей зоны, актуальным является синтез комбинированной системы управления с иерархической организацией уровней управления. Спецификой системы управления является: разнесенность (относительная удаленность) СУ и объекта управления; ограничения на выбор датчиков собственных параметров манипулятора и датчиков внешней информации; присутствие человека в контуре управления; повышенные требования к надежности и ресурсу работы. Следовательно, в процессе создания современных манипуляторов рассматриваемого класса должны быть решены следующие задачи:

1. Синтез системы управления с переменной (расширяемой) структурой, обеспечивающей функционирование внутрикамерного манипулятора в заданных режимах.
2. Синтез адаптивных алгоритмов обеспечения безопасности функционирования манипулятора в ограниченных объемах герметичных камер.

1.4 Задающие органы манипуляторов

Входящие в состав дистанционно-управляемых роботов-манипуляторов задающие органы позволяют оператору формировать команды управления исполнительным органом для каждой из степеней подвижности манипулятора. Принцип копирования, положенный в основу работы манипуляторов соответствующего типа, реализуется посредством механической либо электромеханической передачи усилий и движений многостепенного задающего органа (ЗО), перемещаемого рукой оператора, к исполнительному органу (ИО) манипулятора.

Конструктивно задающие органы копирующего типа состоят из:

- шарнирных и/или вращательных подвижных соединений;
- передаточных механизмов (тросов, лент, зубчатых колес и т.п.);
- системы управления (в случае электромеханических манипуляторов);
- рабочего элемента (управляющей рукоятки).

В копирующих манипуляторах вид каждой кинематической пары ЗО однозначно соответствует виду кинематической пары исполнительного органа, т.е.

$$s_{i,3O} = s_{i,IO}, \forall i, \quad (1.9)$$

где:

- i – количество степеней подвижности задающего и исполнительного органов;
- $s_{i,\{IO,3O\}} = \{s_1, \dots, s_k\}$ – совокупность характеристик кинематической пары (тип, минимальное и максимальное положение или угловая ориентация и т.д.).

Следует отметить, что линейные перемещения или длины звеньев задающего органа не всегда идентичны соответствующим длинам исполнительного органа, тем не менее общий характер соответствия движения ИО и ЗО сохраняется. На рисунке 1.9 приведен пример копирующего манипулятора механического типа с различной длиной звеньев ИО и ЗО.

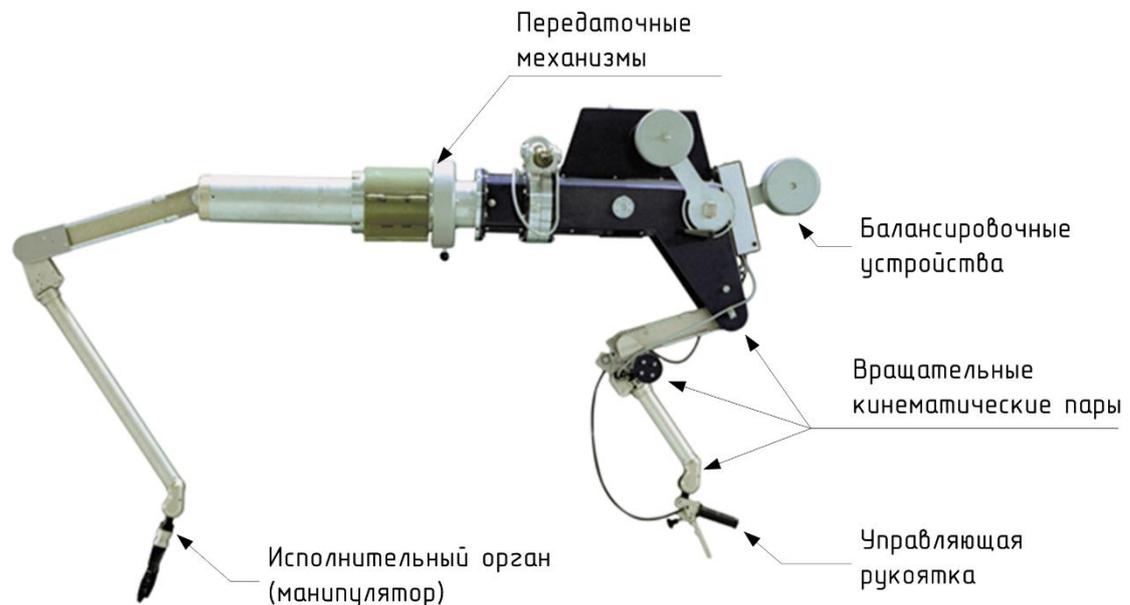


Рисунок 1.9 Внешний вид задающего и исполнительного органа копирующего типа

Кроме очевидных достоинств, ЗО копирующего типа обладают и рядом недостатков:

1. Конструктивная сложность как самого ЗО, так и передач ЗО–ИО.
2. Необходимость механической фиксации промежуточных степеней подвижности ЗО при выполнении ряда операций.
3. Значительные линейные перемещения ЗО, что в условиях ограниченных по площади рабочих мест операторов может быть помехой.

Широкое применение в промышленности получили также ЗО, выполненные в виде рукоятки (джойстика), имеющей несколько степеней подвижности и обеспечивающей

формирование сигнала управления (выходного сигнала) по каждой из степеней (рисунок 1.10).

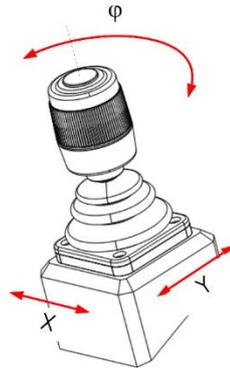


Рисунок 1.10 ЗО типа «джойстик» с 3 степенями свободы

ЗО данного типа имеют от 1 до 3 степеней свободы типа «качание», могут быть оснащены возвратными устройствами (обеспечивающими нулевой выходной сигнал, нейтральное положение рукоятки при отсутствии усилий). По каждой из осей существуют конструктивные ограничения на максимальные углы отклонения, при этом выходной сигнал приводится к определенному диапазону значений (нормируется) в аналоговом или квантованном (дискретном) диапазоне значений. Общий вид статической характеристики «угол отклонения» – «выходное значение сигнала» представлен на рисунке 1.11.

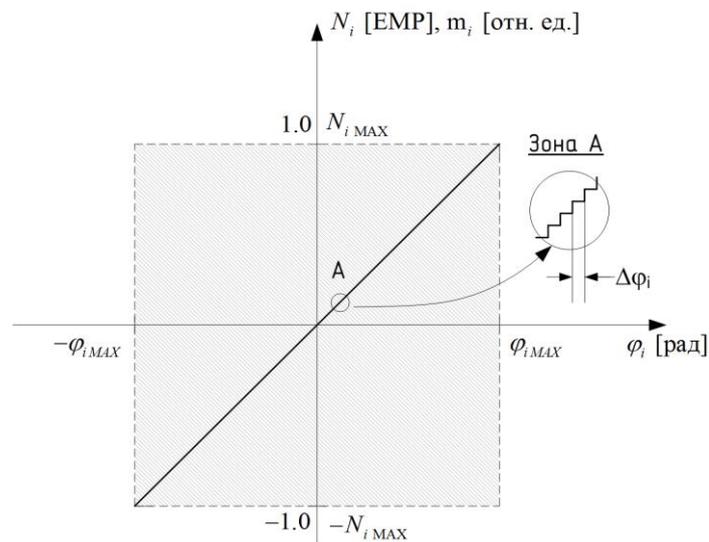


Рисунок 1.11 Статическая характеристика «угол отклонения» – «выходное значение сигнала» произвольной степени подвижности джойстика

На рисунке 1.11 обозначены:

- i – номер оси подвижности задающего органа;
- φ_i – величина отклонения рукоятки джойстика по оси подвижности i , [рад, угл. град.];
- φ_{iMAX} – максимальное (допустимое конструктивно) отклонение джойстика по оси подвижности i , [рад, угл. град.];
- m_i – величина аналогового выходного сигнала, нормированная в диапазон $[-1,0 \dots 1,0]$;
- N_i – величина кода выходного сигнала при квантованном (оцифрованном) значении отклонения, [ЕМР];
- N_{iMAX} – максимальное значение кода выходного сигнала при максимальном отклонении рукоятки, [ЕМР];

В случае цифровых (квантованных) выходных сигналов характеристика имеет ступенчатый характер с шагом по угловому разрешению $\Delta\varphi_i$ (зона А, рисунок 1.11).

Одной из задач диссертационного исследования является синтез алгоритмов автоматической адаптивной коррекции типа и параметров статической характеристики исходя из режима работы манипулятора, характера выполняемой операции, кинематической конфигурации манипулятора, индивидуальных особенностей оператора.

При использовании ЗО типа «джойстик» существуют три основных метода управления манипулятором: управление по вектору скорости (УВСК), управление по вектору силы (УВС) и управление по положению (УП).

Для работы по методу УВС в состав ЗО должны входить силовые и/или моментные исполнительные приводы, прикладываемые соответствующие силовые воздействия к рукоятке джойстика, в составе манипулятора – датчики моментных усилий в сочленениях манипулятора или датчики линейных сил, возникающих в схвате манипулятора под действием нагрузки или перемещений. Техническая реализация ЗО для данного метода достаточно трудоемка и на практике чаще применяют методы УВСК и УП.

Применение метода УП для ЗО типа «джойстик» в прямом виде также имеет некоторые ограничения в связи с небольшим угловым перемещением рукоятки джойстика, связанным с кинематикой человеческой руки и вопросами эргономики, при существенно большем требуемом диапазоне перемещений манипулятора. В связи с этим данный режим допустим при работе в ограниченных зонах пространства путем перехода из режима УВСК в режим УП и, по окончании выполнения операций, обратно.

В режиме УВСК управление манипулятором осуществляется путем вычисления требуемой скорости в его кинематических парах прямым преобразованием из величин отклонения ЗО, либо путем решения обратной задачи кинематики по скорости схвата, которая также задается величиной отклонения ЗО:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}(t) &= \mathbf{F}(\mathbf{O}(t)); \\ \left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{x}}(t)) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{O}(t)) \end{array} \right. \end{aligned}$$

где:

$\dot{\mathbf{q}}(t)$ – вектор угловых скоростей в кинематических парах манипулятора;

$\mathbf{O}(t)$ – вектор состояния задающего органа (джойстика);

$\dot{\mathbf{x}}(t)$ – вектор линейной скорости схвата манипулятора;

\mathbf{F} – обобщенный функционал преобразования из пространства координат ЗО в пространство обобщенных или линейных координат;

\mathbf{J}^{-1} – обратная матрица Якоби.

Наличие в составе ЗО типа «джойстик» дополнительных дискретных каналов управления (тумблеров, кнопок) позволяет расширить функциональные возможности ЗО как при управлении манипулятором, так и при задании и конфигурировании режимов управления.

В рамках диссертационного исследования в части интеграции задающих органов в систему управления поставлены следующие задачи:

1. Синтез алгоритмов управления 6-степенным манипулятором от задающих органов типа «джойстик» с n степенями подвижности и наличием k дискретных каналов управления. К данному вопросу относится также выбор оптимального состава выходных сигналов ЗО, количества и расположения ЗО.
2. Синтез адаптивных алгоритмов настройки статических характеристик ЗО и, при необходимости, их динамической коррекции в процессе управления манипулятором.

1.5 Программная архитектура систем управления манипуляторами

Математическое обеспечение систем управления манипуляторами представляет собой многоуровневую иерархию алгоритмов обработки данных: технический уровень (драйверы устройств); предметный уровень (алгоритмы обработки сигналов датчиков и

алгоритмы построения движений); процедурный уровень (алгоритмы управления и человеко-машинные интерфейсы); системный уровень (операционная система, ядро и машинные ресурсы); уровень обучения (языки описания функционирования, алгоритмы самообучения); уровень интеграции с системами АСУТП, АСУП (протоколы обмена, работа с базами данных и знаний).

Сохранение за человеком функции принятия решения о режимах работы, особенно в нештатных ситуациях, и придание системе управления средств супервизорного управления позволяют реализовать принцип декомпозиции режимов управления манипуляторами на систему независимых функциональных режимов. Одной из проблем супервизорного управления является возможность формирования команд оператора (изменение режима движения), не согласованную с текущим фазовым состоянием манипулятора (или вектором состояния системы управления). Уменьшение нежелательных последствий таких команд возможно реализовать несколькими подходами:

- разработкой более совершенных алгоритмов движения, расширяющих область достижимости в каждой текущей точке фазового пространства состояний манипулятора;
- разработкой систем предупреждения и информирования оператора о достижении границ области управляемости в пространстве команд;
- разделением команд оператора на предварительную (задающую тенденцию движения или изменения режима) и исполнительную фазы.

Созданию сложных программных комплексов предшествует выбор некоторого архитектурного стиля и синтез структуры ПО в рамках выбранной архитектуры. Под архитектурным стилем понимается наиболее абстрактное представление программной системы, набор базовых принципов ее организации [63, 82, 86]. Архитектура ПО чаще всего не ограничивается использованием одного архитектурного стиля, например, в основе архитектуры ПО может быть использован сервис-ориентированный стиль, каждый сервис может разделяться на функциональные слои, отдельные слои могут быть основаны на объектно-ориентированном архитектурном стиле. На современном этапе развития вычислительной техники, при сравнительно большом разнообразии вычислительных платформ, разработчиками системного и прикладного программного обеспечения реализуется парадигма кросс-платформенного ПО, имеющего в основе принцип абстракции алгоритмов и типов данных от аппаратных особенностей конкретной вычислительной архитектуры, что

позволяет проектировать ПО более высокого класса. Развитие глобальных сетевых технологий, реализация принципов свободного и открытого программного обеспечения позволили разработчикам реализовывать эффективные инструментальные средства системного и прикладного характера, специализированные библиотеки для определенного класса задач. Сюда можно отнести и языки высокого уровня C++, Python, системную библиотеку Boost, математические библиотеки CGAL и т.д.

В части специализированных библиотек проектирования ПО для робототехнических комплексов (РТК) можно выделить следующие: OpenRDK (распределенные РТК), OROCOS (специализируется на управлении РТК в режиме реального времени), Ros3Djs (визуализация данных).

В 2007 году инженерами-исследователями лаборатории искусственного интеллекта Стэнфордского университета совместно с разработчиками научно-исследовательского института/инкубатора по робототехнике Willow был выпущен программный продукт Robotic Operating System (ROS) [95]. ROS – это фреймворк для проектирования систем управления и алгоритмов управления РТК различного назначения (мобильных и стационарных РТК, РТК специального назначения), предоставляющий функциональные возможности по разработке как централизованных, так и распределенных СУ. ROS является надстройкой (промежуточным программным обеспечением, middleware) над операционной системой ЭВМ и предоставляет обширный набор сервисов, стандартных и пользовательских библиотек для создания СУ, математической обработки, стандартных алгоритмов управления, тесную интеграцию с аппаратным обеспечением ЭВМ и РТК, широкие возможности по расширению состава библиотек. Место ROS в структуре РТК представлено на рисунке 1.12.

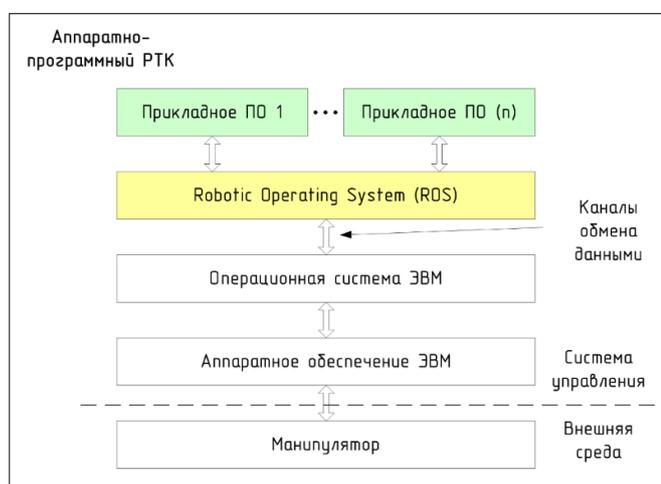


Рисунок 1.12 Архитектура ПО РТК с использованием фреймворка ROS

ROS обеспечивает стандартные службы операционной системы, такие как аппаратную абстракцию, низкоуровневый контроль устройств, управление памятью и файловой системой, передачу сообщений между процессами, управление программными пакетами (их сборку, интеграцию в программную среду). ROS основан на архитектуре графов, где обработка данных происходит в узлах, которые могут получать и передавать сообщения между собой. На рисунке 1.13 представлено автоматически сформированное средствами ROS изображение состава программных модулей (узлов) и коммуникационных связей между ними, обеспечивающих расчет и реализацию программных движений РТК по информации, поступающей от модуля лидара.

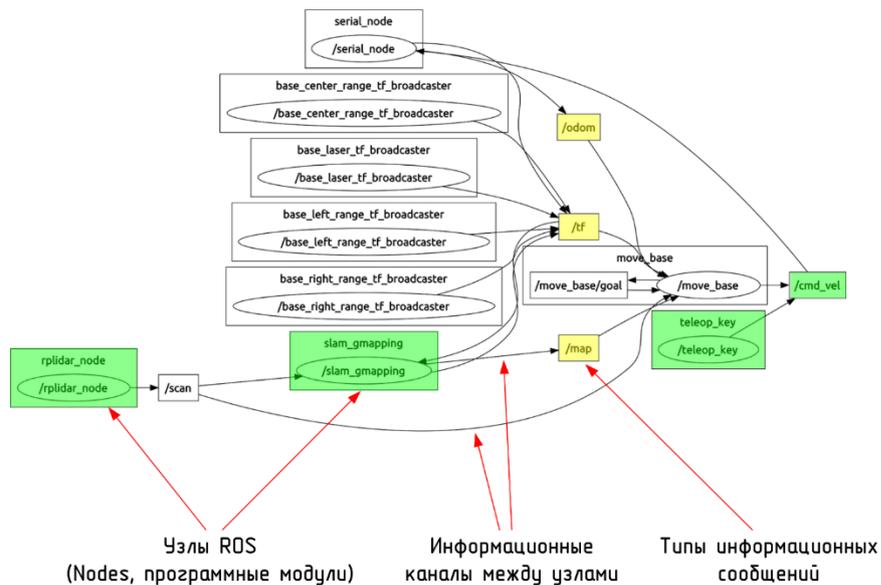


Рисунок 1.13 Пример программных модулей (узлов) ROS и связей между ними системы управления РТК

Развитая инфраструктура ROS практически полностью обеспечивает разработчиков аппаратно-программных комплексов всем необходимым набором программных средств для синтеза и отладки программных управляющих и информационных модулей, первичной обработки больших потоков поступающей информации, в том числе от систем технического зрения, семантического анализа данных, визуализации состояний РТК с использованием как классических средств представления информации, так и перспективных технических решений виртуальной реальности.

Базируясь на Unix-подобных операционных системах с открытым исходным кодом и возможности компиляции/сборки собственного ядра операционной системы, с максимальным использованием доступных вычислительных ресурсов (многоядерные микропроцессоры, графические процессоры), ROS наиболее близка к реализации принципов, заложенных в основу операционных систем реального времени (ОСРВ).

Существующие на данный момент программные продукты данного класса, такие как Microsoft Robotics Developer Studio, Mobile Robot Programming Toolkit, MOOS, Robot Construction Kit, обладают существенно меньшим набором функциональных возможностей, являются узкоспециализированными, либо имеют ограничения в части расширяемости и в ряде случаев, требуют приобретения лицензии на использование.

В рамках настоящего исследования ставится задача синтеза архитектуры и структуры программного обеспечения СУ РТК как ядра системы управления радиационно-стойкими внутрикамерными манипуляторами. В состав задачи входят:

1. Синтез архитектурного стиля для построения программной модели СУ РТК.
2. Синтез структуры программных модулей исполнительного уровня и уровня планирования движения с возможностью адаптивной настройки контуров управления.
3. Синтез программных средств человеко-машинного интерфейса и представления данных.

1.6 Системы технического зрения для внутрикамерных манипуляторов

РТК, снабженные системами технического зрения (СТЗ), достаточно широко применяются во многих отраслях промышленности на таких операциях, как контроль и отбраковка различных деталей и изделий по внешнему виду, сортировка и ориентированная укладка в кассеты деталей и заготовок, сборка и комплектация узлов и т.д.

Независимо от типа выполняемых технологических операций, задачи, решаемые с помощью СТЗ, как правило, состоят из небольшого набора элементарных подзадач [8–10, 33, 49, 98], связанных с определением:

- размера объекта или его элемента;
- положения объекта в пространстве;
- ориентации объекта в пространстве;
- принадлежности объекта или его элемента к одному из заранее определенных классов.

Существенное отличие применения СТЗ в робототехнике от классических систем фиксации и анализа фото- и видеоинформации заключается в следующем:

1. При использовании классических методов распознавания изображений на время выполнения вычислений обычно не накладываются жесткие ограничения. При использовании же СТЗ в составе РТК требуется обработка видеоинформации в режиме реального времени.

2. При классическом подходе результаты обработки изображений, как правило, передаются человеку для дальнейшего анализа. В РТК после обработки изображений должно быть незамедлительно выработано соответствующее управляющее воздействие (либо «подсказка» оператору) как корректная (адекватная) реакция на изменение внешней по отношению к РТК среды.

Роль РТК с техническим зрением и элементами искусственного интеллекта возрастает при его использовании в экстремальных условиях эксплуатации. В подобных приложениях СТЗ должна обеспечивать не только данные для непосредственной выработки сигналов обратной связи при управлении РТК и передачу сведений об окружающей среде оператору РТК, но и информацию для формирования манипулятором модели рабочей среды в целях планирования действий (прокладка маршрута, планирование траектории движения). При этом могут решаться следующие дополнительные задачи: считывание и расшифровка идентификационных меток (цветовых или штриховых кодов, буквенно-цифровых символов и т.д.); обнаружение препятствий, мешающих движению манипулятора; слежение за перемещениями и изменениями скорости объектов; визуальное определение изменений во времени наблюдаемых технологических процессов; обеспечение СУ РТК информацией для задания и коррекции траекторий рабочего органа РТК в адаптивном режиме; калибровка геометрических параметров манипулятора, привязка его систем координат к системе координат рабочего пространства.

Структурная схема внутрикамерного манипулятора, снабженного СТЗ, имеет вид, представленный на рисунке 1.14, общий алгоритмы работы – на рисунке 1.15.

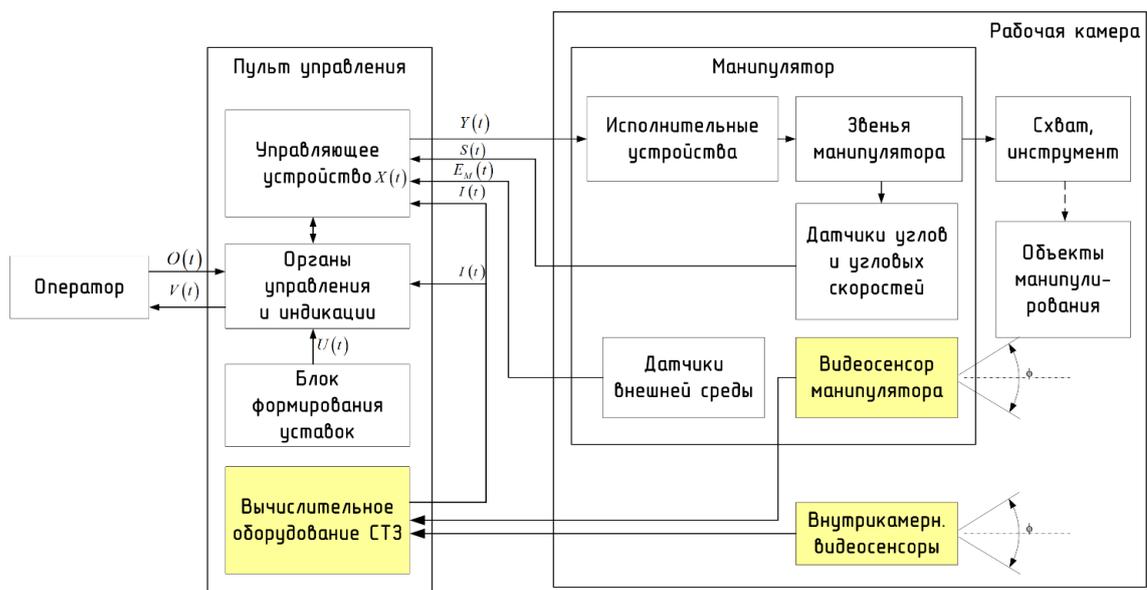


Рисунок 1.14 Структурная схема СУ внутрикамерного манипулятора с СТЗ

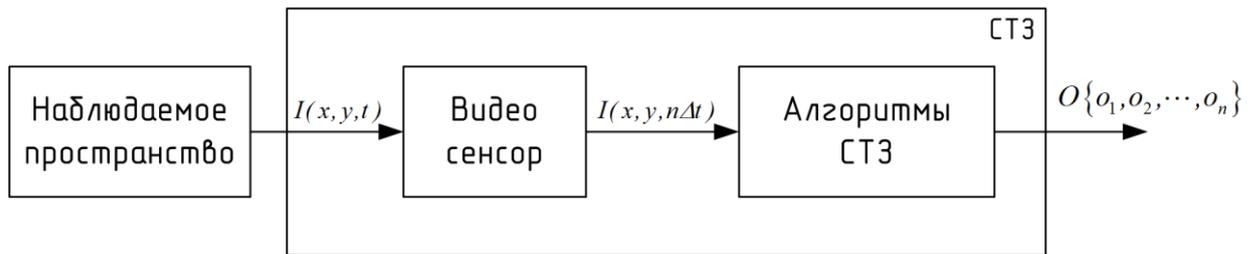


Рисунок 1.15 Общий алгоритм работы СТЗ

На рисунке 1.15 обозначены:

$I(x, y, t)$ – входное изображение, поступающее к оборудованию системы технического зрения в момент времени t ;

$I(x, y, n\Delta t)$ – двумерная матрица с числом элементов x_{MAX}, y_{MAX} (параметры разрешающей способности видеокамеры), описывающая проекцию наблюдаемой сцены на плоскость светочувствительного сенсора видеокамеры для момента времени, определяемого как номер кадра, умноженный на период измерения одного кадра;

n – число идентифицированных объектов;

$O\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ – множество идентифицированных объектов o_i , имеющих идентификационные признаки k_1, k_2, \dots, k_m .

Рассматривая СТЗ как часть системы управления манипулятором, необходимо решить следующие задачи:

1. Оценка возможности применения оборудования СТЗ в условиях сильных радиационных полей, технических мероприятий по дополнительной защите оптических и электронных элементов СТЗ.
2. Разработка алгоритма взаимодействия, состава и параметров информационного обмена между системой управления и подсистемой технического зрения.
3. Синтез алгоритма расчета траектории движения схвата манипулятора по информации, поступающей от СТЗ и СУ, с учетом априорной информации (тип, место установки, ориентация видеосенсоров СТЗ и т.д.).
4. Синтез человеко-машинного интерфейса, способа представления информации от СТЗ, диалоговых способов выбора режима работы СТЗ и сопровождаемых объектов.

1.7 Тренажерные системы в структуре систем управления манипуляторами

Развитие современных автоматических и автоматизированных технических устройств, систем и комплексов требует от персонала и операторов, эксплуатирующих данные системы, всесторонней и глубокой теоретической и практической подготовки в предметной области (основном и смежных технологических процессах, выполняемых операциях, оценке состояния объекта управления) и в смежных областях (общие принципы функционирования средств автоматики, измерения и управления, навыки и опыт работы с программно-техническими комплексами).

Современные системы профессиональной подготовки и повышения квалификации технического персонала опираются на использование аппаратно-программных тренажерных комплексов (ТК), с определенной степенью схожести имитирующих рабочее место оператора, имеющих адекватную математическую модель объектов управления, полунатурных или реальных объектов (систем). ТК предназначены для поддержания регламентного уровня знаний операторского персонала и повышения его квалификации для управления штатными, нештатными и аварийными режимами работы объекта управления. Современные ТК ориентированы на работу пользователей со следующими ролями:

- обучаемый – оператор, закрепляющий и/или улучшающий свои профессиональные навыки и знания в процессе работы с объектом управления;
- инструктор – опытный оператор, обладающий профессиональными навыками и знаниями, достаточными для подготовки учебно-тренировочных задач и последующего проведения занятий на ТК;
- администратор – специалист, обладающий знаниями и навыками в области информационных технологий, необходимыми для администрирования и поддержания работоспособности программно-технических средств ТК. Системы тренажерной подготовки имитируют различные ситуации (штатные, нештатные, аварийные) на основе учебно-тренировочных занятий (УТЗ) и программ, включающих описание исходных данных, цели задания, режима работы оборудования, сценария возникновения событий, а также показатели и критерии для оценки действий обучаемого.

В зависимости от вариантов использования в ТК могут быть заложены различные режимы работы, вариант которых [5, 15, 73, 77, 78] представлен ниже:

- обучение – самостоятельный исследовательский режим обучаемого, может проводиться совместно с инструктором;

- управляемый тренинг – совместный режим работы инструктора и обучаемого, процесс обучений «направляется» и в случае необходимости корректируется инструктором;
- квалификационный тренинг – режим подтверждения соответствия квалификационным требованиям, конкретное УТЗ может назначаться инструктором (экзаменационная проверка действий обучаемого в определенной ситуации), инструктор может отслеживать процесс выполнения УТЗ, но не может вмешиваться в него;
- подтверждение компетенции – режим подтверждения соответствия квалификационным требованиям, конкретное УТЗ автоматически выбирается некоторым случайным образом, инструктор не может ни отслеживать, ни вмешиваться в процесс выполнения УТЗ, оценка действий происходит в автоматическом режиме.

Подходы к созданию ТК должны основываться не только на проблеме синтеза идентичных моделей рабочего места, функционирования и динамики объектов (систем), но и на всестороннем анализе и учете особенностей человека-оператора, его склонности к обучению, наработке навыков и т.д. Данным вопросам уделяется внимание в работах [24, 44]. В ряде научных работ [88], посвященных исследованию взаимодействия «оператор»-«машина», синтезирован ряд требований как к ТК, так и к общим принципам функционирования систем с человеком в контуре управления:

1. Система должна принимать во внимание физические и психические особенности пользователя во время его работы с машиной. «Скорость взаимодействия не должна выходить из диапазона бесстрессовой работы, всегда должно казаться, что скоростью управляет пользователь».
2. Система должна вести себя логично, так чтобы пользователь мог научиться предвидеть ее поведение. «Аналогичные функции следует инициировать аналогичным образом». Отмечается скорость формирования привычки (насколько быстро пользователь обучается использовать систему автоматически), как важное условие легкости использования.
3. Система не должна ограничивать разнообразие способов решения задачи, система должна реагировать на различие опыта пользователей.

Принимая во внимание достаточно высокую сложность выполнения технологических операций, как правило, с малыми по габаритным размерам объектами манипулирования

в условиях ограниченного пространства герметичных камер, требований по времени выполнения данных операций, точности позиционирования и ориентирования объектов, задача синтеза комплексной системы тренажерного обучения операторов радиационно-стойких внутрикамерных манипуляторов является весьма актуальной.

При реализации тренажерной системы необходимо обеспечить выполнение следующих задач:

1. Формирование набора обучающих и контрольных учебно-тренировочных заданий (траекторий движения, исходных и финальных конфигураций манипулятора и т.д.) для различных сценариев реализации технологических операций.
2. Обеспечение гарантированной записи на информационный носитель всех управляющих векторов, векторов состояния, режимов и настроечных параметров системы. Реализация данной задачи позволяет провести:
 - анализ воздействий оператора на органы управления в течении всего этапа обучения или выполнения технологической операции;
 - повторное воспроизведение воздействий оператора и параметров движения манипулятора, в том числе с различным масштабом по времени. Повторное воспроизведение и анализ состояния системы могут быть выполнены как на манипуляторе, так и на его имитационной модели.
3. Организацию участия инструктора в процессе тренажерной сессии с целью оперативной коррекции действий обучаемого оператора. Данный подход предполагает наличие рабочего места инструктора с идентичным операторскому составу задающих органов, при этом воздействия инструктора на задающие органы в целом должны иметь более высокий приоритет по сравнению с воздействиями оператора.

В настоящей работе ставится задача синтеза системы тренажерного обучения как одной из подсистем интеллектуального уровня системы управления внутрикамерным манипулятором. Задачи данного синтеза включают в себя:

1. Разработку программной структуры системы тренажерного обучения в вариантах реализации с рабочей станцией инструктора и без таковой.
2. Разработку структуры информационной подсистемы тренажерного обучения, организацию тренажерного процесса на информационном уровне.
3. Синтез человеко-машинного интерфейса, способа представления информации при функционировании системы тренажерного обучения.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

Проведенный анализ современного состояния автоматизации технологических процессов в герметичных камерах на предприятиях атомной промышленности позволяет сделать следующие выводы и сформулировать задачи исследования:

1. Широко применяемые в настоящее время механические и электромеханические манипуляторы копирующего типа морально и физически устарели и характеризуются рядом существенных недостатков как по части исполнительных и задающих органов, так и по части систем управления, что требует разработки новых научно-технических решений по структуре, алгоритмам управления и человеко-машинным интерфейсам.

2. Поставлена задача разработки систем управления с переменной (расширяемой) структурой, обеспечивающих функционирование внутрикамерных манипуляторов в различных режимах работы, синтеза адаптивных алгоритмов управления и разработки новых программных модулей для работы в условиях герметичных камер.

3. Сформулирована задача реализации автоматизированного и автоматического режимов управления манипуляторами посредством многостепенных задающих органов типа «джойстик» с адаптивными алгоритмами их настройки.

4. Обоснована целесообразность введения в систему управления манипулятором подсистем технического зрения и тренажерного обучения персонала с разработкой новых алгоритмов и программных модулей.

ГЛАВА 2.

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИКАМЕРНЫМИ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ

Синтез систем управления внутрикамерными многокоординатными манипуляторами и алгоритмов их работы тесно связан с анализом и синтезом кинематической структуры манипулятора, выбором способа формирования движения и измерения положения манипулятора, решением следующих классов задач: прямой и обратной задач кинематики и динамики, планирования пути, планирования траекторий, выбором способа управления манипулятором, взаимодействия с задающими органами и построения двунаправленного человеко-машинного интерфейса. Общий алгоритм проектирования внутрикамерных радиационно-стойких манипуляторов представлен на рисунке. 2.1. В приведенном алгоритме разделены этапы проектирования исполнительного органа и системы управления исполнительным органом (синтез исполнительных контуров управления манипулятора и контуров тактического и стратегического управления). При проектировании системы управления учитываются результаты предыдущих этапов, возможно уточнение ряда требований по результатам синтеза и испытаний.

Исходными данными для проектирования СУ являются следующие категории (таблица 2.1):

Таблица 2.1 Категории исходных данных для проектирования СУ

№	Вид исходных данных
1	Кинематическая структура манипулятора (количество и тип сочленений, длины звеньев и т.д.), тип и характеристики схвата
2	Структура исполнительной системы манипулятора (типы приводов, способ передачи движения)
3	Структура измерительной системы манипулятора (типы и количество чувствительных элементов манипулятора, их характеристики)
4	Типы выполняемых операций, возможность автоматизации их выполнения
5	Тип и характеристики задающих органов
6	Габаритные размеры защищенных камер, расположение и геометрические размеры внутрикамерного оборудования
7	Параметры среды внутри герметичной камеры в части ионизирующих излучений, концентрации химически активных веществ, климатические параметры

Продолжение таблицы 2.1

8	Климатические параметры радиационно-безопасной (операторской) зоны для размещения компонент системы управления
9	Типы и габаритные размеры сменного инструмента
10	Типы и габаритные размеры объектов манипулирования, наличие на них идентификационных признаков
11	Требования к подсистеме вывода информации и человеко-машинному интерфейсу в целом
12	Требования по регламенту выполнения операций

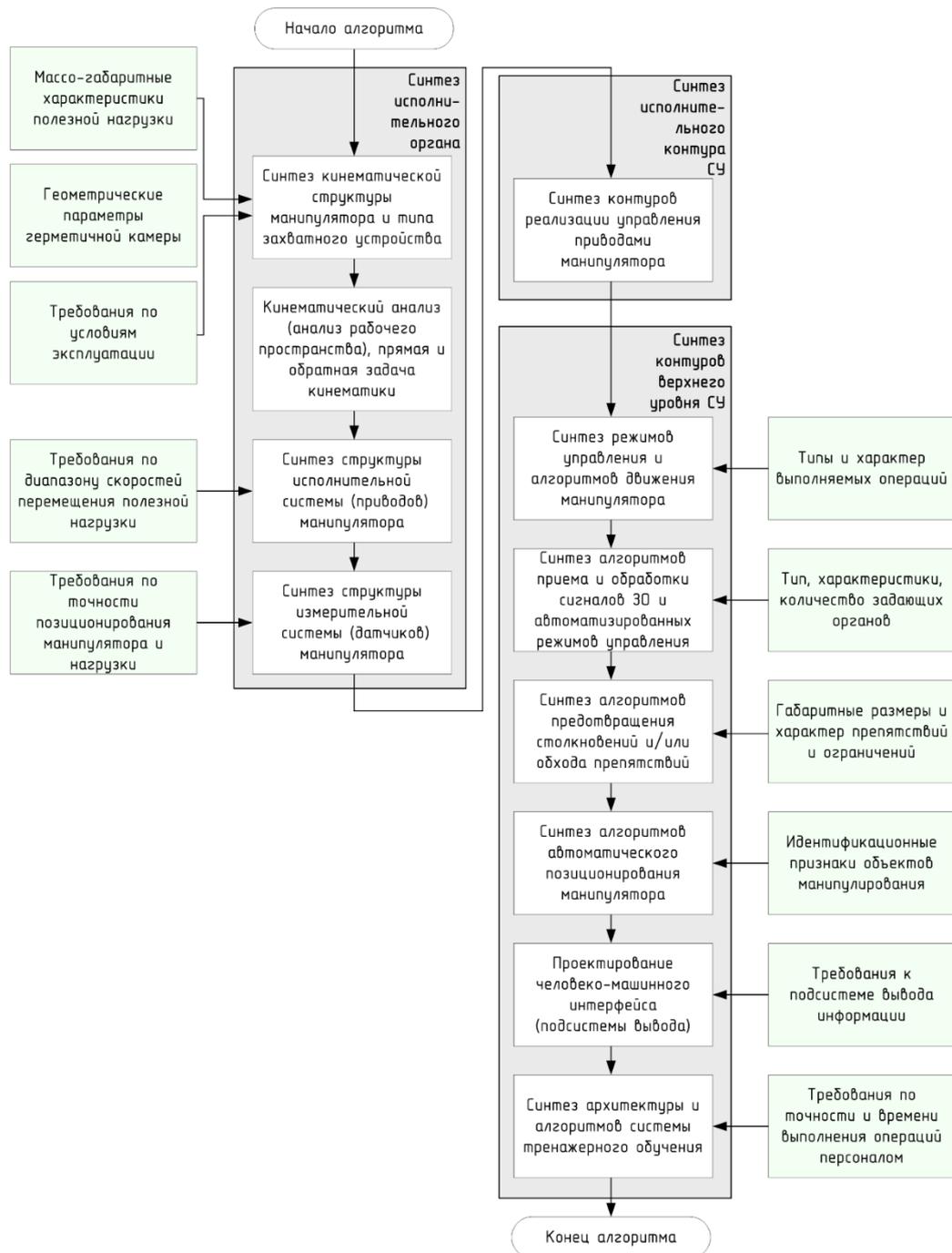


Рисунок 2.1 Блок-схема алгоритма проектирования внутрикамерных манипуляторов

2.1 Исполнительный орган манипулятора как объект управления

При синтезе структуры системы управления необходимо на максимально ранних этапах учитывать результаты, полученные на этапах синтеза кинематической структуры, исполнительной и измерительной системы манипулятора, т.е. кинематические и массо-инерционные параметры манипулятора, сило-моментные параметры приводов и точностные характеристики измерительных систем.

Для многосвязного манипулятора с вращательными степенями свободы (глава 1) такими характеристиками и параметрами являются (таблица 2.2):

Таблица 2.2 Характеристики и параметры исполнительного органа манипулятора

№	Характеристика (параметр)
1	<p>Кинематическая структура манипулятора:</p> <p>а) линейные характеристики звеньев манипулятора: длина l_i, смещение вдоль оси вращения d_i;</p> <p>б) параметры начальной ориентации звеньев;</p> <p>в) диапазоны допустимых угловых перемещений звеньев манипулятора $q_{i,MIN}$, $q_{i,MAX}$;</p> <p>г) величина максимально допустимой угловой скорости в сочленениях манипулятора $\dot{q}_{i,MAX}$</p>
2	<p>Массо-инерционные характеристики манипулятора:</p> <p>а) масса звеньев, положение центра масс m_i, \vec{r}_{ci};</p> <p>б) матрица тензоров инерции звеньев $I_i = \begin{pmatrix} I_{xxi} & I_{xyi} & I_{xzi} \\ I_{yxi} & I_{yyi} & I_{yzi} \\ I_{zxi} & I_{zyi} & I_{zzi} \end{pmatrix}$</p>
3	<p>Характеристики подсистемы приводов:</p> <p>а) типы электроприводов (двигатель постоянного тока, синхронный двигатель переменного тока и т.д.);</p> <p>б) механические и внешние характеристики электроприводов;</p> <p>в) константы, характеризующие электропривод (в том числе, характеризующие динамику работы, т.е. постоянные времени привода);</p> <p>г) параметры редукторной подсистемы приводов: тип редуктора, коэффициент редукции, число ступеней</p>
4	<p>Характеристики измерительной подсистемы манипулятора:</p> <p>а) измеряемые физические параметры конфигурации и движения манипулятора: угловое положение звеньев/схвата, угловые скорости звеньев/схвата, моментные и/или линейные усилия в звеньях/схвате;</p> <p>б) физические принципы работы чувствительных элементов:</p>

Таблица 2.2 (продолжение)

	<p>резистивные, электромеханические, электромагнитные, тензометрические датчики;</p> <p>в) диапазоны измеряемых физических параметров;</p> <p>г) статические и динамические характеристики чувствительных элементов по точности;</p> <p>д) параметры выходных сигналов чувствительных элементов</p>
--	---

Кинематические параметры, в частности, представление Денавита-Хартенберга, параметры Родрига-Гамильтона, углы Эйлера и направляющие косинусы, позволяют определить положение и ориентацию твердого тела (ТТ) и системы твердых тел (СТТ), которой является манипулятор, в рабочем пространстве [6, 12].

Свободное тело имеет шесть степеней свободы, и, следовательно, его положение относительно некоторой абсолютной системы координат полностью определяется шестью параметрами (компонентами вектора \mathbf{s}):

$$\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_6) \quad (2.1)$$

Если с телом i , положение и ориентацию которого необходимо определить, жестко связать систему координат $O_i X_i Y_i Z_i$, то поставленная задача о положении ТТ сводится к задаче о взаимном расположении системы координат $O_i X_i Y_i Z_i$ и некоторой абсолютной системы координат $O_0 X_0 Y_0 Z_0$, связанной, например, с неподвижным основанием. Тогда параметры s_i в (2.1) можно интерпретировать следующим образом:

$s_1 = x, s_2 = y, s_3 = z$ – координаты начала СК $O_i X_i Y_i Z_i$ в СК $O_0 X_0 Y_0 Z_0$;

$s_4 = \varphi, s_5 = \theta, s_6 = \psi$ – углы, задающие ориентацию СК $O_i X_i Y_i Z_i$ относительно СК

$O_0 X_0 Y_0 Z_0$, например, углы Эйлера, т.е.

$$\mathbf{s} = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi). \quad (2.2)$$

Интерпретировать \mathbf{s} как вектор в линейном пространстве невозможно, т.к. не выполняются условия аддитивности по последним трем компонентам. Для преодоления данной проблемы используют аппарат однородных координат и однородных преобразований, приведенный в разделе 1.2. Математический аппарат однородных преобразований в данном случае обладает следующими преимуществами: исключается необходимость раздельного рассмотрения операций переноса и поворота, поскольку представление (1.1) совмещает их.

Для открытых кинематических цепей положение и ориентация схвата манипулятора полностью определяется положением всех остальных звеньев, т.е. вектором обобщенных координат манипулятора $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)$. С другой стороны, его положение, рассматриваемое как свободное тело, определяется шестью параметрами (2.1, 2.2), следовательно:

- если $N < 6$, то существуют такие положения схвата, что никаким выбором значений компонент вектора \mathbf{q} невозможно обеспечить данные положения;
- если $N = 6$, то существует конечное число обобщенных векторов \mathbf{q} (т.е. различных конфигураций манипулятора), обеспечивающих заданное положение схвата;
- если $N > 6$ (манипулятор с избыточным числом звеньев), то может существовать бесконечное число конфигураций манипулятора, обеспечивающих заданное положение схвата.

Вышеприведенные утверждения подтверждают необходимость и достаточность выбора шестистепенного манипулятора (раздел 1.2).

Для описания кинематической структуры манипулятора наиболее часто используется способ описания взаимного положения связанных систем координат, предложенный Денавитом и Хартенбергом [62, 70]. Построение систем координат выполняется по следующему алгоритму:

Шаг 1	Построение правой декартовой системы координат $Ox_0Y_0Z_0$ (абсолютной), направив ее ось Z_0 вдоль оси первого сочленения в направлении к схвату
Шаг 2	Инициализация и цикл. Для всех $i = 1, 2, \dots, N$ выполнить шаги 3–6
Шаг 3	Построение Z_i . Направить ось Z_i вдоль оси (i+1)-го шарнира. При $i=N$ (для схвата) ось Z_N сонаправлена с осью Z_{N-1}
Шаг 4	Построение начала i-й системы координат. Точка O_i находится в точке пересечения осей Z_i и Z_{i-1} или в точке пересечения оси Z_i и общей нормали к осям Z_i и Z_{i-1} (если оси Z_i и Z_{i-1} не пересекаются)
Шаг 5	Построение оси X_i . Направить ось X_i вдоль общей нормали к осям Z_i и Z_{i-1}
Шаг 6	Построение оси Y_i . Направить ось Y_i так, чтобы полученная в результате система координат $O_iX_iY_iZ_i$ была правой
Шаг 7	Нахождение параметров Денавита-Хартенберга. Для всех $i = 1, 2, \dots, N$ выполнить шаги 8–11
Шаг 8	Нахождение d_i . Параметр d_i равен расстоянию от начала (i-1)-й системы координат до точки пересечения осей Z_{i-1} и X_i , измеренному в направлении оси Z_i

Шаг 9	Нахождение a_i . Параметр a_i равен расстоянию от точки пересечения осей Z_{i-1} и X_i до начала i -й системы координат, измеренному в направлении оси X_i
Шаг 10	Нахождение q_i . Параметр q_i равен углу поворота оси X_{i-1} вокруг оси Z_{i-1} до ее совпадения с осью X_i . Для вращательных сочленений параметр q_i является обобщенной координатой
Шаг 11	Нахождение α_i . Параметр α_i равен углу поворота оси Z_{i-1} вокруг оси X_i до ее совпадения с осью Z_i
Шаг 12	Конец алгоритма

Для описанной с помощью представления Денавита-Хартенберга кинематической структуры физически реализуемого манипулятора параметры $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_{i0}$ дополняются величинами минимального и максимального значения обобщенной координаты $\theta_{i,min}, \theta_{i,max}$. На рисунке 2.2 приведен пример систем координат, связанных со звеньями 6-степенного манипулятора в его исходном положении ($\mathbf{q} = (0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$).

Переход от описания каждого i -го звена в представлении Денавита-Хартенберга к описанию с помощью матрицы однородных преобразований выполняется следующим образом:

$$T_i^{i-1} = \begin{pmatrix} c_{q_i} & -s_{q_i} c_{\alpha_i} & s_{q_i} s_{\alpha_i} & a_i c_{q_i} \\ s_{q_i} & c_{q_i} c_{\alpha_i} & -c_{q_i} s_{\alpha_i} & a_i s_{q_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

$$s_{\alpha_i} = \sin(\alpha_i), s_{q_i} = \sin(q_i), c_{\alpha_i} = \cos(\alpha_i), c_{q_i} = \cos(q_i)$$

Математическое описание кинематической структуры манипулятора позволяет сформулировать алгоритмы решения основных задач кинематического управления манипуляторами: решение прямой и обратной задач кинематики по положению и скорости, рассмотренных в разделе 2.3.

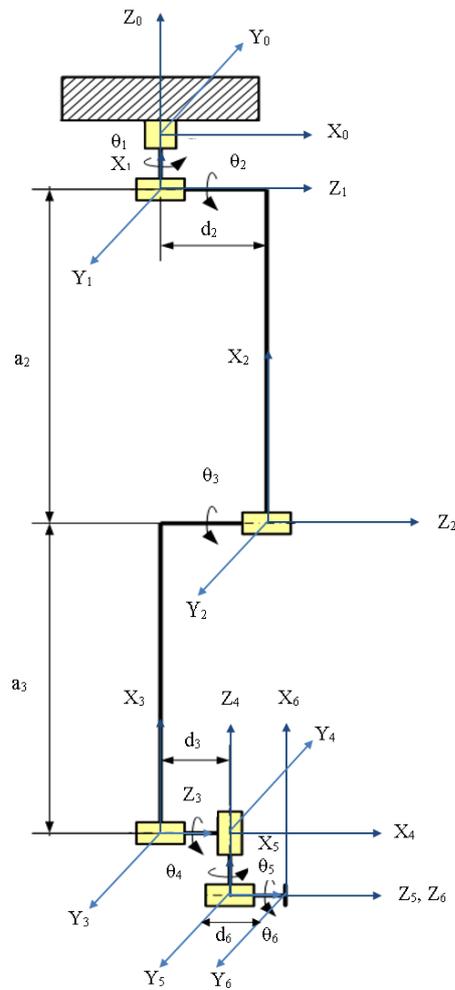


Рисунок 2.2 Пример кинематической схемы, положения и ориентации систем координат 6-степенного манипулятора, построенной по таблице параметров Денавита-Хартенберга

Для современных промышленных манипуляторов различной сферы применения типовыми системами приведения в движение являются: электрический привод, пневмо- и гидропривод. Применение двух последних для внутрикамерных манипуляторов среднего класса грузоподъемности менее целесообразно, т.к. связано со сложностью организации надежных герметичных соединений пневмо- и гидромагистралей по звеньям манипуляторов, необходимостью организации внутрикамерных пневмо- гидростанций, более сложными переходными и статическими характеристиками, пониженной динамикой системы «привод – объект управления», а также низкой радиационной стойкостью используемых в них полимерных уплотнений и резинотехнических изделий.

Для используемых в настоящее время манипуляторов МЭМ-10 приводная часть образована внешней по отношению к манипулятору и герметичной камере системой «сельсин–датчик» – «сельсин–приемник», выходной момент сил которых передается на выведенную через потолок камеры систему вложенных друг в друга валов, и далее через конические зубчатые передачи к звеньям и схвату манипулятора [27, 28]. Аналогичное решение применено в опытном образце манипулятора, описанном в [107], в котором отсутствует копирующий задающий орган, а в качестве приводной системы манипулятора применены трехфазные синхронные электроприводы со встроенными датчиками углового положения (оптическими энкодерами) и связанные с ними блоки силовой электроники. Передача моментных усилий к исполнительному органу осуществляется аналогично конструкции манипулятора МЭМ-10, т.е. системой вложенных друг в друга валов. При некоторых достоинствах предлагаемый подход сохраняет недостатки исполнительного органа МЭМ-10 (негерметичность сочленений, и, как следствие, возникновение люфтов и износа кинематических пар, а также сложность начальной регулировки манипулятора).

Для перспективных внутрикамерных радиационно-стойких манипуляторов предлагается решение, описанное в патенте [29] и заключающееся в размещении электромеханического привода, редукторных пар и измерительных датчиков ориентации и угловой скорости звена непосредственно на манипуляторе в герметичной зоне кинематических сочленений [«Плоскость крепления – основание манипулятора», «Основание-плечо», «Плечо-локоть», «Вращение кисти», «Наклон кисти», «Поворот схвата»].

Данное решение имеет целый ряд преимуществ:

1. Уменьшение массы манипулятора за счет исключения системы валов и габаритных конических передач;
2. Существенное уменьшение люфтов в кинематической цепи манипулятора, особенно при использовании низколюфтовых или безлюфтовых передач;
3. Повышение точности ориентирования звеньев манипулятора, что позволяет в автоматическом режиме выполнять ряд сложных технологических операций.

Из недостатков следует отметить:

1. Сложность компоновки привода, особенно при габаритных ограничениях проходных зон герметичной камеры. Размещаемые компоненты должны быть «в габарите» конструкции манипулятора, что накладывает ограничения на выбор типа электродвигателя;

2. Необходимость прокладки силовых и измерительных цепей электропривода внутри звеньев манипулятора и через его кинематические пары;
3. Необходимость проведения дополнительных испытаний на радиационную стойкость устанавливаемых в исполнительном органе электромеханических компонентов.

Несмотря на широкую номенклатуру электрических машин со встроенными датчиками угла/угловой скорости (сервоприводы) и широкое их использование в общепромышленных манипуляторах, они практически неприменимы для задач создания внутрикамерных манипуляторов в силу значительных габаритных размеров при требуемой мощности, а также ограниченности применения оптико-электронных компонентов энкодеров из-за их низкой радиационной стойкости. Использование применяемого в ряде случаев прямого моментного электропривода в случае внутрикамерных манипуляторов невозможно по критерию необходимого момента сил на выходном валу при требуемых габаритных размерах, а также более сложной системе коммутации обмоток электродвигателя.

Одним из оптимальных вариантов электропривода по комплексному критерию габаритных размеров, механических характеристик, широкого диапазона регулирования скорости, удобства сопряжения с электронными блоками управления является использование коллекторных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и низким (десятки Ом) значением активной составляющей полного сопротивления обмотки якоря с целью минимизации выделения тепловой мощности и перегрева электродвигателя при невысоких (порядка нескольких десятков оборотов) или нулевых скоростях вращения.

С целью сохранения кинематической конфигурации манипулятора при отключении системы управления и реализации ряда режимов в исполнительный электропривод введено электромеханическое тормозное устройство, обеспечивающее управляемое освобождение нормально заторможенного вала электропривода по команде от системы управления.

В составе датчиков электропривода степени подвижности предлагается применение индивидуального или, при необходимости, резервированного датчика углового положения, индивидуального или резервированного датчика угловой скорости, датчика протекающего через якорную обмотку тока, который может быть размещен и за пределами манипулятора (ввиду отсутствия прямой механической связи с конструкцией манипулятора и элементами привода). В силу наличия ионизирующих излучений высокой мощности,

применение полупроводниковых структур в составе чувствительных элементов практически недопустимо, в связи с этим физическое преобразование кинематических параметров ограничивается электромагнитным/электромеханическим физическими принципами для датчика угловой скорости и электромагнитным или резистивным принципом для датчика углового положения.

Общая структурная схема электропривода одной степени подвижности внутрикамерного манипулятора представлена на рисунке. 2.3.

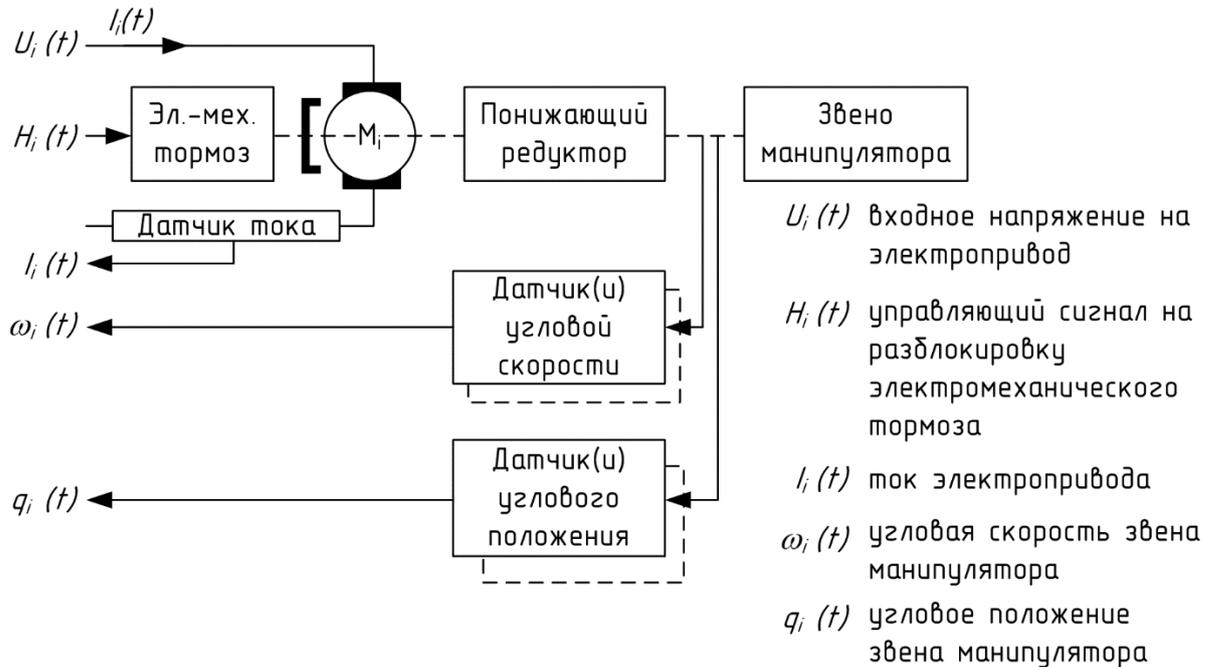


Рисунок 2.3 Структурная схема электропривода и чувствительных элементов одной степени подвижности манипулятора

Таким образом, с точки зрения системы управления состояние манипулятора представляет собой вектор мгновенных значений текущих кинематических и связанных с ними параметров, выраженных электрическими сигналами чувствительных элементов каждой степени подвижности манипулятора, имеющих в общем случае нелинейные зависимости «физический параметр – электрический сигнал».

Для 6-степенного манипулятора с 6 вращательными степенями свободы вектор состояния манипулятора представлен в виде (2.4а,б), вектор управления – в виде (2.5):

$$\mathbf{S}(t) = \begin{pmatrix} F_1(\mathbf{I}_{6 \times 1}(t)) \\ F_2(\dot{\mathbf{q}}_{6 \times 1}(t)) \\ F_3(\mathbf{q}_{6 \times 1}(t)) \end{pmatrix} \quad (2.4a)$$

$$\mathbf{S}(t) = \begin{pmatrix} F_1(\mathbf{I}_{6 \times 1}(t)) \\ F_2(\dot{\mathbf{q}}_{6 \times 2}(t)) \\ F_3(\mathbf{q}_{6 \times 2}(t)) \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{ДВИЖ}(t) = F_5(\mathbf{U}_{ДВ6 \times 1}(t)) \\ \mathbf{M}_{ТОРМ}(t) = F_6(\mathbf{U}_{ТОРМ6 \times 1}(t)) \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

где

- $\mathbf{S}(t)$ – вектор состояния манипулятора;
- $\mathbf{Y}(t)$ – вектор управления манипулятором;
- F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 – функции характеристик чувствительных элементов и исполнительных органов;
- $\mathbf{I}_{6 \times 1}$ – вектор величин протекающих по электроприводам токов;
- $\dot{\mathbf{q}}_{6 \times 1}, \dot{\mathbf{q}}_{6 \times 2}$ – вектор (матрица – в случае резервированных датчиков) величин угловых скоростей в сочленениях манипулятора;
- $\mathbf{q}_{6 \times 1}, \mathbf{q}_{6 \times 2}$ – вектор (матрица – в случае резервированных датчиков) величин угловых ориентаций манипулятора;
- $\mathbf{M}_{ДВИЖ}(t)$ – момент сил вращения, развиваемый на валу привода;
- $\mathbf{M}_{ТОРМ}(t)$ – момент сил торможения, развиваемый тормозным устройством;
- $\mathbf{U}_{ДВ6 \times 1}(t)$ – управляющее напряжение на электропривод;
- $\mathbf{U}_{ТОРМ6 \times 1}(t)$ – управляющее напряжение на тормозное устройство.

2.2 Синтез структуры комбинированной системы управления манипуляторами

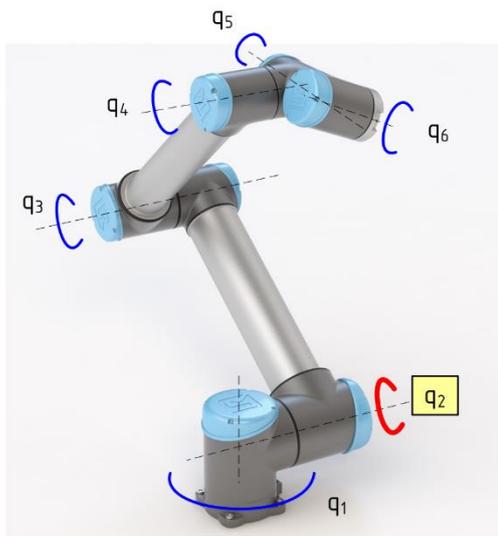
К системам управления внутрикамерными радиационно-стойкими манипуляторами (в общем случае представляющими собой нелинейные управляемые механические объекты с нестационарными параметрами) предъявляются следующие требования:

1. В части режимов управления СУ должна обеспечивать возможность управления манипулятором:
 - а) в автоматизированном режиме в нескольких подрежимах (индивидуальное управление степенью подвижности, управление в декартовой системе координат и т.д., рисунок 2.4);

- б) в автоматизированном режиме записи и автоматическом режиме воспроизведения траектории движения с требуемыми кинематическими и точностными характеристиками;
 - в) в автоматическом режиме с контролем от системы более высокого уровня (системы технического зрения, системы управления технологическим процессом);
2. В части наблюдаемости и управляемости СУ должна обеспечивать формирование, хранение и передачу требуемого вектора состояния манипулятора и вектора управляющих воздействий с необходимым и достаточным по динамическим характеристикам объекта управления тактом вычисления/управления;
 3. В части радиационной, химической и климатической стойкости СУ должна обеспечивать выполнение всех требований по данным воздействиям в течении срока эксплуатации, либо быть вынесена в зону с меньшими значениями данных опасных эксплуатационных факторов;
 4. В части надежности СУ должна гарантировать выполнение требований по времени безотказной работы и сроку службы, иметь высокую ремонтпригодность, в случае необходимости СУ должна быть резервированной.

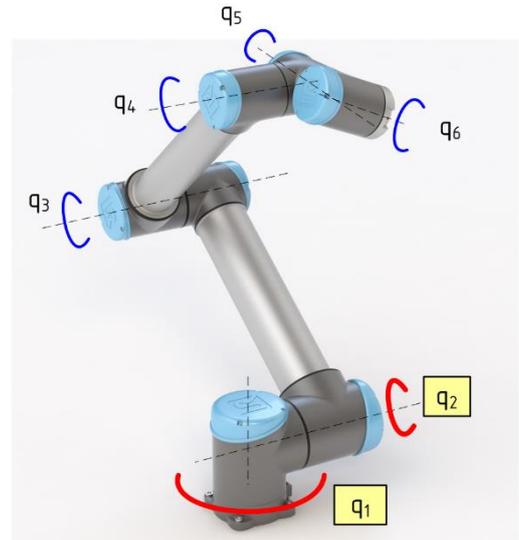
Во многих системах управления взаимосвязанными объектами траектория движения механизма, исполнительного органа (или его схвата) может быть пересчитана в траектории движения исполнительных приводов по каждой степени подвижности. Это создает предпосылки для декомпозиции исходной многосвязной СУ, определенной в пространстве обобщенных координат, на ряд отдельных подсистем более низкого порядка, которыми можно управлять как независимыми подсистемами (локальными системами управления, ЛСУ). В результате такой декомпозиции возможно исключение избыточных обратных связей по состоянию объекта без значительного снижения качественных показателей замкнутой системы управления.

Режим управления по одной обобщенной (вращательной) координате



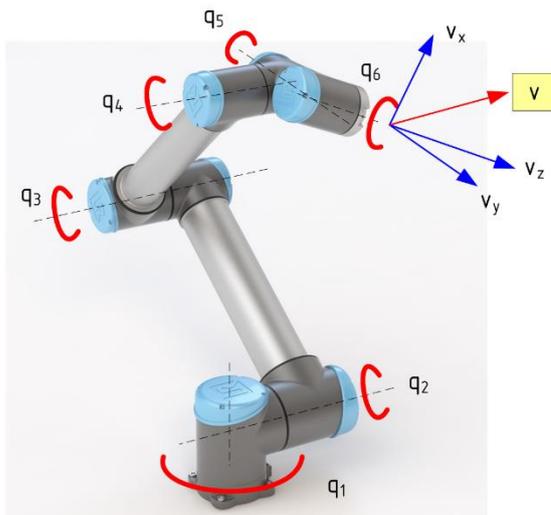
а)

Режим управления по нескольким обобщенным координатам



б)

Режим управления скоростью схвата



в)

Рисунок 2.4 Автоматизированные режимы управления манипулятором

Помимо аппаратно-программной реализации контуров регулирования основных переменных управления, на локальные системы управления могут быть возложены следующие задачи:

1. Автоматическое тестирование измерительной и исполнительной подсистем манипулятора на этапе подготовки к работе;
2. Калибровка и паспортизация измерительной подсистемы (линеаризация характеристик чувствительных элементов), хранение и обмен данной информацией с СУ;

3. Контроль корректности движения манипулятора в рабочих режимах (адекватное управляющим воздействиям изменение сигналов чувствительных элементов) с формированием аварийных сообщений и действий при соответствующих нарушениях.

Исходя из технических возможностей современных вычислительных устройств, программных средств синтеза и анализа функционирования систем управления с адаптивными и перестраиваемыми структурами, средств синтеза эффективных по быстродействию вычислительных аппаратных решений, оптимального по размеру и быстродействию программного кода для существующих и перспективных аппаратных вычислительных платформ, целесообразным является построение **комбинированной аппаратно-программной цифровой системы управления** с разбиением ее структуры на локальные подсистемы управления и систему управления верхнего уровня.

При проектировании данных систем необходимо учитывать различие постоянных времени объекта управления, наличие человека в контуре управления (с индивидуальным временем реакции) и темпа поступления внешней информации различного типа. В таблице 2.3 приведены типовые постоянные времени и необходимый период дискретизации аналоговых сигналов устройствами выборки-хранения СУ, вычисленные на основе соотношения

$$T_{\text{дискр}} = \frac{T_o}{10 \div 50}, \quad (2.6)$$

где

$T_{\text{дискр}}$ – период дискретизации, [с];

T_o – постоянная времени объекта, [с].

Таблица 2.3 Типовые диапазоны постоянных времени объектов в контуре системы управления манипулятором

Объект в контуре СУ	Постоянная времени, [с]	Необходимый период дискретизации, [с]	Обозначение периода дискретизации
Электродвигатель привода звена без механической нагрузки	$5 \cdot 10^{-3} \dots 10 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	$T_{\text{ЛСУ_Д}}$

Продолжение таблицы 2.3

Звено манипулятора (электропривод с редуктором, механические детали звена)	$5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2}$	$T_{ЛСУ}$
Манипулятор с полезной нагрузкой (с учетом возможностей редуктора)	$8 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2}$	$T_{СУ}$
Осредненный период реакции оператора	0,1	$5 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	$T_{ЗО}$
Период поступления информации от системы технического зрения (оцифрованные кадры)	–	0,05...0,1	$T_{СТЗ}$
Период поступления информации от систем более высокого уровня	–	1–100	$T_{СВУ}$

В работе предлагаются следующие варианты построения СУ, отличающиеся источниками формирования периода дискретизации:

Вариант 1 (равномерная дискретизация): процессы в контурах ЛСУ дискретизируются с периодом $T_{ЛСУ}$, процессы в СУ дискретизируются с периодом $T_{СУ}$, сигналы от ЗО дискретизируются с периодом $T_{ЗО}$ (рисунок 2.5а);

Вариант 2 (равномерная дискретизация): процессы в контурах ЛСУ дискретизируются с периодом $T_{ЛСУ}$, процессы в СУ и сигналы от ЗО дискретизируются с периодом $T_{СУ}$ (рисунок 2.5б);

Вариант 3 (дискретизация по событиям): процессы в контурах ЛСУ дискретизируются с периодом $T_{ЛСУ}$, процессы в СУ дискретизируются с периодом $T_{СУ}$, сигналы от ЗО и

внешних систем коррекции/контроля фиксируются асинхронно/апериодически (в частности, при изменении состояния ЗО), при этом состояние сигналов фиксируется экстраполятором нулевого порядка до следующего изменения (рисунок 2.5в, рисунок 2.6).

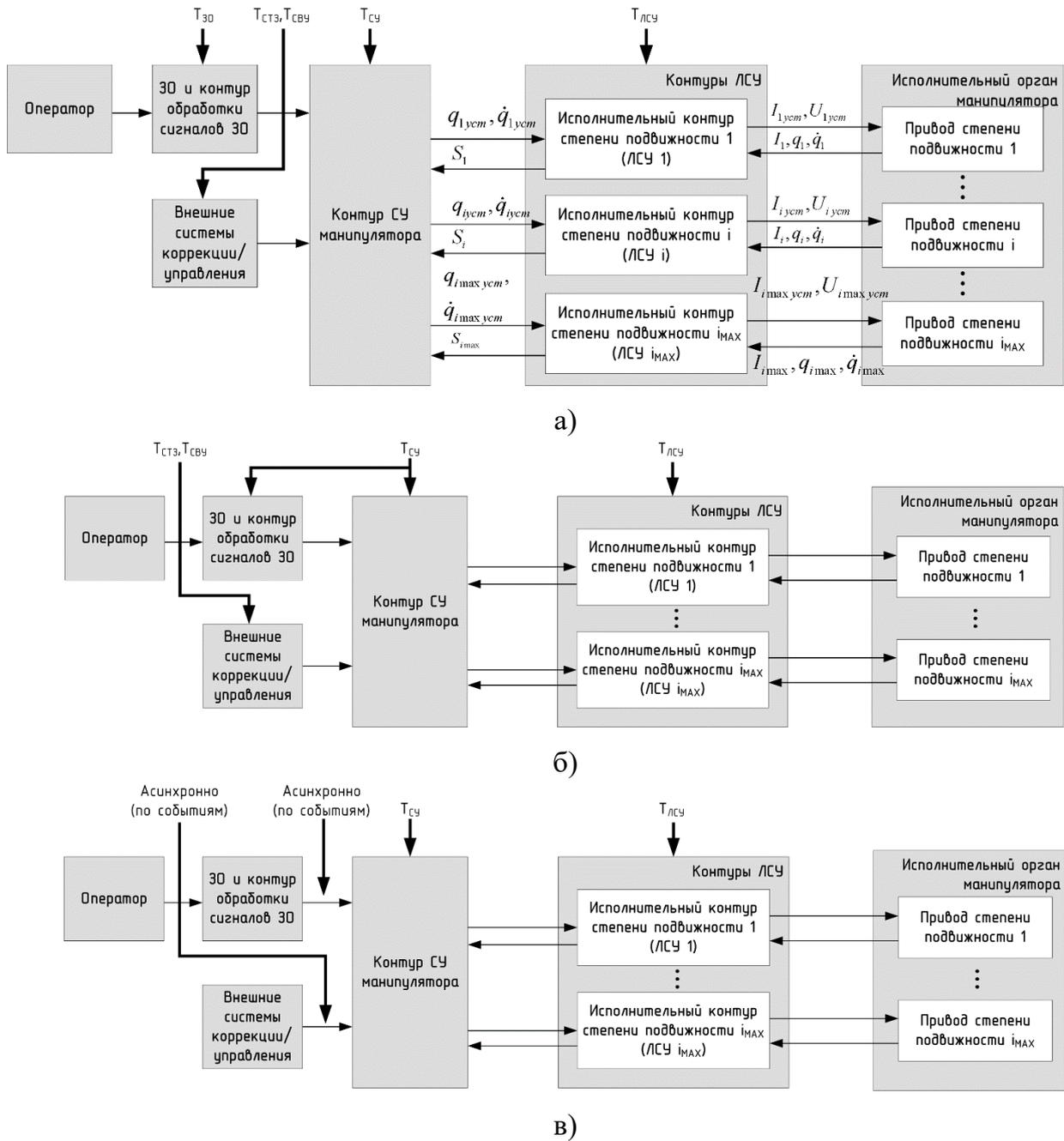


Рисунок 2.5 Структура декомпозированной на субконтуры ЛСУ системы управления с различными подходами к дискретизации событий и протекающих процессов

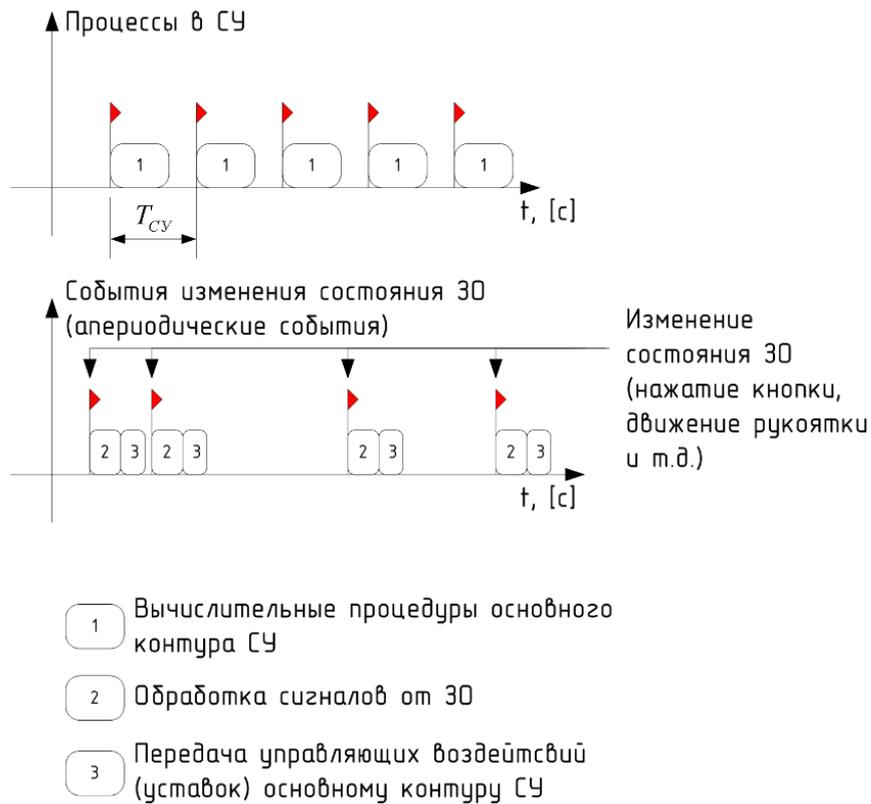


Рисунок 2.6 Диаграмма работы системы управления с асинхронно (по событиям) функционирующим контуром обработки сигналов задающих органов

На рисунке 2.7 представлена синтезированная структура комбинированной системы управления, новизна которой заключается в введении в ее структуру блока выработки управляющих воздействий, принимающего на вход сигналы от задающих органов (по действиям оператора) в автоматизированном режиме управления (блок приема и нормализации сигналов ЗО), команды и уставки, формируемые при работе манипулятора в автоматическом режиме управления (блок выработки программных движений), сигналы и информацию от внешних систем измерения (блок приема внешних сигналов), обеспечивающие функционирование манипулятора в автоматическом режиме с выработкой начальных исходных данных по программным траекториям его движения и обеспечивающий дополнительные режимы при автоматизированном управлении. При этом выбор режима управления осуществляется оператором путем формирования дискретных команд управления. Аппаратную часть ЛСУ предлагается реализовать на специализированном вычислительном устройстве на базе микроЭВМ, оснащенном необходимыми для обеспечения функционирования ЛСУ устройствами: вычислительным ядром, выполняющим реализацию программных алгоритмов ЛСУ; устройством приема, фильтрации и нор-

мирования аналоговых сигналов от датчиков манипулятора и их преобразования в цифровую форму; устройством формирования управляющих воздействий на электроприводы манипулятора в виде силовых полупроводниковых мостовых усилителей мощности с широтно-импульсным управлением; устройством обмена управляющей, статусной, диагностической информацией с системой управления; устройством формирования управляющих воздействий на тормозные механизмы манипулятора; вспомогательными устройствами контроля и самодиагностики (рисунок 2.7). Реализацию контуров управления верхнего уровня предлагается осуществлять на следующих аппаратных решениях:

1. Специализированном вычислительном устройстве без средств индикации, с наличием коммуникационных каналов связи (интерфейсов) для однонаправленного или двунаправленного информационного обмена с внешними системами, задающими органами и локальными системами управления;
2. Специализированном вычислительном устройстве с наличием средств индикации, ввода информации и коммуникационными каналами связи для информационного обмена с внешними системами, задающими органами и локальными системами управления.

И в том, и в другом случае решение задач управления выполняется дискретно с периодами T_{CY} , T_{30} , T_{CT3} , T_{CBV} и внутренней тактовой частотой вычислительного процессора $T_{CPU\ CY}$ (рисунок 2.7).

При использовании в качестве электроприводов звеньев двигателей постоянного тока функциональная схема контура ЛСУ может быть представлена в варианте, показанном на рисунке 2.8.

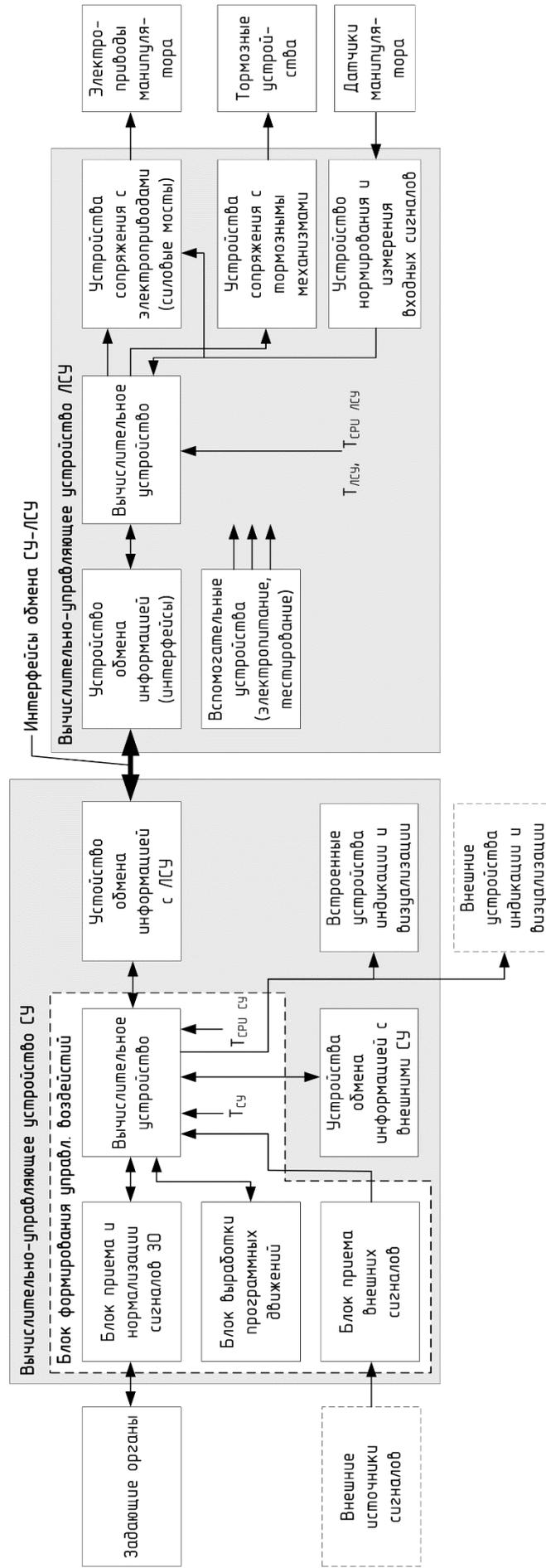


Рисунок 2.7 Структурная схема системы управления с выделением подсистемы ЛСУ

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:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.7)$$

где:

L – функция Лагранжа;

Q_i – движущий момент сил, приведенная к оси i -го звена;

Уравнение (2.7) может быть представлено в скалярно-координатном

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijk} \dot{q}_k \dot{q}_j + c_i = M_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.8)$$

или векторно-матричном виде:

$$A(q) \ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q, \quad (2.9)$$

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 (2.9) дополняется уравнениями динамики исполнительного привода и представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} x = f(q) \\ q = A_M(Q_{ДВ}, Q_B) \\ Q_{ДВ} = A_{ДВ}(u_{ДВ}) \end{cases} \quad (2.10)$$

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 $b(\dot{q}, q)$ (2.8). 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 (рисунок 2.8), где параметрами \mathbf{q} и \mathbf{P} обозначены вектор обобщенных координат манипулятора и вектор параметров регулятора, передаваемых от СУ верхнего уровня.

Исходя из анализа требований к функциональным возможностям манипулятора и режимам его работы синтезирована диаграмма базовых, расширенных и сервисных режимов системы управления (рисунок 2.9), основными из которых являются: режимы автоматизированного управления от задающих органов в обобщенных координатах, в декартовых координатах, режим автоматизированной регистрации узловых точек траектории движения манипулятора и режим автоматического воспроизведения заданной траектории. Реализация данных режимов выполняется вычислительными алгоритмами, функционирующими в составе программного обеспечения СУ и ЛСУ.

Результатам выполненного этапа является синтезированная структура комбинированной системы управления внутрикамерными радиационно-стойкими манипуляторами и перечень режимов ее функционирования.

В разделе 2.3 приведен математический аппарат и синтезированные алгоритмы реализации соответствующих режимов, в разделе 2.4 – синтез программной архитектуры системы управления.

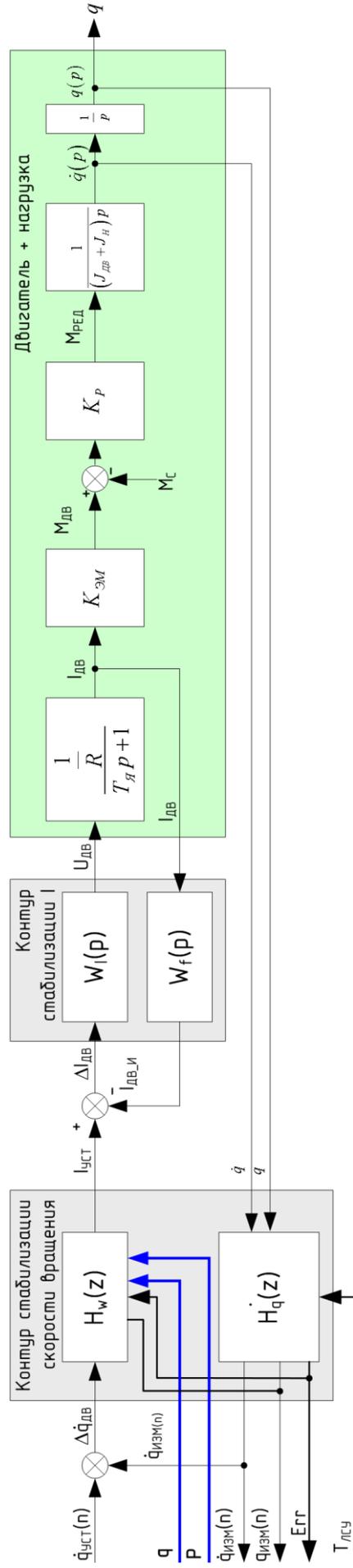


Рисунок 2.8 Структурная схема локальных контуров регулирования и исполнительного электропривода с возможностью адаптивной подстройки

На рисунке 2.8 обозначены:

- $H_w(z)$ – дискретная передаточная функция контура регулирования угловой скорости;
- $H_{f1}(z)$ – дискретная передаточная функция звена измерения угловой скорости;
- $W_I(p)$ – передаточная функция контура регулирования тока;
- $W_f(p)$ – передаточная функция звена измерения тока;
- $U_{ДВ}$ – напряжение на якорной обмотке двигателя, [В];
- $I_{ДВ}$ – ток в якорной обмотке двигателя, [А];
- $K_{ЭМ}$ – коэффициент передачи «ток»-«момент сил», [отн. ед.];
- $M_{ДВ}$ – механический момент сил двигателя, [Н*м];
- M_C – момент сил сопротивления движению (статические моменты от нагрузки, момент сил трения), [Н*м];
- K_P – коэффициент передачи механического редуктора, [Нм/А];
- $J_{ДВ}$ – момент инерции подвижной части двигателя, [кг*м²];
- J_H – момент инерции нагрузки двигателя, [кг*м²];
- \dot{q} – выходная угловая скорость ротора двигателя, [рад/с];
- $\dot{q}_{уст}$ – требуемое значение (уставка) угловой скорости, [рад/с];
- $\dot{q}_{изм}$ – измеренное значение угловой скорости, [рад/с];
- $\Delta\dot{q}$ – рассогласование по угловой скорости, [рад/с];
- $I_{уст}$ – требуемое значение тока в якорной обмотке двигателя, [А];
- $I_{ДВ-и}$ – измеренное значение тока в якорной обмотке двигателя, [А];
- $\Delta I_{ДВ}$ – рассогласование по величине тока, [А];
- $T_{лсв}$ – такт дискретизации системы, [с];
- q** – вектор обобщенных координат манипулятора (текущая кинематическая конфигурация);
- P** – вектор типа и параметров нагрузки (передается если параметры известны).

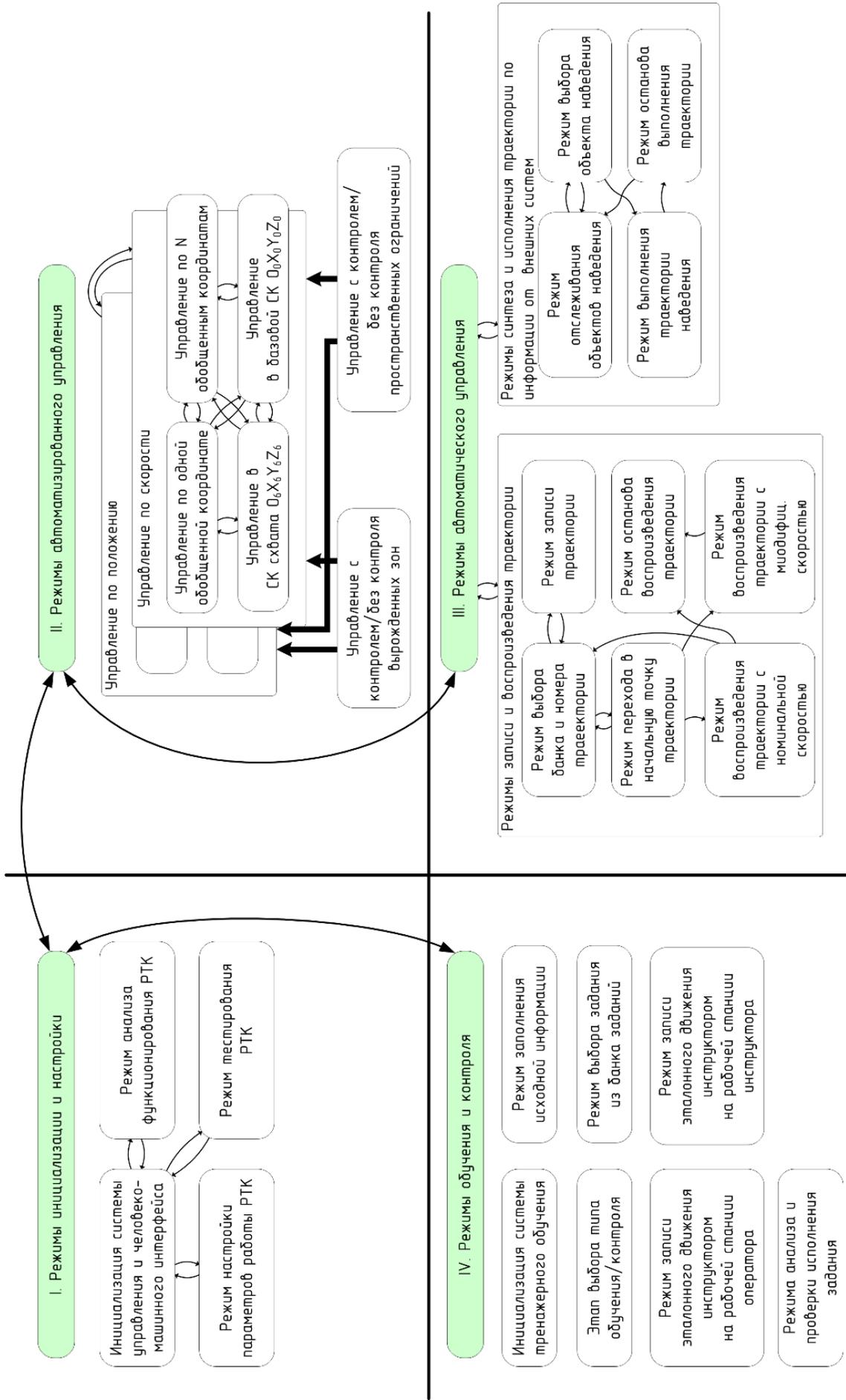


Рисунок 2.9 Диаграмма расширенных режимов работы системы управления

2.3 Математический аппарат и алгоритмы управления 6-степенным исполнительным органом манипулятора

При синтезе и моделировании систем управления внутрикамерными манипуляторами требуется выполнять решение прямой и обратной задач кинематики (по положению и скорости), задачи регистрации движения манипулятора, автоматического синтеза программной траектории и ее дальнейшего исполнения. Алгоритмы решения таких задач составляют математическую основу разработки системы управления.

2.3.1 Решение прямой задачи кинематики по положению (ПЗКП)

Целью ПЗКП является вычисление текущего положения и ориентации схвата манипулятора в базовой декартовой СК манипулятора $O_0X_0Y_0Z_0$ либо иной декартовой СК, связанной с базовой фиксированным радиус-вектором, по величинам обобщенных координат манипулятора.

Прямую задачу кинематики по положению формулируют следующим образом [12, 55, 87, 88]: по заданному вектору обобщенных координат \mathbf{q} определить положение и ориентацию схвата (и, при необходимости, положение и ориентацию всех звеньев манипулятора) путем вычисления соответствующих матриц однородных преобразований и получения матриц перехода от базовой системы координат к СК, связанной с i -м звеном.

Шаг 0

Для $i = \{1 \dots N\}$ сформировать матрицы

$$T_i^{i-1} = \begin{pmatrix} 1 & -c_{\alpha_i} & s_{\alpha_i} & a_i \\ 1 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & a_i \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $s_{\alpha_i} = \sin(\alpha_i)$, $c_{\alpha_i} = \cos(\alpha_i)$;

a_i, d_i – параметры кинематической конфигурации в представлении Дена-Вита-Хартенберга;

$i \leftarrow 1$

Шаг 1

Вычислить значения

$$c_{\theta_i} \leftarrow \cos(q_i),$$

$$s_{\theta_i} \leftarrow \sin(q_i)$$

Шаг 2	Выполнить домножение элементов (1,1), (1,4), (2,2), (2,3) на значение c_{θ_i} , элементов (1,2), (1,3), (2,1), (2,4) на значение s_{θ_i} . $T_i^{i-1} = \left(\begin{array}{ccc c} c_{\theta_i} & -c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$
Шаг 3	Вычислить матрицу A_i^0 $A_i^0 = \prod_{i=1}^i T_i^{i-1}$
Шаг 4	$i \leftarrow i + 1$
Шаг 5	Если $i > N$, то перейти к шагу 6, иначе перейти к шагу 1
Шаг 6	Для $i = \{1 \dots N\}$ выполнить формирование матрицы $S = \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{s}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F(A_1^0) \\ F(A_2^0) \\ \vdots \\ F(A_N^0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & \varphi_1 & \theta_1 & \psi_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & \varphi_2 & \theta_2 & \psi_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N & \varphi_N & \theta_N & \psi_N \end{pmatrix},$ где $\varphi_i, \theta_i, \psi_i$ – углы Эйлера, полученные из соответствующих матриц A_i^0
Шаг 7	Конец алгоритма

2.3.2 Постановка обратной задачи кинематики по положению (ОЗКП)

В теоретической робототехнике для решения ОЗКП часто используют алгоритмы на основе аналитических выражений, требующих вычисления обратных тригонометрических и трансцендентных функций. Такие алгоритмы получают непосредственно по геометрическим моделям кинематики исполнительного органа, либо по векторно-матричным моделям в представлении Денавита–Хартенберга, описывающем кинематику ИО в однородных координатах.

В общем случае решение обратной задачи кинематики по положению сводится к решению нелинейной тригонометрической системы из шести уравнений с N неизвестными, при этом данные системы могут: а) не иметь решения; б) иметь единственное решение; в) иметь более одного решения.

Целевая функция оптимизации кинематической конфигурации представляет собой нелинейную функцию многих переменных, содержащую тригонометрические зависимости, отклик которой – сложная гиперповерхность с наличием впадин, седловых точек, овражностей. Такую поверхность невозможно представить геометрически. Сложность, таким образом, возникает при определении глобального минимума функции среди множества локальных. В целом все практически используемые методы являются методами локального поиска. Надежные и одновременно экономичные методы поиска глобального минимума в настоящее время неизвестны.

Для манипуляторов со сложной кинематической структурой (как правило, при $N > 3$, где N – число степеней подвижности ИО) аналитические решения ОЗКП могут оказываться некорректными в особых конфигурациях ИО (ориентациях звеньев), а также на границе зоны достижимости из-за вырождаемости матрицы Якоби вследствие понижения ее ранга. В подобных случаях могут быть получены только приближенные решения ОЗКП итерационными методами. При применении таких методов необходимо проводить дополнительное исследование сходимости их алгоритмов.

Целью решения обратной задачи кинематики по положению является вычисление вектора обобщенных координат звеньев размерностью $N \times 1$

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_N) = \Phi^{-1}(s_E) \quad (2.11)$$

по известному (заданному) вектору линейных координат положения и угловых координат ориентации схвата

$$s_E = (x_E, y_E, z_E, \varphi_E, \theta_E, \psi_E)^T, \quad (2.12)$$

где

$\Phi^{-1}(\cdot)$ – вектор-функция размерности $N \times 1$, обратная вектор-функции размерности 6×1 $\Phi(q)$, соответствующей кинематической схеме ИО манипулятора.

Задача (2.11) является наиболее сложной с вычислительной точки зрения, т.к. она требует решения системы нелинейных алгебраических выражений вида

$$\Phi(q) - S_{EE} = F(q) = 0, \quad (2.13)$$

где

0 – нулевой вектор размерности $N \times 1$.

2.3.3 Постановка обратной задачи кинематики по скорости (ОЗКС)

При управлении манипулятором по вектору скорости в декартовых системах координат по заданному вектору линейной и угловой скорости схвата

$$v_E = (v_x, v_y, v_z)^T; \quad \Omega_E = (\omega_\varphi, \omega_\theta, \omega_\psi)^T \quad (2.14)$$

вычисляется Nx1 вектор обобщенных скоростей звеньев

$$\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_N)^T = J^{-1}(q) \cdot \begin{pmatrix} v_E \\ \Omega_E \end{pmatrix}, \quad (2.15)$$

где

$J^{-1}(\cdot)$ – матрица, обратная (псевдообратная) матрице Якоби $J(q)$ вектор-функции $\Phi(q)$.

Задача (2.15) представляет собой решение системы алгебраических линейных уравнений вида:

$$J(q) \cdot \dot{q} = \begin{pmatrix} v_{EE} \\ \Omega_{EE} \end{pmatrix}. \quad (2.16)$$

Матрица Якоби в выражениях (2.15, 2.16) в зависимости от количества степеней подвижности может быть прямоугольной или квадратной. В частности, для N=6 матрица является квадратной:

$$J(q) = \frac{\partial \Phi(q)}{\partial q} = \left\{ \frac{\partial F_i(q)}{\partial q_j}, i = \overline{1, 6}, j = \overline{1, 6} \right\} \quad (2.17)$$

В более общей постановке задача (2.11) может формулироваться как задача минимизации квадрата нормы вектора невязки

$$\|F(q)\|^2 \rightarrow \min_{q \in R^N}, \quad (2.18)$$

решаемая итерационными методами без вычисления матрицы Якоби, либо градиентными методами, использующими ее численные аппроксимации [80]. Если значения вектора обобщенных координат ограничены допустимой областью $q \in D^N$, то задачи вида (2.18) должны решаться методами условной оптимизации. При этом точные решения ОЗКС могут в принципе отсутствовать.

Соотношение (2.16) следует рассматривать как линейную систему шести уравнений с N неизвестными q_1, q_2, \dots, q_N . Известно [22, 26], что система линейных уравнений

$$A\mathbf{x} = \mathbf{b}, \quad (2.19)$$

где

- A – известная матрица размерности $m \times n$
- \mathbf{x} – неизвестный вектор размерности $n \times 1$
- \mathbf{b} – заданный вектор размерности $m \times 1$

имеет решение тогда и только тогда, когда

$$r = \text{rank}(A) = \text{rank}(A, \mathbf{b}), \quad (2.20)$$

где

- (A, \mathbf{b}) – расширенная матрица размерности $m \times (n+1)$, получаемая из матрицы A путем добавления вектора \mathbf{b} в качестве столбца $(n+1)$.

Если $r = m = n$, то существует единственное решение. Если соотношение (2.20) выполняется и $r < m$, то $m - r$ уравнений можно выразить в виде линейной комбинации r независимых уравнений, и им удовлетворяют решения r уравнений.

Для решаемой задачи и рассматриваемого класса 6-степенных манипуляторов это означает, что матрица Якоби является квадратной и при этом необходимо рассмотреть два случая:

1. Пусть при определенном \mathbf{q} выполнено условие

$$\det J(\mathbf{q}) \neq 0,$$

т.е. матрица Якоби невырожденная. Тогда обратная скоростная задача (2.15) имеет в качестве решения единственный вектор.

2. При выполнении условия, определенном

$$\det J(\mathbf{q}) = 0,$$

т.е. $r = \text{rank}(J) < 6$, обратная скоростная задача имеет бесконечно много решений, если выполняется условие

$$\text{rank}(J) = \text{rank}(J, \dot{\mathbf{s}}),$$

либо не имеет ни одного решения, если данное условие не выполняется.

В связи с этим, важным элементом алгоритма кинематического управления по скорости схвата является контроль нахождения манипулятора в вырожденных и близких к вырожденным конфигурациям.

2.3.4 Методы решения задач ОЗК

При моделировании системы управления применяются следующие алгоритмы итерационных методов:

А. Алгоритм по методу Ньютона

В случае квадратной матрицы $N=6$, возможно применение следующего алгоритма:

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k J^{-1}(q^k) \cdot F(q^k), \quad (2.21)$$

где $\alpha_k \leq 1$ – скалярная величина постоянного или переменного шага. При этом на каждом шаге итерационного процесса требуется вычислять обратную матрицу, соответствующую матрице Якоби. Однако в близких к вырожденным конфигурациям манипулятора, при плохой обусловленности или полной вырождаемости матрицы Якоби из-за понижения ее ранга, работоспособность данного алгоритма теряется.

В. Упрощенный алгоритм по методу Ньютона

При замене в алгоритме (2.21) обратной матрицы J^{-1} на транспонированную матрицу Якоби

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k J^T(q^k) \cdot F(q^k) \quad (2.22)$$

могут быть получены решения задачи (2.16), но в вырожденных конфигурациях сходимость алгоритма (2.22) не гарантируется.

С. Алгоритмы метода Левенберга-Марквардта

Для обеспечения сходимости итерационных процессов, основанных на вычислении псевдообратных матриц, необходимо осуществлять факторизацию на основе матричного разложения или использовать простую регуляризацию

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k \left[(J^T J + \alpha_{2k} E)^{-1} J^T \right] F(q^k); \quad (2.23)$$

$$q^{k+1} = q^k - \alpha_k \left[J^T (J J^T + \alpha_{2k} E)^{-1} \right] F(q^k), \quad (2.24)$$

где E – единичная матрица, α_{2k} – регуляризирующий скалярный параметр. При этом на каждом шаге итерационного процесса требуется вычислять обратную матрицу, соответствующую матрице Якоби.

При применении любого из алгоритмов матрица $J(q)$ может вычисляться либо по получаемым прямым дифференцированием вектор-функции $\Phi(q)$ аналитическим выражениям, достаточно громоздким при $N \geq 3$, либо по более эффективному рекурсивному алгоритму [99], использующему матрицы преобразования однородных координат и операции векторного произведения столбцов матрицы поворота схвата (n, o, a) – векторов нормали, ориентации и подхода.

D. Рекурсивный алгоритм вычисления матрицы Якоби

В базовой системе координат матрица Якоби осуществляет преобразование вектора обобщенных скоростей звеньев:

$$\begin{pmatrix} V_{E,0} \\ \Omega_{E,0} \end{pmatrix} = J_0(q) \cdot \dot{q}, \quad (2.25)$$

где

$V_{E,0}$ и $\Omega_{E,0}$ – векторы проекций линейной и угловой скорости схвата на оси базовой системы координат.

При этом матрица Якоби определяется как произведение

$$J_0(q) = J_V(q) \cdot J_N(q), \quad (2.26)$$

где

$J_N(q)$ – $6 \times N$ матрица Якоби преобразования скоростей в системе координат схвата;

$J_V(q)$ – 6×6 матрица преобразования линейных и угловых скоростей схвата из N -й в базовую систему координат.

$$\begin{pmatrix} V_{E,N} \\ \Omega_{E,N} \end{pmatrix} = J_N(q) \cdot \dot{q} \quad (2.27)$$

$$\begin{pmatrix} V_{E,0} \\ \Omega_{E,0} \end{pmatrix} = J_V(q) \cdot \begin{pmatrix} V_{E,N} \\ \Omega_{E,N} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

Для вычисления матрицы $J_N(q)$ используется матрица $T_N^0(q)$ (1.3), определяющая положение и ориентацию N -й СК относительно базовой:

$$T_N^0 = \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.29)$$

Столбцы матрицы $J_N(q) = (J_{1,N}, J_{2,N}, \dots, J_{6,N})$ вычисляются по обратной рекурсии

$j = (6, 5, \dots, 1)$:

$$J_{j,N} = \begin{cases} \begin{pmatrix} d_j \\ \delta_j \end{pmatrix} & \text{для вращательного звена} \\ \begin{pmatrix} \delta_j \\ 0_{3 \times 1} \end{pmatrix} & \text{для поступательного звена,} \end{cases} \quad (2.30)$$

где

d_j – 3x1 вектор, составленный из Z-составляющих векторных произведений:

$$d_j = \begin{pmatrix} (p_{N,j} \times n_{N,j})_z \\ (p_{N,j} \times o_{N,j})_z \\ (p_{N,j} \times a_{N,j})_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{x,j}n_{y,j} - p_{y,j}n_{x,j} \\ p_{x,j}o_{y,j} - p_{y,j}o_{x,j} \\ p_{x,j}a_{y,j} - p_{y,j}a_{x,j} \end{pmatrix};$$

δ_j – единичный 3x1 вектор, направленный вдоль оси движения (вращения) j-го звена:

$$\delta_j = R_{N,j}^T \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{z,j} \\ o_{z,j} \\ a_{z,j} \end{pmatrix};$$

$0_{3 \times 1}$ – нулевой 3x1 вектор.

Матрица $J_v(q)$ в блочном представлении имеет следующий вид:

$$J_v(q) = \begin{pmatrix} R_{N,0}(q) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_{N,0}(q) \end{pmatrix}, \quad (2.31)$$

где

$0_{3 \times 3}$ – нулевая матрица;

$R_{N,0}(q)$ – 3x3 матрица поворота с векторами-столбцами нормали, ориентации и подхода, вычисленными в базовой системе координат.

Вычислительные эксперименты подтверждают [55], что использование алгоритма (2.26) – (2.31) позволяет оптимизировать процесс вычисления матрицы Якоби по времени на величину до 30%.

2.3.5 Синтез программной траектории движения в виде полиномиальной функции в обобщенных координатах

Планирование траектории – предварительное определение программного движения степеней подвижности $q^*(t)$ на промежутке времени $t \in [t_0; t_1]$, т.е. функции $q(t)$ такой, что для заданного пространства обобщенных координат $Q = q_1 \times q_1 \times \dots \times q_N$ при заданных N –

числе степеней подвижности манипулятора и q_0 – начальном положении манипулятора в момент времени t_0 , манипулятор достигает конфигурации q_1 в момент времени t_1 :

$$\begin{aligned} q &= q(t); t \in [t_0; t_1]; \\ q(t_0) &= q_0; q(t_1) = q_1; \\ q &\in Q. \end{aligned} \quad (2.32)$$

При линейном движении в пространстве Q имеем:

$$\begin{aligned} \frac{q - q_0}{t - t_0} &= \frac{q_1 - q_0}{t_1 - t_0}, \\ q &= q(t) = q_0 + \frac{q_1 - q_0}{t_1 - t_0} (t - t_0) = q_0 + v(t - t_0); \\ v &= \frac{q_1 - q_0}{t_1 - t_0}, \end{aligned} \quad (2.33)$$

где

v – постоянный вектор скоростей в сочленениях.

Из соображений реализуемости скорости движения, с учетом возможностей приводов, вводится дополнительное ограничение $|v_i| \leq \dot{q}_{i\max}$, и если оно не выполняется, то увеличивают промежуток времени $(t_1 - t_0)$. При подходе (2.32) в точках q_0 и q_1 для скорости и ускорения имеют место разрывы первого и второго рода соответственно, что предполагает приложение неограниченных моментов сил, нереализуемых в реальных конструкциях. В связи с этим, в выражение (2.32) вводится функция $\lambda(t)$:

$$q = q(t) = q_0 + \lambda(t)(q_1 - q_0). \quad (2.34)$$

Выбор зависимости $\lambda(t)$, отличного от $\frac{t-t_0}{t_1-t_0}$, приводит к тому, что движение также осуществляется по прямой, но с переменной скоростью. Для выполнения условий $q(t_0) = q_0; q(t_1) = q_1$ необходимо, чтобы были выполнены условия $\lambda(t_0) = 0; \lambda(t_1) = 1$.

Для обобщенных скоростей выражение (2.34) принимает вид

$$\dot{q}(t) = \dot{\lambda}(t)(q_1 - q_0), \quad (2.35)$$

а функция $\dot{\lambda}(t)$ является профилем скорости, при этом

$$\int_{t_0}^{t_1} \dot{\lambda}(t) dt = 1. \quad (2.36)$$

Известны [2, 21] несколько подходов к формированию профиля скорости в задачах промышленной робототехники (равномерный, треугольный, трапецеидальный).

С целью минимизации ударных воздействий от исполнительных электродвигателей на механическую и датчиковую часть привода, предложено применение подхода [12, 17], реализующего профиль скорости исходя из следующих начальных условий:

$$\begin{aligned} q_i(t_0) &= q_{i,0}, \quad q_i(t_1) = q_{i,1}, \\ \dot{q}_i(t_0) &= \dot{q}_i(t_1) = 0, \\ \ddot{q}_i(t_0) &= \ddot{q}_i(t_1) = 0, \end{aligned} \quad (2.37)$$

т.е. в моменты начала и окончания движения скорости и ускорения обобщенной координаты i -го звена равны 0. Тогда многочлен пятой степени (2.38) является полиномом минимальной степени, удовлетворяющим требуемым условиям. Система (2.39) позволяет определить значения коэффициентов с учетом краевых условий

$$\begin{aligned} q_i(t) &= a_{0i} + a_{1i}t + a_{2i}t^2 + a_{3i}t^3 + a_{4i}t^4 + a_{5i}t^5 \quad (2.38) \\ \left\{ \begin{aligned} a_{0j} &= q_{j0}, \\ a_{0j} + a_{1j}T + a_{2j}T^2 + a_{3j}T^3 + a_{4j}T^4 + a_{5j}T^5 &= q_{j1} \\ a_{1j} &= 0 \\ a_{2j} &= 0 \\ a_{1j} + 2a_{2j}T + 3a_{3j}T^2 + 4a_{4j}T^3 + 5a_{5j}T^4 &= 0 \\ 2a_{2j} + 6a_{3j}T + 12a_{4j}T^2 + 20a_{5j}T^3 &= 0 \\ t_0 &= 0, \quad t_1 = T. \end{aligned} \right. \quad (2.39) \end{aligned}$$

Развитием данного подхода является использование некоторого количества полиномов, которые склеиваются таким образом, чтобы обеспечить необходимую степень гладкости.

2.3.6 Обход совокупности точек на траектории

Пусть имеется последовательность точек $\mathbf{q}^0, \mathbf{q}^1, \dots, \mathbf{q}^n$ в пространстве \mathcal{Q} , которую звенья манипулятора должны пройти, попадая в точку \mathbf{q}^k в момент времени t_k . При этом на концах траектории (в точках \mathbf{q}^0 и \mathbf{q}^n) скорости и ускорения должны удовлетворять условиям

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{q}}^0 &= a, \ddot{\mathbf{q}}^0 = b, \\ \dot{\mathbf{q}}^n &= c, \ddot{\mathbf{q}}^n = d,\end{aligned}\tag{2.40}$$

где a, b, c, d – некоторые заданные вектора (в частном случае, когда манипулятор неподвижен в начальной и конечной точках траектории, $a = b = c = d = 0$).

Необходимо построить траекторию

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(t), \mathbf{q} \in Q, \tag{2.41}$$

удовлетворяющую краевым условиям и условиям гладкости, при этом $\mathbf{q}(t)$ непрерывна вместе со своими производными до второго порядка включительно. Возможными решениями (2.39), с учетом условий (2.40, 2.41), являются: интерполяционный многочлен степени n без учета ограничений на концах траектории, либо интерполяционный многочлен степени $(n+4)$ при наличии краевых условий. В случае, когда n велико, целесообразным подходом является использование полиномов меньшей степени, склеиваемых в узловых точках.

Пусть на временном отрезке $[t_0; t_n]$ заданы узлы (точки времени) $t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots < t_n$, неравномерно отстоящие друг от друга, и $(n+1)$ обобщенных координат $q_{i,0}, q_{i,1}, \dots, q_{i,n}$ для i -го сочленения манипулятора на данном отрезке. Необходимо определить функцию $q_i(t)$, удовлетворяющую следующим условиям:

- 1) $q_i(t_k) = q_{i,k}$;
 - 2) $q_i(t), \dot{q}_i(t), \ddot{q}_i(t)$ – функции непрерывные на интервале $[t_0; t_n]$;
 - 3) на каждом интервале $[t_{k-1}; t_k], k = \overline{1, n}$ функция $q_i(t)$ является алгебраическим полиномом степени, не выше 3.
- (2.42)

Для удобства выражения коэффициентов полинома через его первую и вторую производную, полином можно представить в виде:

$$q_i^k(t) = a_{0i}^k + a_{1i}^k(t-t_k) + \frac{1}{2}a_{2i}^k(t-t_k)^2 + \frac{1}{6}a_{3i}^k(t-t_k)^3, t \in [t_{k-1}; t_k], k = \overline{1, n}. \tag{2.43}$$

Тогда

$$q_i^k(t_k) = a_{0i}^k, \dot{q}_i^k(t_k) = a_{1i}^k, \ddot{q}_i^k(t_k) = a_{2i}^k.$$

Для совокупности n интервалов (точек) разбиения траектории, исходя из (2.43), имеется $4n$ неизвестных $a_{ij}^k, i = \overline{1, 4}, j = \overline{1, n}$. Из условий 1, 2 (2.42) следует соответственно $(n+1)$

и $3(n-1)$ уравнений (всего $4(n-2)$), следовательно, необходимо наложить на функцию еще 2 дополнительных условия (2.44):

$$\begin{aligned}\dot{q}_i^k(t) &= \dot{q}_i^{k-1}(t), \\ \ddot{q}_i^k(t) &= \ddot{q}_i^{k-1}(t).\end{aligned}\tag{2.44}$$

Для определения коэффициентов полинома (2.43) предлагается следующий алгоритм, основанный на методе прогонки, предложенного И.М. Гельфандом и О.В. Локуциевским:

1. Формируем массив параметров:

$$h_k = t_k - t_{k-1}\tag{2.45}$$

2. Из выражений (2.43) с учетом начальных условий (2.40) формируем выражения для определения коэффициентов a_{ij}^k :

$$\begin{aligned}a_{0j}^k &= q_j^k; \\ a_{1j}^k &= \frac{q_j^k - q_j^{k-1}}{h_k} + \frac{h_k(2a_{2j}^k + a_{2j}^{k-1})}{6}; \\ a_{3j}^k &= \frac{a_{2j}^k - a_{2j}^{k-1}}{h_k};\end{aligned}\tag{2.46}$$

$$f_k = h_k a_{2j}^{k-1} + 2(h_k + h_{k+1})a_{2j}^k + h_{k+1}a_{2j}^{k+1} = 6\left(\frac{q_j^{k+1} - q_j^k}{h_{k+1}} - \frac{q_j^k - q_j^{k-1}}{h_k}\right);$$

3. Определение коэффициентов a_{2j}^k , используемых для вычисления остальных коэффициентов, можно выполнить из выражений:

$$\begin{aligned}h_1 a_{2j}^0 + 2(h_1 + h_2)a_{2j}^1 + h_2 a_{2j}^2 &= 6\left(\frac{q_j^2 - q_j^1}{h_2} - \frac{q_j^1 - q_j^0}{h_1}\right); \\ h_2 a_{2j}^1 + 2(h_2 + h_3)a_{2j}^2 + h_3 a_{2j}^3 &= 6\left(\frac{q_j^3 - q_j^2}{h_3} - \frac{q_j^2 - q_j^1}{h_2}\right); \\ &\vdots \\ h_{n-1} a_{2j}^{n-2} + 2(h_{n-1} + h_n)a_{2j}^{n-1} + h_n a_{2j}^n &= 6\left(\frac{q_j^n - q_j^{n-1}}{h_n} - \frac{q_j^{n-1} - q_j^{n-2}}{h_{n-1}}\right);\end{aligned}\tag{2.47}$$

4. Вычисление (2.47), т.е. коэффициентов a_{2j} , оптимально вычислить используя матрично-векторную форму и метод прогонки трехдиагональной матрицы, если принять $a_{2j}^0 = a_{2j}^n = 0$ (учитываем краевые условия на начало и окончание движения):

$\mathbf{Ax} = \mathbf{B}$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(h_1 + h_2) & h_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ h_2 & 2(h_2 + h_3) & h_3 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & h_3 & 2(h_3 + h_4) & h_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & h_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h_{n-1} & 2(h_{n-1} + h_n) \end{bmatrix}; \quad (2.48)$$

$$\mathbf{x} = (a_{2j}^1, a_{2j}^2, \dots, a_{2j}^{n-1})^T;$$

5. Решение (2.48) можно искать в виде

$$x_k = c_k x_{k+1} + d_k, \quad (2.49)$$

где

x_k — компонента вектора под номером k ;

c_k, d_k — некоторые константы.

Тогда из

$$\begin{aligned} h_{k+1} a_{2j}^k + 2(h_{k+1} + h_{k+2}) a_{2j}^{k+1} + h_{k+2} a_{2j}^{k+2} &= f_{k+1}; \\ a_{2j}^k &= c_k a_{2j}^{k+1} + d_k \end{aligned} \quad (2.50)$$

следует

$$a_{2j}^{k+1} = c_{k+1} a_{2j}^{k+2} + d_{k+1}, \quad (2.51)$$

где

$$c_{k+1} = \frac{-h_{k+2}}{h_{k+1} c_k + 2(h_{k+1} + h_{k+2})}, \quad d_{k+1} = \frac{f_{k+1} - h_{k+1} d_k}{h_{k+1} c_k + 2(h_{k+1} + h_{k+2})}.$$

При $k=0$ получаем $a_{2j}^0 = c_0 a_{2j}^1 + d_0$, тогда в качестве начальных условий можно взять $c_0 = 0, d_0 = a_{2j}^0$ и далее, используя рекуррентные соотношения, определить $c_k, d_k, k = \overline{1, n}$, что позволяет определить $a_{2j}^k, k = n-1, n-2, \dots, 1$.

Таким образом, по исходным данным – вектору значений каждой обобщенной координаты и вектору значений первой производной обобщенной координаты в узловых точках траектории, формируется массив коэффициентов полиномов третьей степени (сплайн-функций), позволяющих вычислить заданное (программное) положение в произвольный момент времени для каждой обобщенной координаты манипулятора.

2.3.7 Синтез алгоритмов выполнения программных траекторий манипулятора

Полученные по алгоритму, описанному в разделе 2.3.6, функции обобщенных координат используются для формирования программной траектории движения манипулятора как функции времени. С учетом того, что система управления является цифровой, выполнение задач вычисления управляющих воздействий выполняется с периодом T_{CV} , тогда для момента времени $t = n \cdot T_{CV}$, где n – номер такта выполнения задачи управления, значение вектора обобщенных координат вычисляется как

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(n \cdot T_{CV}), n = \overline{0, n_{MAX}}. \quad (2.52)$$

Фактическое значение обобщенной координаты, измеренное датчиками углового положения и датчиками угловой скорости звеньев манипулятора на шаге $(n-k)$, обозначим следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}^* &= \mathbf{q}^*((n-k) \cdot T_{CV}); \\ \dot{\mathbf{q}}^* &= \dot{\mathbf{q}}^*((n-k) \cdot T_{CV}). \end{aligned} \quad (2.53)$$

На шаге n имеем:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{q}^*(n \cdot T_{CV}) &= \mathbf{q}(n \cdot T_{CV}) - \mathbf{q}^*(n \cdot T_{CV}); \\ \dot{\mathbf{q}}^*(n \cdot T_{CV}). \end{aligned} \quad (2.54)$$

Поскольку управление движением манипулятора (выдача уставок от СУ к ЛСУ) выполняется в виде значений угловой скорости по каждой степени подвижности, то в общем виде закон управления можно представить следующим образом:

$$\dot{\mathbf{q}}_{VCT}(n) = f(\mathbf{q}_{VCT}(n), \mathbf{q}^*(n-1), \dots, \mathbf{q}^*(n-k), \dot{\mathbf{q}}^*(n-1), \dots, \dot{\mathbf{q}}^*(n-k)). \quad (2.55)$$

Значения величин $\mathbf{q}^*(n-k)$, $\dot{\mathbf{q}}^*(n-k)$ с величиной параметра k , отличной от 1, используются для реализации алгоритмов фильтрации измеренных величин, тогда в функционале (2.55) вводятся соответствующие контуры реализации цифровых фильтров. В работах [26, 43] приведены наиболее часто реализуемые законы управления в дискретном времени в вариантах П-, ПИ-, ПИД-регуляторов со стационарными или нестационарными коэффициентами в законах регулирования. В рамках данного исследования используется структура регулятора, представленная в виде (2.56):

$$\dot{\mathbf{q}}_{VCT}(n) = K_1 \cdot (\alpha (\dot{\mathbf{q}}^*(n-1) + K_2 (\mathbf{q}^*(n-1) - \mathbf{q}_{ПРОГР}(m))) + (1 - \alpha) \cdot \mu); \quad (2.56)$$

$$m = \begin{cases} m, & \text{при } |q^* - q_{\text{ПРОГР}}(m)| > \Delta \\ m+1, & \text{при } |q^* - q_{\text{ПРОГР}}(m)| \leq \Delta \end{cases};$$

$$\mu = \dot{q}_{\text{УСТ}},$$

где

- m – номер опорной точки траектории манипулятора в обобщенных координатах;
- Δ – допустимая погрешность позиционирования по обобщенной координате;
- $q_{\text{ПРОГР}}(m)$ – вектор обобщенных координат траектории в точке m ;
- K_1, K_2, α – вещественные константы (коэффициенты).

2.4 Синтез программной архитектуры систем управления

Существует ряд подходов [84, 88] к реализации комбинированной системы управления с переменной структурой и цифровыми регуляторами:

- а) аппаратная реализация СУ – построение вычислительного устройства на базе синтезированных логических схем, в структуре которого заложена возможность переключения между режимами работы (конечные автоматы различного уровня сложности);
- б) использование микропроцессорных миникомпьютеров или микроконтроллеров со специализированным программным обеспечением без операционной системы и развитого человеко-машинного интерфейса;
- в) использование промышленных компьютеров с комплектом системного программного обеспечения (операционная система) и разработанным комплектом прикладного программного обеспечения системы управления. Данный вариант допускает построение двунаправленного человеко-машинного диалога в том или ином варианте.

Предложенная в разделе 2.2 архитектура системы управления предполагает использование сочетания вариантов б) для ЛСУ и в) для системы верхнего уровня.

При синтезе программной архитектуры систем управления манипуляторами **рассмотрены следующие факторы:**

1. Архитектура вычислительной платформы, на которой планируется эксплуатировать программные компоненты системы управления, и ее особенности: количество вычислительных ядер и потоков, объемы, способы и время доступа к оперативным запоминающим устройствам, устройствам долговременного хранения информации, количество линий прерывания, внешних и внутренних аппаратных коммуникационных интерфейсов;

2. Функциональные возможности существующей операционной системы, адаптируемой под конкретную реализацию системы управления;
3. Возможность корректировки алгоритмов функционирования операционной системы, системных и прикладных библиотек на уровне исходного программного кода;
4. Возможность адаптации средств операционной системы под условия функционирования прикладного программного обеспечения;
5. Доступные языки разработки прикладного программного обеспечения, наличие инструментальных средств разработки и отладки, в том числе для режима реального времени;
6. Наличие стандартизированных библиотек вычислительных функций, библиотек работы с устройствами ввода-вывода;
7. Возможность распараллеливания вычислительных процессов на уровне аппаратной архитектуры, операционной системы и прикладных библиотек;
8. Поддержка режимов «жесткого» и «мягкого» реального времени для критичных по времени задач.

Для решения поставленных задач создания современных системы управления внутрикамерными радиационно-стойкими манипуляторами, программной реализации предложенных алгоритмов систем управления, интеграции с локальными системами управления и системами верхнего уровня **в работе синтезирована следующая программная архитектура**, отличающаяся возможностью создания функционально масштабируемых систем управления манипуляторами и построением распределенных систем мониторинга и управления:

1. Адаптированная операционная система (ОС) класса UNIX/Linux с модифицированным ядром (дистрибутив Ubuntu 16.04);
2. Фрэймворк Robotic Operating System версии Kinetic (Melodic) с необходимым функциональным ядром (набором библиотек, классов и способов взаимодействий между ними);
3. Программные модули системы управления, функционирующие «поверх» операционной системы и фрэймворка ROS;
4. Система управления базами данных класса SQL для обеспечения долговременного хранения конфигурационных данных, текущих, интегральных и статистических данных о функционировании манипулятора и СУ;

5. Событийно-ориентированный способ информационного взаимодействия между программными модулями прикладного программного обеспечения;
6. Клиент-серверный подход к реализации ряда функциональных возможностей (в частности, взаимодействие с базой данных);
7. Технологии WEB-доступа к отдельным видам информации в системе управления.

С целью минимизации времени отклика на события и повышению быстродействия при использовании ОС в работе **предложены и реализованы следующие подходы** (таблица 2.4):

Таблица 2.4. Предложенные и реализованные подходы к уменьшению времени отклика процессов ОС класса Ubuntu на события в СУ

№	Наименование	Описание
1	Использование оптимизированных ядер операционной системы	Использование оптимизированных в части планировки выполняемых задач ядер ОС: –low-latency, –realtime – версии ядра с повышенной функциональностью обслуживания высокоприоритетных процессов
2	Назначение повышенных приоритетов вычислительным процессам, требующим первоочередного выполнения	Указание уровня приоритетности выполнения вычислительного процесса с использованием группы команд nice/renice
3	Назначение вычислительного процесса на определенное ядро многоядерной вычислительной архитектуры	Назначение процессу признака выполнения на заданном ядре многоядерной вычислительной архитектуры (группа команд taskset)
4	Исключение ряда служб из перечня автоматически запускаемых служб	Оптимизация заключается в останове/запрете запуска ряда неиспользуемых при функционировании СУ системных служб ОС. К ним отнесены: службы печати, службы сетевой файловой системы, DNS и т.п.
5	Отключение подсистемы графического вывода	Данный вариант оптимизации предполагает, что визуализация информации выполняется на отдельном от вычислительного устройства СУ операторском рабочем месте

Использование возможности инфраструктуры ROS по декомпозиции вычислительных алгоритмов системы управления на ряд автономно функционирующих программных

модулей, и возможности ОС по запуску данных модулей в качестве отдельных вычислительных процессов с соответствующим присвоением идентификаторов и других атрибутов выполняемого процесса позволило реализовать распараллеливание процессов с целью повышения эффективности использования вычислительных ресурсов СУ.

На многоядерной вычислительной платформе планировщик ресурсов ОС организует k очередей процессов, где k - число ядер вычислительного процессора [67, 68, 81, 83, 98] (рисунок 2.10). При этом, в соответствии с п. 3 таблицы 2.4, предложена, реализована и испытана при отработке алгоритмов функционирования СУ следующая структура очередей:

Ядро 1: системные процессы и службы ОС Ubuntu;

Ядро 2: ядро ROS (процесс ros-master);

Ядро 3: вычислительные процессы алгоритмов СУ;

Ядро 4 и выше: вычислительные процессы обработки информации от систем верхнего уровня.

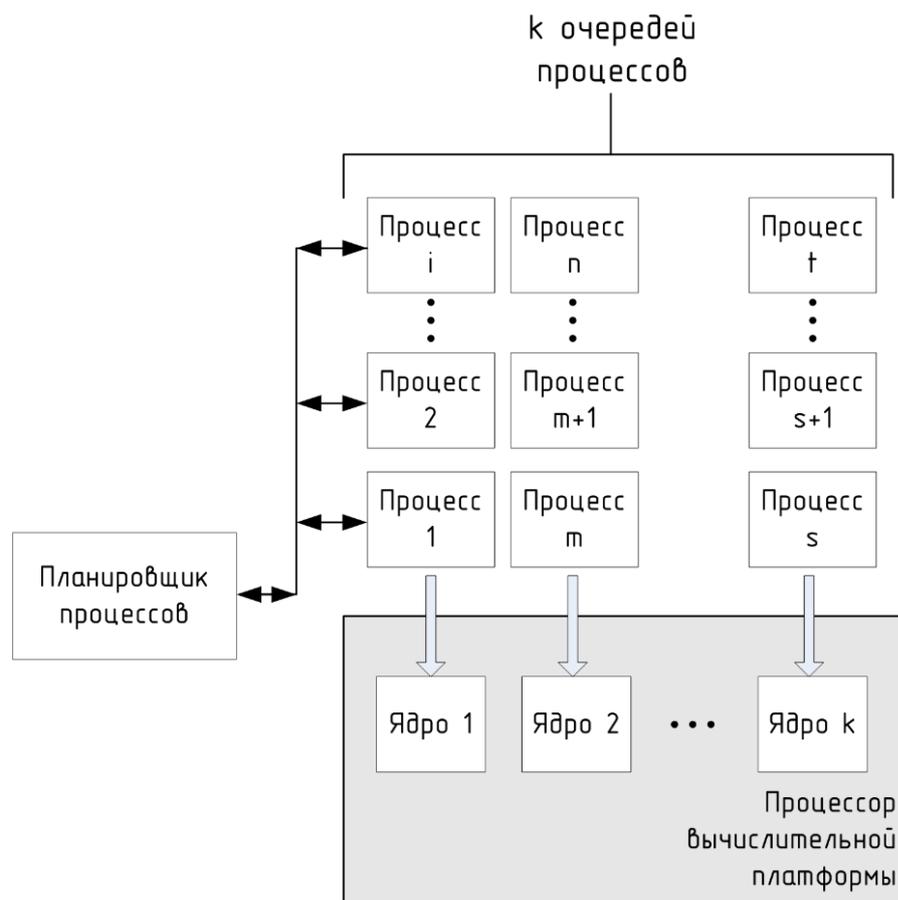


Рисунок 2.10 Очереди процессов на многоядерной вычислительной платформе

Оптимизация распределения множества вычислительных процессов по ядрам тесно связана с концепцией реализации всего комплекса прикладного программного обеспечения. В связи с разнообразием режимов управления, в работе предложена **многоуровневая расширяемая архитектура** [38] прикладного программного обеспечения системы управления радиационно-стойкими манипуляторами, основанная на многомодульном объектно-ориентированном принципе с событийно-управляемым вычислительным потоком и информационным обменом посредством логических шин данных (рисунок 2.11, рисунок 2.12, таблица 2.5).

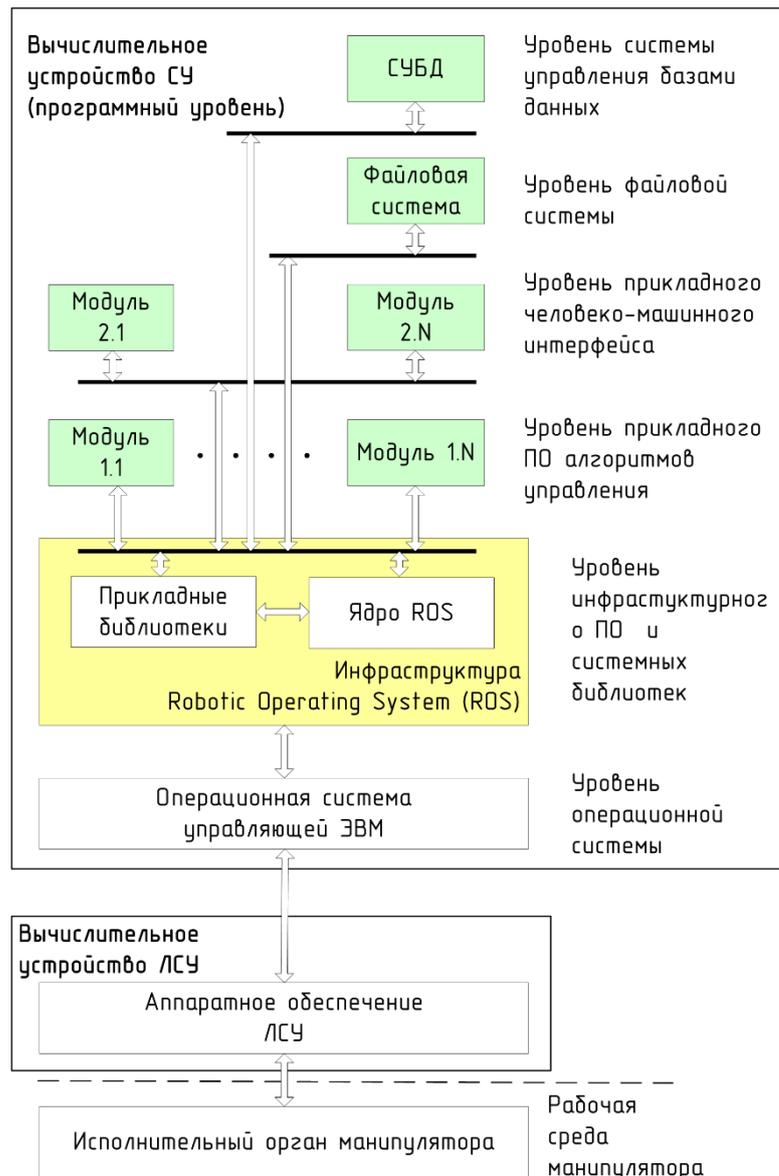
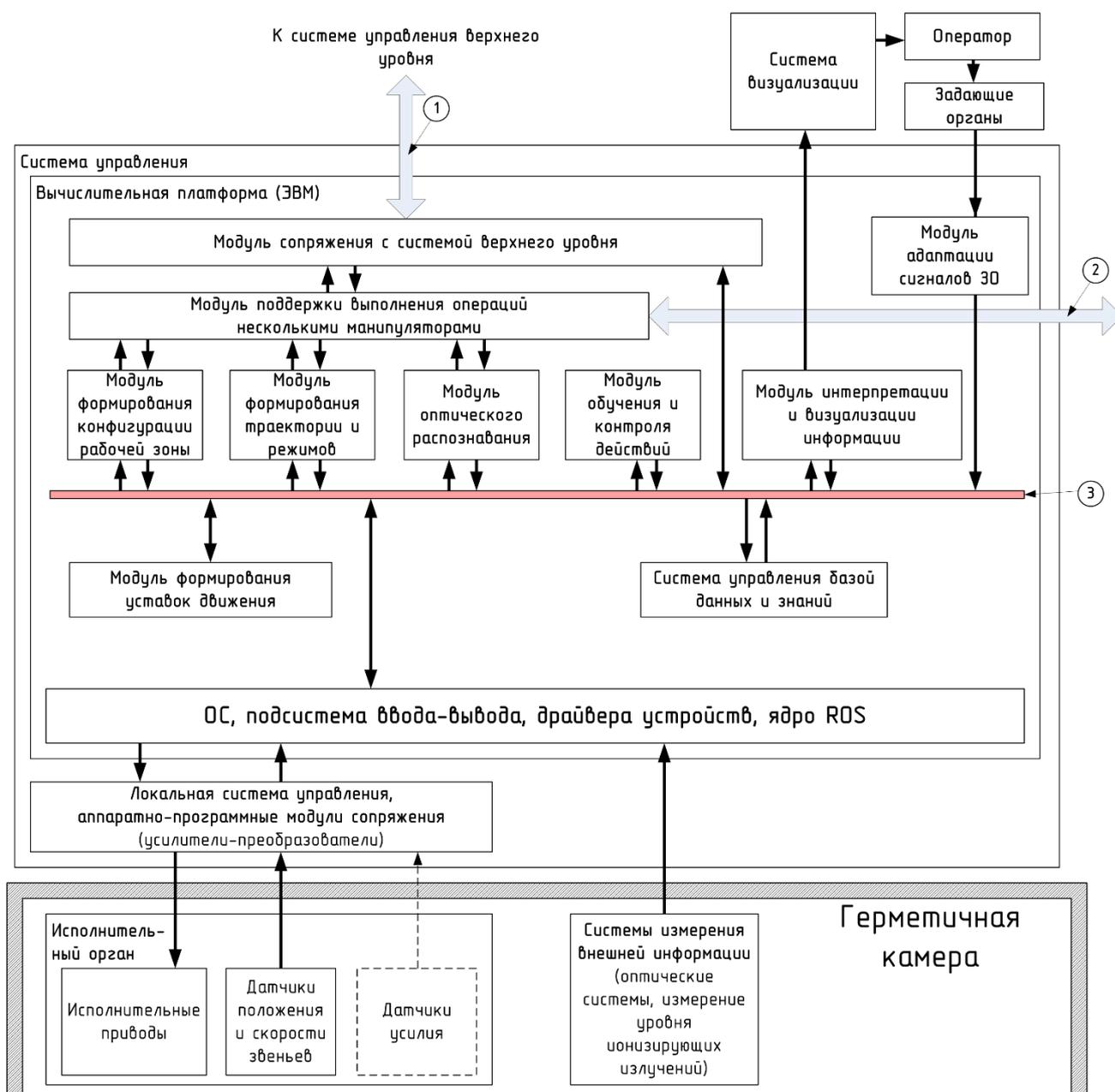


Рисунок 2.11 Многоуровневая расширяемая архитектура прикладного программного обеспечения системы управления



- ① Шина обмена данными между системами управления верхнего уровня
- ② Шина обмена сообщениями с системами управления манипуляторами и технологическим оборудованием
- ③ Общесистемная коммуникационная шина обмена сообщениями

Рисунок 2.12 Многоуровневая расширяемая архитектура прикладного программного обеспечения системы управления

На основании анализа требований к режимам работы манипулятора, структуры системы управления и предложенной программной архитектуре, а также предложенных алгоритмов функционирования СУ и ее подсистем (разделы 2.3, 2.5–2.7) синтезирована структура программных модулей прикладного программного обеспечения системы управления (рисунок 2.12). Ключевой особенностью предлагаемой структуры программ-

ных модулей является эффективное сочетание использования существующих отлаженных вычислительных алгоритмов (в том числе с открытым исходным кодом), структур данных, средств межпроцессного обмена и синтезированных в работе алгоритмов управления, реализованных в виде специализированных программных модулей (базовый их состав перечислен в таблице 2.5), обеспечивающих основные и расширенные функциональные возможности системы управления. Повышение эффективности работы программного обеспечения системы управления достигается, в том числе, использованием в программном коде модулей системы управления высокоуровневого языка C++, программных библиотек ROS (взаимодействие прикладного и системного программного обеспечения), Eigen3, CGAL (методы линейной алгебры, матричных вычислений), Boost (расширенные структуры данных и алгоритмы), ViSP (распознавание объектов в видеопотоке), Qt (высокоуровневые протоколы обмена, человеко-машинный интерфейс).

Таблица 2.5 Функции программных модулей прикладного программного обеспечения системы управления радиационно-стойкими манипуляторами

Наименование программного модуля	Функции программного модуля
Модуль адаптации сигналов ЗО	<ol style="list-style-type: none"> 1. Адаптация передаточной характеристики задающих органов 2. Формирование коэффициентов передачи вектора состояния задающих органов в вектор управляющих воздействий
Модуль формирования уставок	Вычисление требуемых управляющих воздействий по сигналам ЗО (действиям оператора) либо по заданной траектории движения
Модуль формирования траекторий и режимов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Регистрация траектории движения манипулятора. 2. Воспроизведение записанной траектории движения манипулятора. 3. Синтез траектории движения по информации от внешних систем
Модуль формирования конфигурации рабочей зоны	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ввод и хранение информации о конфигурации внутрикамерного пространства. 2. Формирование информации о конфигурации рабочей зоны при движении манипулятора в автоматизированном и автоматическом режимах
Модуль оптического распознавания	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оперативное наблюдение за выполнением операций с помощью системы технического зрения. 2. Идентификация объектов определенной конфигурации в поле зрения системы технического зрения

Продолжение таблицы 2.5

Модуль обучения и контроля действий	<ol style="list-style-type: none"> 1. Регистрация и хранение вектора информации о действиях оператора (состоянии задающих органов) и векторов состояния манипулятора и системы управления. 2. Формирование тестовых заданий при управлении в режиме «Инструктор»-«Оператор» и «ЭВМ»-«Оператор»
Модуль интерпретации и визуализации информации	Визуализация векторов состояния задающих органов, манипулятора и режимов системы управления в табличном и графическом виде на технических средствах индикации/визуализации
Система управления базами данных и знаний	<ol style="list-style-type: none"> 1. Регистрация, хранение и предоставление информации о конфигурации(-ях) манипулятора(-ов). 2. Регистрация, хранение и предоставление оперативной информации о выполнении операций. 3. Формирование статистической и отчетной информации о выполнении операций
Модуль поддержки выполнения операций несколькими манипуляторами	Алгоритмические (вычислительные) процедуры при выполнении технологических операций одновременно несколькими внутрикамерными манипуляторами
Модуль сопряжения с системой верхнего уровня	Функции межсистемного обмена на канальном, транспортном и прикладном уровнях обмена

В синтезированном варианте структуры программных модулей обмен информационными сообщениями между ними осуществляется по следующим логическим шинам:

1. Шина обмена данными между системами управления верхнего уровня (поз. 1 рисунок 2.12);
2. Шина обмена сообщениями с системами управления манипуляторами и технологическим оборудованием (поз 2., рисунок 2.12);
3. Общесистемная информационная коммуникационная шина обмена сообщениями (поз.3, рисунок 2.12);

Обмен информационными сообщениями между программными модулями (узлами) осуществляется путем формирования определенным узлом информационной посылки – сообщения с требуемой структурой данных, передаваемого посредством виртуальных каналов передачи данных (topic) определенным программным модулям (узлам) – получателям (рисунок 2.13). Прием сообщения узлом-получателем инициирует вызов его внутрен-

ней функции-обработчика полученного сообщения, и, соответственно, выполнение определенных алгоритмических, вычислительных и коммуникационных действий в зависимости от полученной информации (рисунок 2.14).

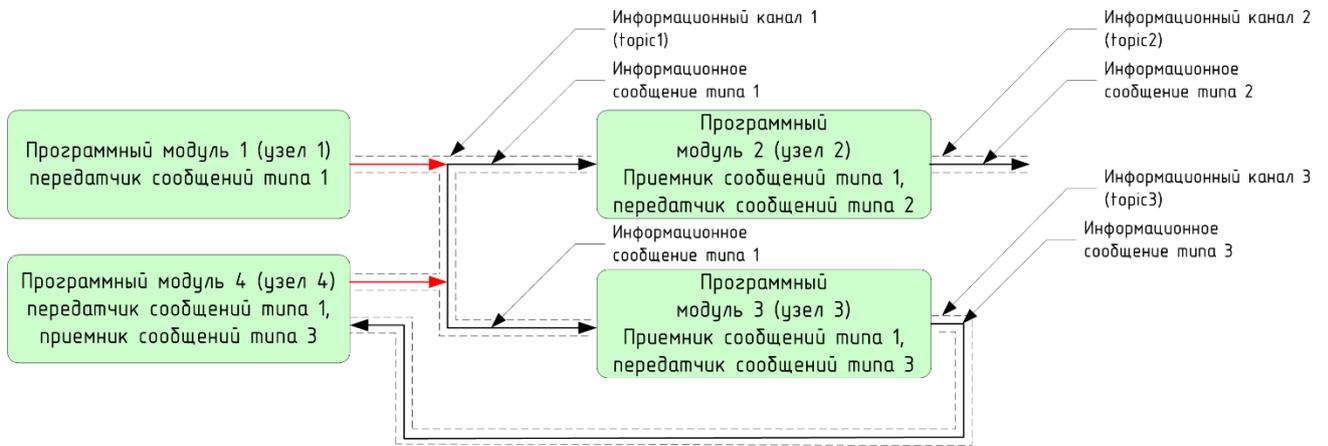


Рисунок 2.13 Блок-схема обмена сообщениями между программными модулями ROS

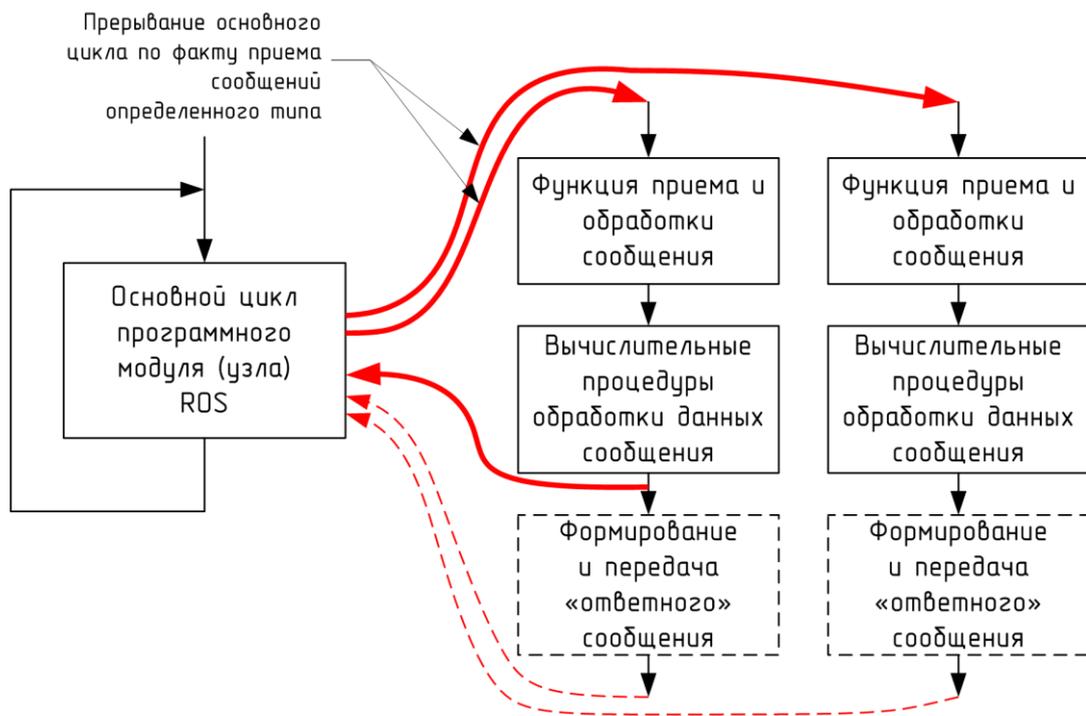


Рисунок 2.14 Блок-схема алгоритма приема сообщения программным модулем (узлом) ROS

В программной архитектуре СУ предложена следующая структура и функции меж-процессных сообщений (таблица 2.6):

Таблица 2.6 Функции межпроцессных сообщений программного обеспечения СУ

Источник информации	Имя сообщения (topic) в системе управления	Описание
Модуль адаптации ЗО	/joy_raw /joy_corrected	Вектор состояния задающих органов до и после этапа коррекции
	/joy_status	Вектор состояния задающих органов (активны/опрашиваются, пассивны)
Модуль формирования уставок и режимов работы манипулятора	/joints_status	Вектор состояния манипулятора (углы, угловые скорости)
	/joints_alarms	Вектор предупреждений, предаварийных и аварийных состояний и сообщений манипулятора
	/control_mode /control_submode	Текущий режим и подрежим управления
	/joints_setpoint /duration_setpoint	Уставка по угловому положению и интервал подхода к ней (начальная точка траектории) в обобщенных координатах
	/joints_rate_setpoint	Уставка по угловой скорости в обобщенных координатах
	/cartesian_setpoint /c_duration_setpoint	Уставка по положению и ориентации схвата, интервал подхода к уставке (начальная точка траектории) в обобщенных координатах
	/trajectory_mode	Режим выполнения траектории (0 – режим отключен, 1 – траектория регистрируется, 2 – запись траектории закончена 3 – параметры программной траектории рассчитаны 3 – режим воспроизведения траектории)
	/trajectory_number	Номер траектории для записи/воспроизведения
	/trajectory_time	Время записи/выполнения траектории
Модуль формирования и воспроизведения программных траекторий	/trajectory_parameters /start_trajectory /move_to_start	Параметры программной траектории, запуск траектории с заданным номером и т.д.

Продолжение таблицы 2.6

Модуль формирования конфигурации рабочей зоны	/set_plane /set_cube /set_distance /set_damping_factor /touched_objects	Установка координат и геометрических параметров объектов внутри герметичной камеры, границ зоны безопасности, степени снижения весового коэффициента и т.д.
---	---	---

Предложенная структура модулей и их исходные программные коды, реализующие алгоритмы управления разделов 2.3, 2.5–2.7, приведены в описании к свидетельствам о государственной регистрации программ для ЭВМ (Приложение Д).

С целью оптимизации процесса разработки кода программных модулей системы управления, с учетом предложенной расширяемой программной архитектуры, разбиения задач системы управления на отдельные подзадачи, реализуемые специализированными программными модулями, в работе **предлагается методика автоматизированной подготовки исходного кода модулей СУ**, базирующаяся на следующей исходной информации:

1. Процесс информирования ядра ROS о типах сообщений и информационных каналах от определенного узла в терминологии ROS обозначается Publishing (запрос на планируемую «публикацию» сообщений), запрос на получение сообщений от определенных информационных потоков обозначается Subscribing (подписка на получение сообщений). Таким образом, при запуске инфраструктуры ROS и отдельных программных модулей системы управления в ядре ROS динамически формируется перечень информационных каналов и типов информационных сообщений, программная структура табличного типа о узлах-источниках информационных сообщений, программная структура табличного типа о узлах - приемниках информационных сообщений (рисунок 2.15) [95].
2. Каждый программный модуль в инфраструктуре ROS может использовать как стандартные типы сообщений, так и вводить собственные, передавая их структуру (компоненты и типы сообщений) на этапе запроса на публикацию сообщений к ядру ROS (поз. 1 на рисунке 2.15), при этом возможно вложенное использование (наследование) структуры сообщений.

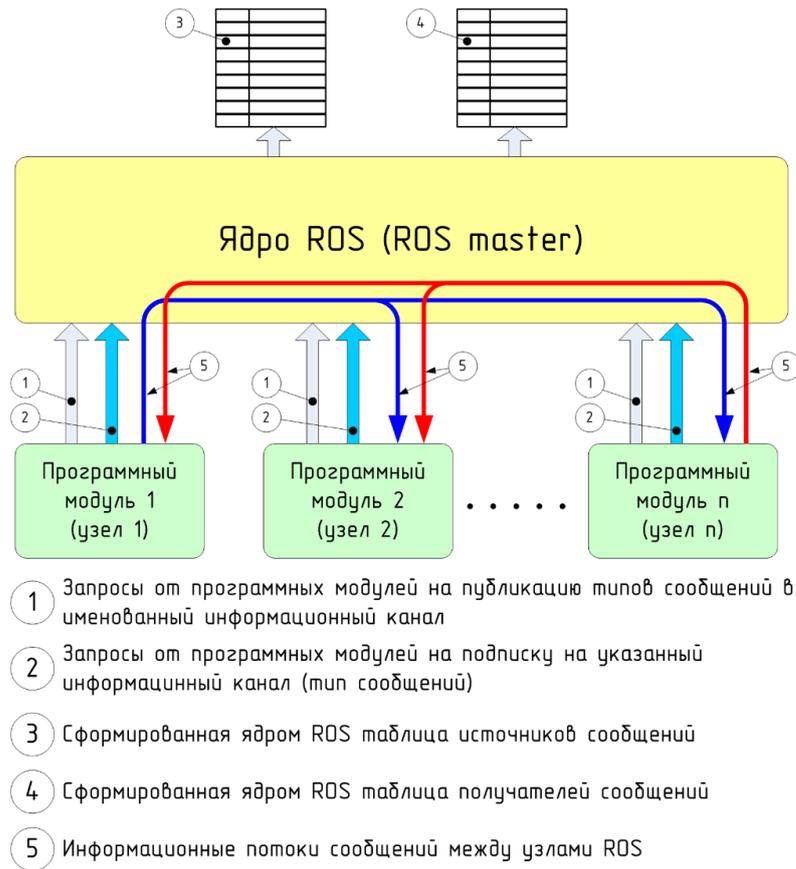


Рисунок 2.15 Этапы взаимодействия программных модулей при построении структур данных межпроцессного обмена

3. Описание типов сообщений, формируемых соответствующим программным модулем описывается в специализированном текстовом файле, являющемся отдельной единицей в файловой структуре, описывающей модуль (рисунок 2.16). Непосредственно при передаче сообщение дополняется заголовком, содержащим его порядковый номер в системе и время публикации, что позволяет выполнять дополнительную проверку целостности информационного обмена на этапе приема сообщения.

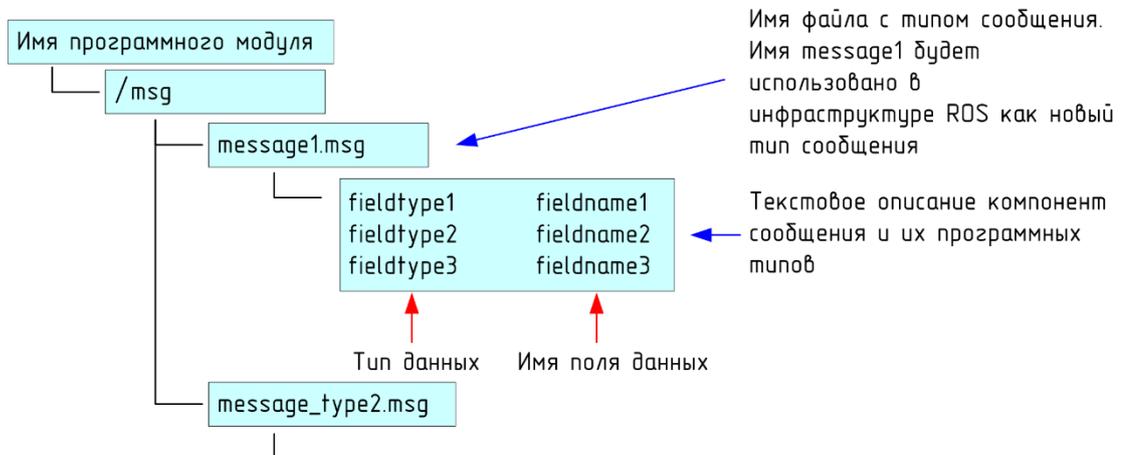


Рисунок 2.16 Место и структура файла описания сообщений программного модуля

4. Для организации информационного обмена в среде ROS в состав каждого программного модуля и его внутренних классов должны быть введены необходимые программные структуры (переменные, типы данных, методы), позволяющие оперировать компонентами передаваемых/принимаемых сообщений на этапе разработки программного обеспечения. В таблице 2.7 приведена структура программного кода модуля, принимающего информационные сообщения от задающего органа манипулятора и выполняющего элементарную обработку данного сообщения. В таблице выделены ключевые зоны программного кода синтезированного модуля, а именно: секция включения заголовочных файлов, секция объявления классов, секция инициализации классов, секция методов-обработчиков принимаемых сообщений.

Таблица 2.7 Синтезированный код программного модуля системы управления с методом-обработчиком сообщений от задающего органа

<pre>#include <ros/ros.h> #include <sensor_msgs/Joy.h> #include <sensor_msgs/JointState.h> #include <std_msgs/Int8.h> #include <std_msgs/String.h> #include <math.h> #include <iomanip> #include <iostream> using namespace std;</pre>	<p>Подключение необходимых заголовочных файлов</p>
<pre>class ControlJoystick { public: ControlJoystick(); private: void joyCallback(const sensor_msgs::Joy::ConstPtr& joy); ros::NodeHandle nh_; ros::Subscriber joy_sub_; ros::Publisher joy_out_publisher; };</pre>	<p>Объявление класса ControlJoystick, Введение конструктора класса, метода-обработчика принятых сообщений, объектов для приема и передачи сообщений</p>
<pre>ControlJoystick::ControlJoystick() { // создание приемника сообщений ROS, // подписка на topic "joy" // с вызовом метода "joyCallback" по приему // сообщения // в момент вызова ядро ROS регистрирует // программный модуль-приемник сообщений // указанного типа joy_sub_ = nh_.subscribe<sensor_msgs::Joy> ("joy", 10, &ControlJoystick::joyCallback, this);</pre>	<p>В конструкторе класса выполняется инициализация переменных (объектов) для приема и передачи сообщений определенного типа из/в указанных topic</p>

<pre>// создание передатчика сообщений ROS, // с типом sensor_msgs::Joy // в topic "joy_out" // в момент вызова ядро ROS регистрирует // программный модуль - источник сообщений joy_out_publisher = nh_.advertise<sensor_msgs::Joy>("joy_out", 1); }</pre>	
<pre>void ControlJoystick::joyCallback (const sensor_msgs::Joy::ConstPtr& joy) { // элементарная обработка входных сигналов // и формирование структуры для передачи // результатов вычисления sensor_msgs::Joy joy_out = joy; for (int i=0;i<joy_axes_count;i++) { if (joy_out.axes[i]<0.1) joy_out.axes[i]=0.0; } // передача (публикация) сообщения в topic // "joy_out" joy_out_publisher.publish(joy_out); }</pre>	<p>Функция, вызываемая по приему сообщения из topic "joy" и передающая сообщение в topic "joy_out"</p>
<pre>int main(int argc, char** argv) { // инициализация программного модуля ros::init(argc, argv, "joy_control"); // создание объекта класса ControlJoystick ControlJoystick control_joystick; // "запуск" модуля на выполнение ros::spin(); }</pre>	<p>Функция инициализации программного модуля</p>

Предлагаемая методика позволяет разработчику программных модулей системы управления в автоматизированном режиме формировать исходный код программных модулей ROS с организацией требуемой внутренней структуры, исходя из следующей входной информации: перечня имен информационных каналов, типов сообщений, перечня программных модулей и описания их взаимосвязи в табличном виде. Этапы автоматизированного синтеза предложенной методики приведены в таблице 2.8. С ее применением сформированы шаблоны всех программных модулей системы управления.

Таблица 2.8 Этапы методики автоматизированного синтеза программного кода модулей системы управления в инфраструктуре ROS

№ этапа	Наименование этапа	Описание этапа. Достижимый на этапе результат
1	Синтез наименований информационных каналов (topic)	<p>Разработчик программного кода системы управления формирует перечень информационных каналов и типов сообщений в виде текстового файла с указанием имени канала/сообщения, указания, является ли он стандартным или пользовательским сообщением в инфраструктуре ROS.</p> <p>Результат: файл <code><messages.list></code> с перечнем информационных каналов, их именами и типами</p>
2	Синтез перечня программных модулей (Nodes)	<p>Разработчик программного кода системы управления формирует перечень программных модулей с указанием имени модуля, используемого далее в инфраструктуре ROS.</p> <p>Результат: файл <code><nodes.list></code> с перечнем программных модулей</p>
3	Автоматический синтез файловой структуры программных модулей в рабочем пространстве ROS	<p>Автоматический синтаксический анализ (количество строк, несовпадение имен модулей) файла <code><nodes.list></code> и создание требуемой файловой структуры (папок, файлов) средствами ROS.</p> <p>Результат: файловая структура в рабочем пространстве ROS</p>
4	Автоматический синтез файлов с предварительной структурой сообщений (msg-файлы)	<p>Анализ исходного файла <code><messages.list></code> с перечнем информационных каналов, их типами, создание файлов <code><имя канала>.msg</code> во временной папке для каждого пользовательского типа сообщения.</p> <p>Результат: созданные msg-файлы</p>
5	Формирование структуры сообщения для каждого msg-файла	<p>Разработчик программного кода системы управления формирует структуру пользовательских сообщений, используя стандартные типа данных ROS или используя уже описанные структуры сообщений.</p> <p>Результат: сформированные msg-файлы</p>

Продолжение таблицы 2.8

6	Автоматическое формирование шаблона таблицы информационного взаимодействия программных модулей (матрицы типов сообщений)	<p>На основе файлов <code><nodes.list></code>, <code><messages.list></code> создается шаблон таблицы информационного взаимодействия в виде матрицы, где первый столбец содержит наименования информационных каналов, первая строка содержит наименования программных модулей.</p> <p>Результат: файл шаблон таблицы информационного взаимодействия <code><topics-nodes.list></code></p>
7	Заполнение таблицы информационного взаимодействия	<p>Разработчик программного кода системы управления заполняет таблицу информационного взаимодействия, указывая на пересечении строки-наименования информационного канала и столбца-наименования программного модуля является ли программный модуль источником информации для данного канала ("T"), либо приемником сообщений из данного информационного канала ("R"), либо не использует данный информационный канал в работе (поле оставляется пустым).</p> <p>Результат: заполненная таблица информационного взаимодействия <code><topics-nodes.list></code></p>
8	Автоматическое формирование шаблонов исходного кода программных модулей системы управления	<p>На основе заполненной таблицы (путем ее синтаксического анализа) в созданной на этапе 3 файловой структуре формируются файлы исходного кода (*.cpp, *.h) на основе шаблона (node.cpp, node.h), в которые инкапсулируются необходимые программные структуры:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Объекты класса <code>ros::Publisher</code> в объявлении класса с именем переменной, соответствующей имени информационного канала, если программный модуль является источником данного типа информационных сообщений. 2. Объекты класса <code>ros::Subscriber</code> в объявлении класса с именем переменной, соответствующей имени информационного канала, если программный модуль является получателем данного типа информационных сообщений. 3. Объявление и реализацию методов класса получения сообщений, с указанием необходимых аргументов (типа сообщения). 4. Инициализацию объектов <code>ros::Publisher</code>, <code>ros::Subscriber</code> в конструкторе класса.

Продолжение таблицы 2.8

		<p>5. Подключение заголовочных файлов (*.h) для каждого стандартного и пользовательского типа данных, используемого в данном программном модуле</p> <p>Результат: подготовленные исходные файлы для каждого программного модуля</p>
9	Автоматическое тестирование (компиляция) подготовленных программных модулей	<p>Выполняется тестовая компиляция (сборка) исполняемых файлов программных модулей системы управления.</p> <p>Результат: в случае корректного описания исходных файлов – отсутствие ошибок компиляции, в противном случае (наличие ошибок) необходим анализ результатов компиляции</p>

На рисунке 2.17 изображена структура межпроцессного обмена программных компонентов системы управления, полученная с применением вышеприведенной методики и выведенная в графическом виде утилитой ROS rqt_graph.

Результатом выполненного этапа является синтезированная программная архитектура системы управления, определен состав программный модулей, синтезирована методика автоматизированного формирования программного кода модулей системы управления.

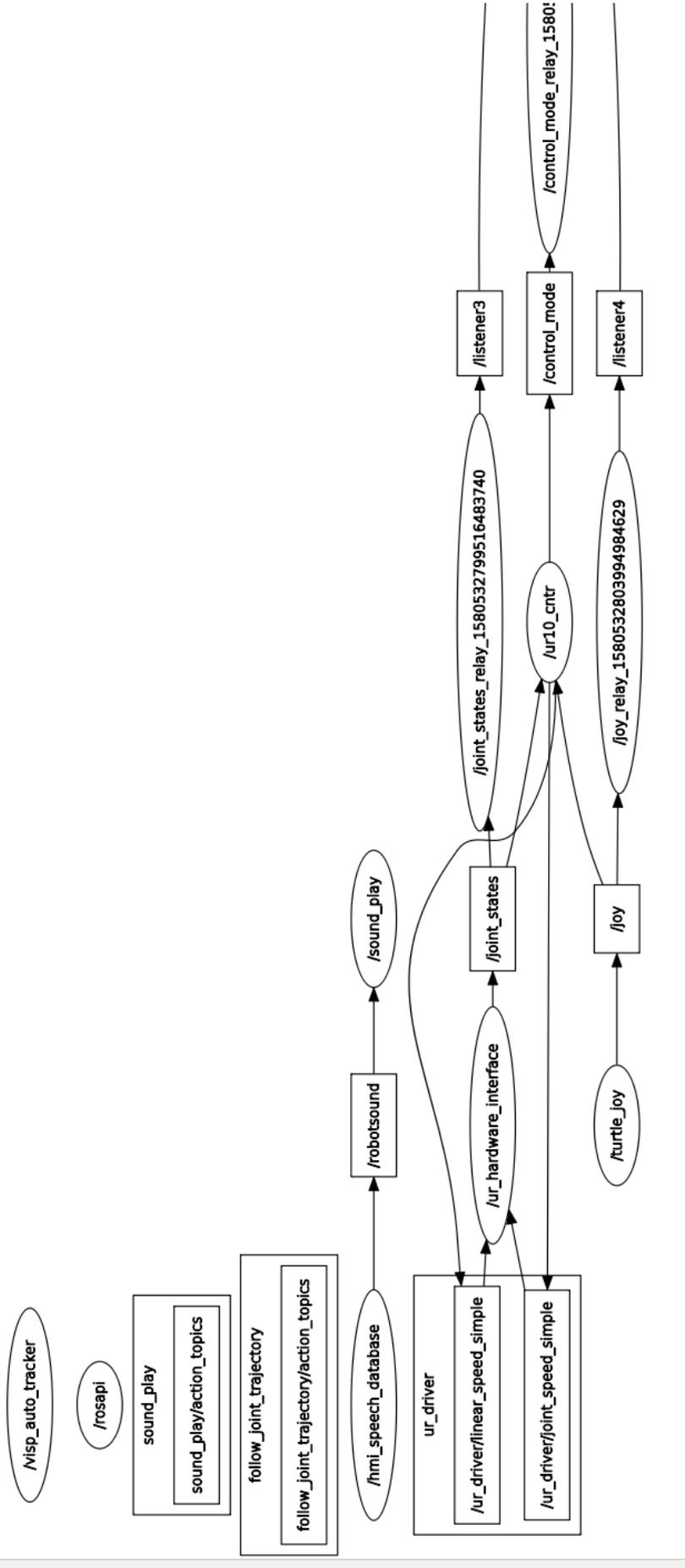


Рисунок 2.17 Схема информационного взаимодействия программных модулей системы управления, построенная ROS-утилитой rqt_graph по результатам выполнения шага 9

2.5 Синтез системы задающих органов человеко-машинного интерфейса

При проектировании человеко-машинного интерфейса системы управления в части задающих органов необходимо исходить из:

1. Двигательных возможностей оператора (его кинематических и сило-моментных ограничений) и возможностей расположения пульта управления относительно герметичной камеры;
2. Числа степеней подвижности объекта управления – исполнительного органа манипулятора;
3. Режимов управления объектом управления, способов переключения между режимами;
4. Необходимости и технической возможности реализации дополнительных каналов человеко-машинного интерфейса (дополнительные задающие органы, средства индикации и т.п.).

Как было отмечено в главе 1, для внутрикамерных манипуляторов наиболее оптимальным является способ управления путем механического перемещения задающих органов руками человека (как наиболее развитых средств воздействия в кинематическом смысле, при достаточных для выполнения управления тактильных возможностях). Общий принцип управления изображен на рисунке 2.18.

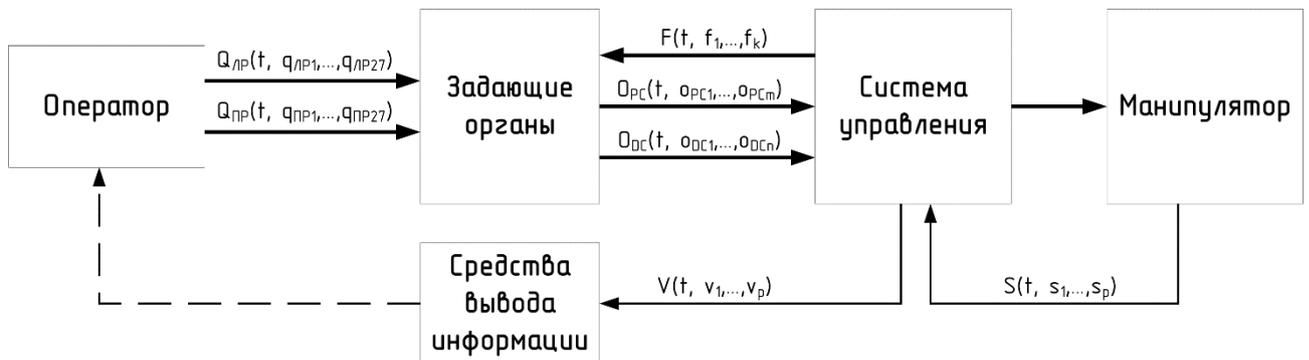


Рисунок 2.18 Общий принцип управления объектом от задающих органов при воздействиях оператора

На рисунке 2.18 введены следующие обозначения:

- $\left. \begin{array}{l} Q_{LP}(t, q_{LP1}, \dots, q_{LP27}) \\ Q_{PP}(t, q_{PP1}, \dots, q_{PP27}) \end{array} \right\}$ – векторы положения левой и правой рук оператора;
- $O_{PC}(t, o_{PC1}, \dots, o_{PCm})$ – вектор состояния m пропорциональных каналов задающих органов;
- $O_{DC}(t, o_{DC1}, \dots, o_{DCn})$ – вектор состояния n дискретных каналов задающих органов;

- $F(t, f_1, \dots, f_k)$ – вектор обратной связи от системы управления к задающим органам (силовые и/или моментные воздействия);
- $S(t, s_1, \dots, s_p)$ – вектор состояния манипулятора;
- $V(t, v_1, \dots, v_p)$ – вектор данных о состоянии СУ для визуализации оператору.

Исходя из перечня режимов управления, определенных в разделе 2.1 (рисунок 2.9), существуют две группы режимов автоматизированного управления: управление в обобщенных координатах манипулятора (ОКМ) и управление в декартовых прямоугольных координатах манипулятора (ДК), что накладывает несколько различные требования к количеству степеней подвижности ЗО. В частности, режимы управления в обобщенных координатах допускают одновременное управление движением по нескольким или всем ОКМ. При этом общее число независимых друг от друга пропорциональных выходных каналов m задающих органов определяет количество ОКМ, движение которыми можно выполнять синхронно. Здесь возможны следующие случаи:

1. $m \geq n$, т.е. число выходных пропорциональных каналов ЗО соответствует числу степеней подвижности манипулятора или является избыточным;
2. $m < n$, т.е. число выходных каналов меньше числа степеней подвижности манипулятора.

Для обеспечения управляемости манипулятора синхронно по всем степеням его подвижности **выполнен анализ существующих структурных и алгоритмических способов** (таблица 2.9):

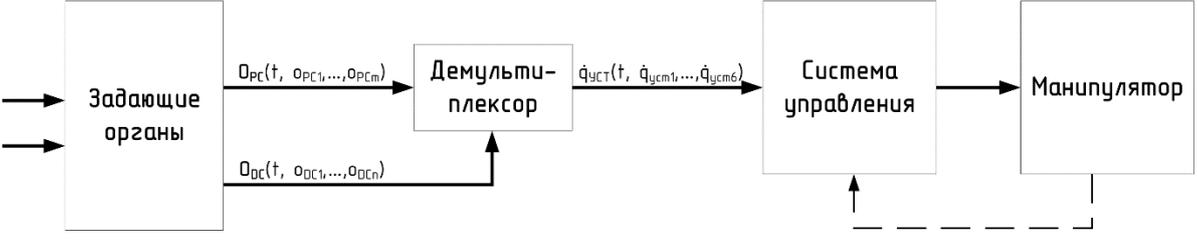
1. Замена исходного ЗО на ЗО с необходимым числом степеней подвижности;
2. Аппаратное увеличение количества пропорциональных выходных каналов в существующих задающих органах;
3. Мультиплексирование/демультиплексирование пропорциональных выходных каналов на определенные степени подвижности манипулятора в зависимости от состояния дискретных выходных каналов задающих органов (рисунок 2.19);
4. Использование нескольких задающих органов, сумма пропорциональных выходных каналов которых обеспечивает выполнение условия $m \geq n$.

В таблице 2.9 приведен анализ способов 1, 3, 4.

Таблица 2.9 Структурные и алгоритмические способы увеличения степеней свободы

Спо- соб	Описание способа
1	<p>Данный способ позволяет при применении единственного задающего органа обеспечить управление всеми степенями подвижности манипулятора (СПМ). Известны кинематические схемы и конструкции шестистепенных задающих органов типа «джойстик» с 3 линейными и 3 угловыми степенями подвижности. Использование подобных конструкций задающих органов оптимально для управления схватом манипулятора, т.к. при этом возможно одновременное его позиционирование и ориентирование, частично применимо для управления в пространстве обобщенных координат манипулятора, но с неоднозначностью между направлением отклонения задающего органа и характером движения манипулятора, что может вызвать затруднения в процессе управления. Вторым существенным недостатком можно отметить сложность в воспроизведении требуемого отклонения одной степени подвижности ЗО без нежелательных движений по другим степеням подвижности в силу его кинематической схемы, что, например, требует введения конструктивных элементов фиксации степеней подвижности и, следовательно, усложнения конструкции ЗО</p>
3	<p>Способ позволяет расширить число управляемых от данного ЗО степеней подвижности манипулятора за счет временного разделения интервалов управления той или иной степенью подвижности путем применения демультимплексирования сигналов управления. Данный подход позволяет без существенного усложнения конструкции ЗО обеспечить требуемую управляемость манипулятора. Однако данный подход имеет и недостаток: невозможность одновременного управления СПМ, на которые демультимплексируется степень подвижности задающего органа. Как и в случае 1 практически невыполнимо условие кинематической идентичности движения ЗО и манипулятора</p>

Таблица 2.9 (продолжение)

	 <p style="text-align: center;">Рисунок 2.19 Задающие органы со схемой демультимплексирования выходных пропорциональных каналов управления</p>
4	<p>Способ позволяет расширить число управляемых от данного ЗО степеней подвижности манипулятора за счет увеличения количества ЗО. При его применении должен быть сформирован определенный оптимум в эргономике рабочего пространства оператора без излишней избыточности количества ЗО и действий оператора</p>

Учитывая возможность оператора осуществлять управление двумя руками, а также разнообразие режимов управления и переходов между ними (рисунок 2.9), в данной работе **предлагается к использованию 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)).

Необходимо принять во внимание, что в связи с ограниченным диапазоном перемещений ЗО, управление внутрикамерным манипулятором оптимально выполнять по вектору скорости (в режиме УВСК), а управление по вектору положения (связывающему декартовы координаты схвата или обобщенные координаты манипулятора с отклонением ЗО) при необходимости осуществлять в ограниченных пространственных зонах.

При синтезе алгоритмов управления от ЗО в качестве исходной информации принимаем, что каждая степень подвижности ЗО имеет базовую линейную характеристику (зависимость выходного сигнала/значения от угла отклонения), приведенную на рисунке 1.10. Одним из возможных вариантов конструктивных компоновок и кинематических схем ЗО является предлагаемый в работе и представленный на рисунке 2.20 вариант.

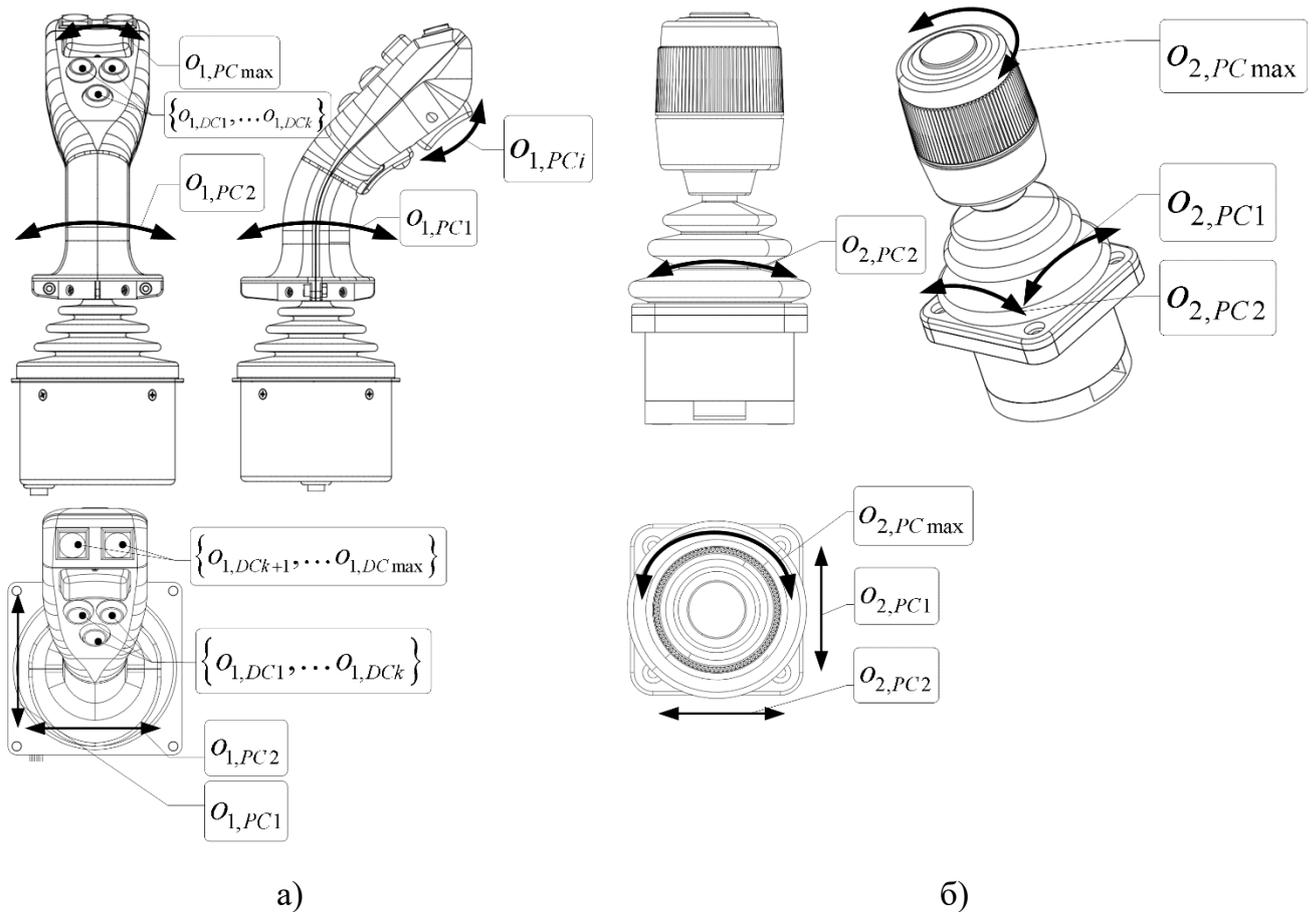


Рисунок 2.20 Многокоординатные задающие органы типа 1 (а) и типа 2 (б)

На рисунке 2.20 обозначены:

- $O_{1,PCi}, O_{2,PCi}$ – i -й выходной пропорциональный канал (обобщенная координата) 3О типа 1 и 3О типа 2 соответственно;
- $O_{1,PC max}, O_{2,PC max}$ – выходной пропорциональный канал с максимальным для данного типа 3О номером степени подвижности;
- $O_{1,DCi}, O_{1,DC max}$ – i -й и максимальный (по номеру) выходной дискретный канал (обобщенная координата) 3О типа 1 и типа 2.
- $O_{2,DCi}, O_{2,DC max}$

Для реализации многорежимного характера управления манипулятором предлагается комбинированный адаптивный алгоритм формирования обобщенных выходных координат задающего органа, с введенными в уравнение вычисления выходных управляющих воздействий матрицами оценки приближения вектора состояния манипулятора к граничным условиям и динамических коэффициентов передачи (2.57):

$$\mathbf{O}_{OUT}(t) = \begin{pmatrix} O_{OUT_1}(t) \\ \dots \\ O_{OUT_j}(t) \end{pmatrix} = \min\{\mathbf{C}\} \cdot \mathbf{K} \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{PC}(t) \\ \mathbf{O}_{DC}(t) \end{pmatrix} =$$

$$\min\{\mathbf{C}\} \cdot \begin{pmatrix} k_{S_1 O_{P1}} & k_{S_1 O_{P2}} & \dots & k_{S_1 O_{Pn}} & k_{S_1 O_{D1}} & k_{S_1 O_{D2}} & \dots & k_{S_1 O_{Dk}} \\ k_{S_2 O_{P1}} & k_{S_2 O_{P2}} & \dots & k_{S_2 O_{Pn}} & k_{S_2 O_{D1}} & k_{S_2 O_{D2}} & \dots & k_{S_2 O_{Dk}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{S_j O_{P1}} & k_{S_j O_{P2}} & \dots & k_{S_j O_{Pn}} & k_{S_j O_{D1}} & k_{S_j O_{D2}} & \dots & k_{S_j O_{Dk}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} O_{PC1}(t) \\ \vdots \\ O_{PCm}(t) \\ O_{DC1}(t) \\ \vdots \\ O_{DCk}(t) \end{pmatrix}, \quad (2.57)$$

где

- $O_{OUT}(t)$ – выходной вектор управляющих воздействий оператора;
- \mathbf{C} – матрица оценки приближения вектора состояния манипулятора к граничным условиям (матрица весовых коэффициентов);
- \mathbf{K} – матрица динамических коэффициентов передачи значений пропорциональных и дискретных каналов в вектор выходного управляющего воздействия;
- $k_{S_i O_{Pk}}, k_{S_i O_{Dk}}$ – динамические коэффициенты передачи k -го пропорционального (дискретного) канала управления джойстика в выходную i -ю обобщенную координату вектора O_{OUT} ;
- $\mathbf{O}_{PC}(t), \mathbf{O}_{DC}(t)$ – векторы (компоненты векторов) состояния (величин отклонения) задающих органов (пропорциональные и дискретные каналы, соответственно);
- $O_{PCi}(t), O_{DCi}(t)$

В общем случае $k_{S_i O_{Pk}}, k_{S_i O_{Dk}}$ зависят от времени, вектора состояния манипулятора, режима его работы, априорной информации, информации от систем контроля.

В формулах (2.58–2.60) для нескольких режимов приведены примеры базовых матричных вычислений при управлении манипулятором от задающих органов с суммарным числом степеней подвижности, равным 6, и наличием 6 дискретных каналов управления:

А. Вариант одновременного независимого управления шестью обобщенными координатами манипулятора:

$$\mathbf{O}_{OUT} = \min\{\mathbf{C}\} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{k}_{S,PC} & \mathbf{k}_{S,DC} \\ \mathbf{k}_{T,PC} & \mathbf{k}_{T,DC} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{PC} \\ \mathbf{O}_{DC} \end{pmatrix} =$$

$$\min\{\mathbf{C}\} \cdot \left(\begin{array}{cccccc|c} k_{S_1 O_{P1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ 0 & k_{S_2 O_{P2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & k_{S_3 O_{P3}} & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & k_{S_4 O_{P4}} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{S_5 O_{P5}} & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{S_6 O_{P6}} & \\ \hline & & & \mathbf{0}_{6 \times 6} & & & \mathbf{0}_{6 \times 6} \end{array} \right) \cdot \begin{pmatrix} O_{PC1} \\ O_{PC2} \\ O_{PC3} \\ O_{PC4} \\ O_{PC5} \\ O_{PC6} \\ O_{DC1} \\ O_{DC2} \\ O_{DC3} \\ O_{DC4} \\ O_{DC5} \\ O_{DC6} \end{pmatrix}; \quad (2.58)$$

Б. Вариант одновременного управления шестью обобщенными координатами манипулятора от пропорциональных каналов ЗО по включению соответствующих дискретных каналов управления ЗО:

$$\mathbf{O}_{OUT} = \min\{\mathbf{C}\} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{k}_{S,PC} & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{PC} \\ \mathbf{O}_{DC} \end{pmatrix} =$$

$$\min\{\mathbf{C}\} \cdot \left(\begin{array}{cccccc|c} k_{S_1 O_{P1}} O_{DC1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ 0 & k_{S_2 O_{P2}} O_{DC2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & k_{S_3 O_{P3}} O_{DC3} & 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & k_{S_4 O_{P4}} O_{DC4} & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{S_5 O_{P5}} O_{DC5} & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{S_6 O_{P6}} O_{DC6} & \\ \hline & & & \mathbf{0}_{6 \times 6} & & & \mathbf{0}_{6 \times 6} \end{array} \right) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{PC} \\ \mathbf{O}_{DC} \end{pmatrix}; \quad (2.59)$$

В. Вариант выборочного управления k обобщенными координатами манипулятора от пропорциональных каналов ЗО по включению определенных дискретных каналов управления с режимом демультиплексирования:

$$\mathbf{O}_{OUT} = \min\{\mathbf{C}\} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{k}_{S,PC} & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & \mathbf{0}_{6 \times 6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{PC} \\ \mathbf{O}_{DC} \end{pmatrix} =$$

$$\min\{\mathbf{C}\} \cdot \begin{pmatrix} \left(\begin{array}{cccccc|ccc} k_{S_1 O_{P1}} O_{DC1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{S_1 O_{P1}} O_{DC1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{S_4 O_{P4}} O_{DC4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \hline & & & & & & & & & \mathbf{0}_{6 \times 6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{O}_{PC} \\ \mathbf{O}_{DC} \end{pmatrix}. \quad (2.60)$$

Интерпретация индивидуальных компонент вектора \mathbf{O}_{OUT} выполняется в алгоритме функционирования системы управления исходя из режима управления.

С целью повышения эффективности управления манипулятором в автоматизированном режиме в матрично-векторное выражение вычисления управляющих воздействий (2.57) введена матрица оценки граничных условий \mathbf{C} . Элементы данной матрицы являются весовыми коэффициентами оценки приближения компонент 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 движения (вращения) в кинематических парах $(C_{2,1}, \dots, C_{2,n})$;
3. Текущей дистанции от схвата и промежуточных сочленений манипулятора до внутренних препятствий $(C_{3,1}, \dots, C_{3,n})$;
4. Степени приближения манипулятора к вырожденным конфигурациям C_4 (требуется при управлении в пространстве декартовых координат);

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{1,1} & \dots & C_{1,n} \\ C_{2,1} & \dots & C_{2,n} \\ C_{3,1} & \dots & C_{3,n} \\ C_4 & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad C_{i,k} \in [0 \dots 1], \quad \forall i, k \quad (2.61)$$

n – число степеней подвижности

Соответствующие алгоритмы контроля состояния манипулятора формируют значение весового коэффициента $C_{i,k}$ таким образом, чтобы при наступлении некоторых пороговых

ограничений (входе в зону безопасности) значение величины $C_{i,k}$ уменьшалось до требуемого значения и оставалось равным единице в противном случае (при нормальных условиях эксплуатации) (рисунок 2.21).

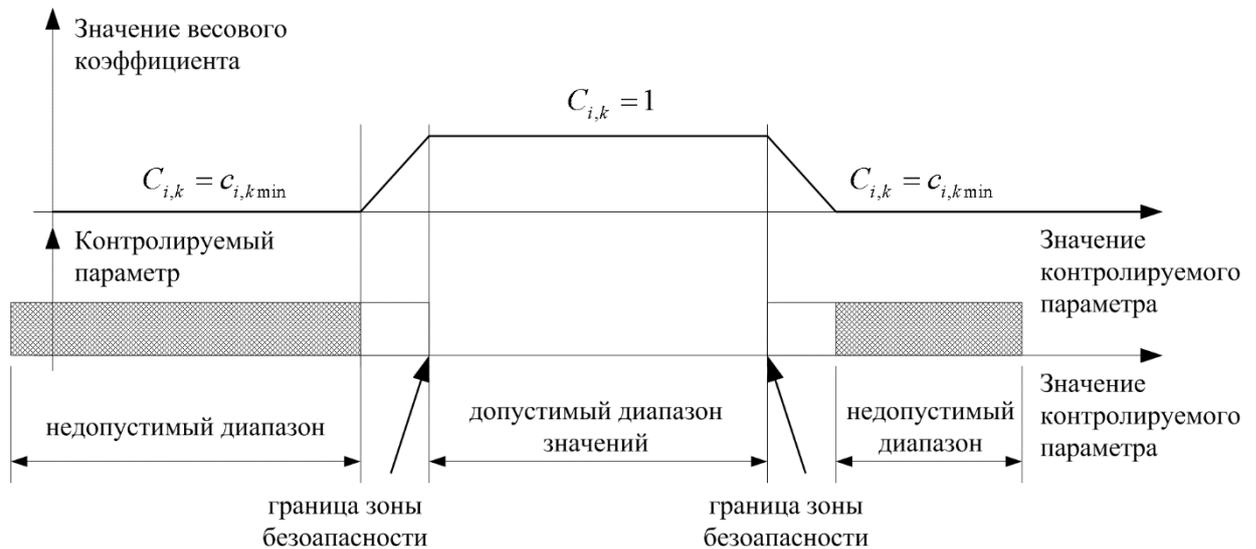


Рисунок 2.21 Графическое представление функции формирования коэффициента $C_{j,k}$. Вычисление выходного управляющего воздействия выполняют по критерию минимального значения матрицы C : $\min_{\substack{j=1\dots k \\ k=1\dots n}} \{C_{j,k}\}$, т.е. при одновременном наступлении нескольких ограничений выбирается приоритетный по условию минимального значения весового коэффициента. При этом информация о наступлении условий по остальным критериям должна быть донесена до системы управления и оператора.

Для повышения надежности и удобства управления манипулятором от ЗО вышеуказанных типов в алгоритмы (структуру) СУ предлагается ввести блоки контроля и коррекции входных векторов состояния ЗО (рисунок 2.22). Блок контроля входных данных осуществляет контроль нахождения всех компонент вектора состояния в заданном диапазоне, исключает возможность скачкообразного изменения состояния ЗО, блокирует управляющие отклонения ЗО при его нахождении в нейтральном положении в течении заданного интервала времени, а также выполняет ряд дополнительных сервисных функций.

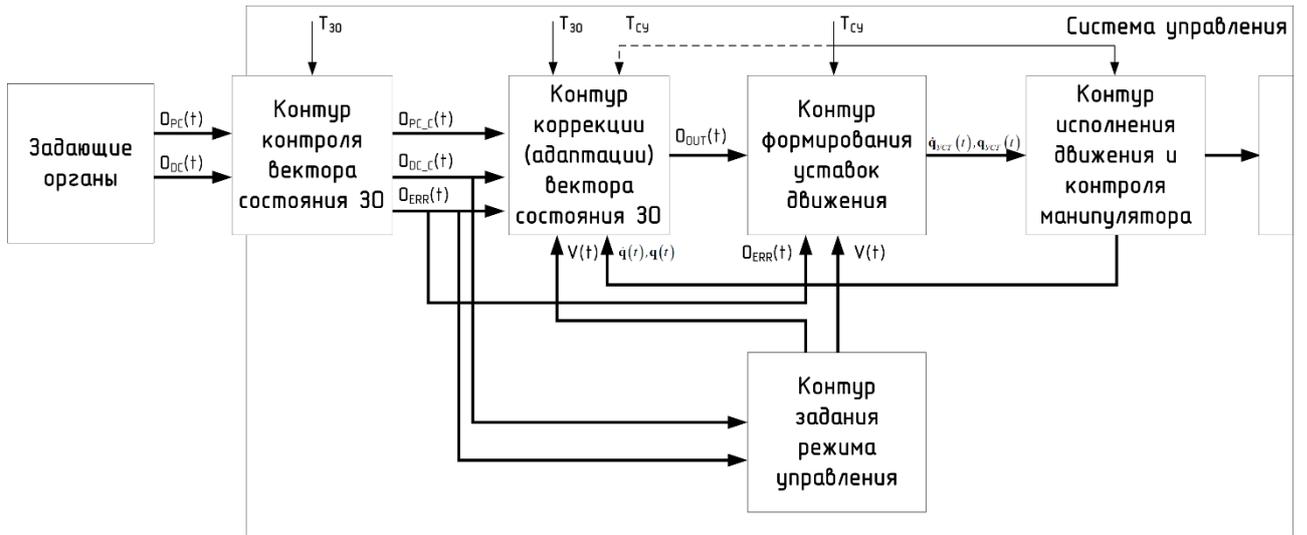


Рисунок 2.22 Блоки контроля и коррекции вектора состояния 3D в структуре СУ

Обобщенная блок-схема алгоритма обработки, контроля и коррекции вектора состояния 3D приведена на рисунке 2.23.

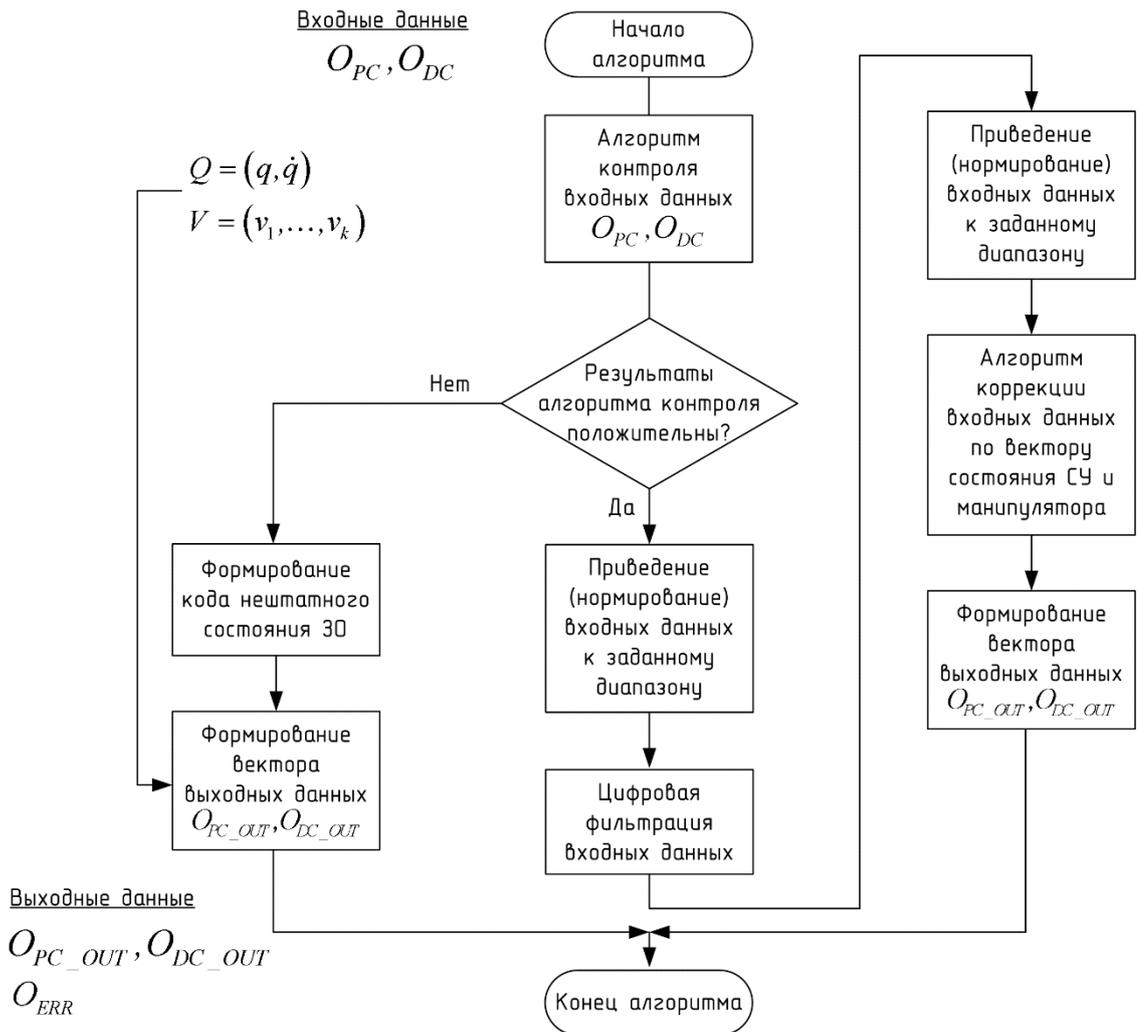


Рисунок 2.23 Алгоритм контроля и коррекции вектора состояния 3D

В работе предлагается следующий **алгоритм контроля входных данных** (состояния ЗО), реализованный в программном модуле адаптации характеристик задающих органов [47]:

Входные данные	<p>O_{PC}, O_{DC} – измеренные значения вектора состояния ЗО (пропорциональные и дискретные каналы, их оцифрованные, дискретизированные значения).</p> $O_{PC_LIMITS} = \begin{pmatrix} o_{i1,min} & o_{i1,max} \\ \vdots & \vdots \\ o_{im,min} & o_{im,max} \end{pmatrix}$ – матрица минимальных и максимальных значений компонент вектора состояния ЗО для каждой степени подвижности
Внутренние переменные	<p>$idle = \{true, false\}$ – логический признак нейтрального положения ЗО; $time_{idle}$ – количество тактов нахождения ЗО в нейтральном положении; $fast$ – переменная-счетчик</p>
Шаг 1	<p>Выполнить проверку:</p> $o_{i,min} \leq o_i \leq o_{i,max}, \quad \forall i$ <p>При невыполнении условия: занести номер компонента вектора в массив номеров недостоверных данных, в векторе O_{ERR} сформировать код ошибки по выходу за диапазон значений. В выходном векторе сформировать нулевые значения</p> $O_{PC} = (0, 0, \dots, 0)^T$ <p>Перейти к шагу 6</p>
Шаг 2	<p>Выполнить логическое вычисление</p> $idle = \prod_{i=1}^m (o_i < \delta_1), \quad \forall i,$ <p>где δ_1 - пороговая величина зоны нечувствительности.</p> <p>При значении $idle$, равном «истине», инкрементировать переменную $time_{idle}$, в противном случае выполнить $time_{idle} \leftarrow 0$</p>
Шаг 3	<p>Выполнить логическую проверку</p> $time_{idle} > time_{LIMIT}.$ <p>При выполнении условия: сформировать нулевые значения в выходном вектор</p> $O_{PC_C} = (0, 0, \dots, 0)^T.$ <p>В векторе O_{ERR} сформировать код ошибки по превышению времени нахождения в нейтральном положении.</p>

Перейти к шагу 6	
Шаг 4	<p>Выполнить контроль нахождения скорости изменения состояния ЗО в допустимых пределах путем вычисления:</p> $fast \leftarrow 0;$ $fast = \sum_{i=1}^m o_i(k) - o_i(k-1) > \delta_{2MAX},$ <p>где $o_i(k)$ – компонента вектора состояния на текущем цикле работы алгоритма; $o_i(k-1)$ – компонента вектора состояния на предыдущем цикле работы алгоритма; δ_{2MAX} – пороговая (предельная) величина допустимой скорости отклонения ЗО.</p> <p>При выполнении логического условия $fast > 0$: сформировать нулевые значения в выходном векторе</p> $O_{PC_C} = (0, 0, \dots, 0)^T;$ <p>в векторе O_{ERR} сформировать код ошибки по превышению скорости изменения положения ЗО. Перейти к шагу 6</p>
Шаг 5	<p>Сформировать выходные векторы:</p> $O_{PC_C} \leftarrow O_{PC},$ $O_{DC_C} \leftarrow O_{DC},$ $O_{ERR} \leftarrow 0$
Шаг 6	Конец алгоритма
Выходные значения	<p>O_{PC_C} – вектор состояния пропорциональных каналов управления O_{DC_C} – вектор состояния дискретных каналов управления O_{ERR} – вектор состояния ЗО (код ошибки).</p>

С целью повышения эффективности управления манипулятором в автоматизированном режиме управления, статическую характеристику «отклонение задающего органа» – «выходной сигнал задающего органа» **требуется корректировать** с учетом индивидуальных особенностей оператора, решаемой технологической задачи и кинематической конфигурации манипулятора. Данной коррекцией достигаются следующие цели:

1. Повышение чувствительности (тактильных ощущений) оператора к перемещению задающего органа в зоне малых скоростей манипулятора;

2. Учет индивидуальных психо-физических особенностей оператора (времени реакции, величины ответной реакции – соответствующего перемещения задающего органа) при эксплуатации манипулятора;
3. Снижение риска ударов конструктивными элементами манипулятора о внутрикамерное оборудование и стенки герметичной камеры при наличии априорной информации.

На рисунке 2.24 графически представлены варианты адаптации (модификации) задающего органа: а) изменение коэффициента пропорциональности, введение зоны нечувствительности; б) введение зоны насыщения (в пределе – до релейного характера характеристики); в) формирование кусочно-линейного характера характеристики по N точкам.

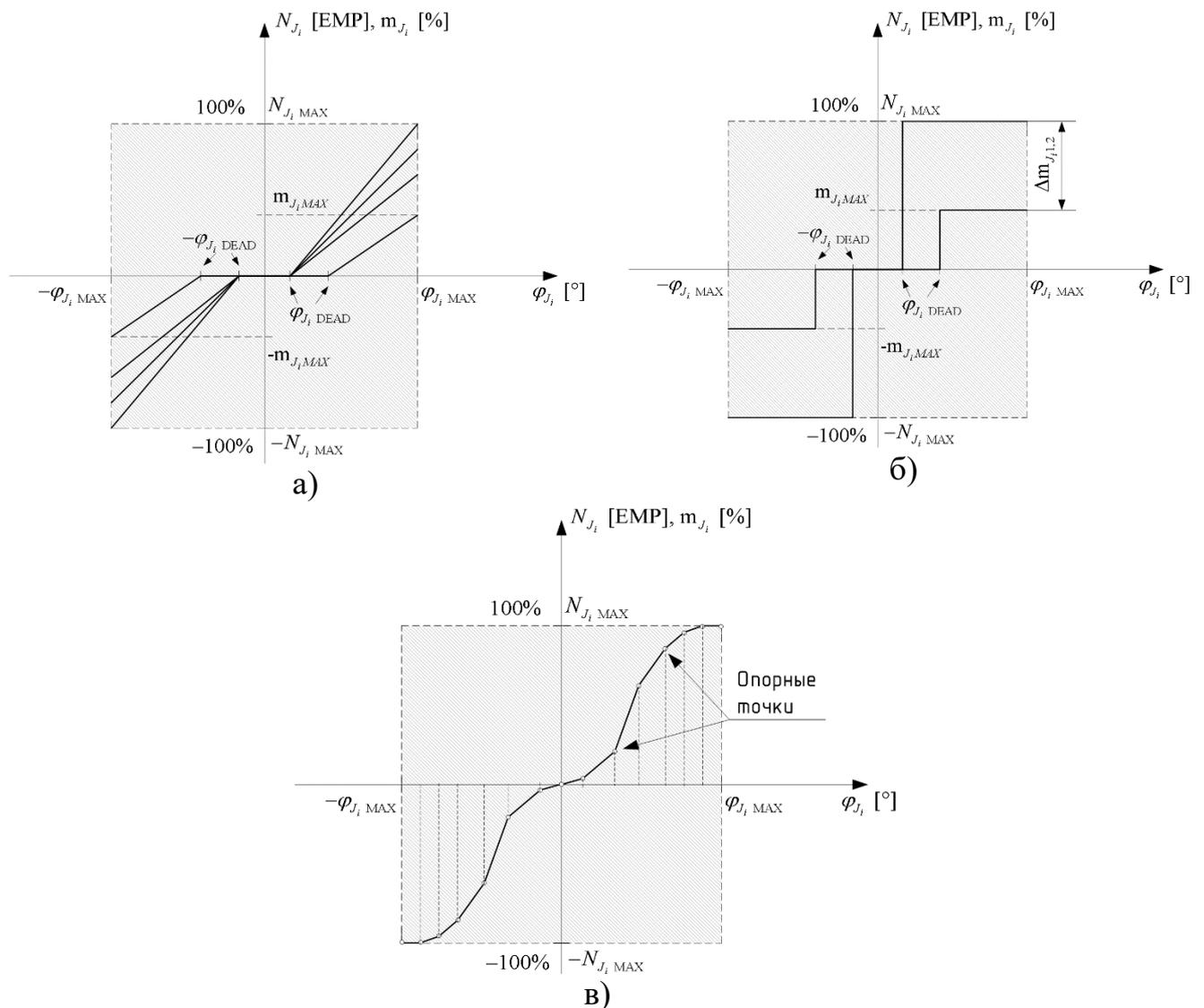
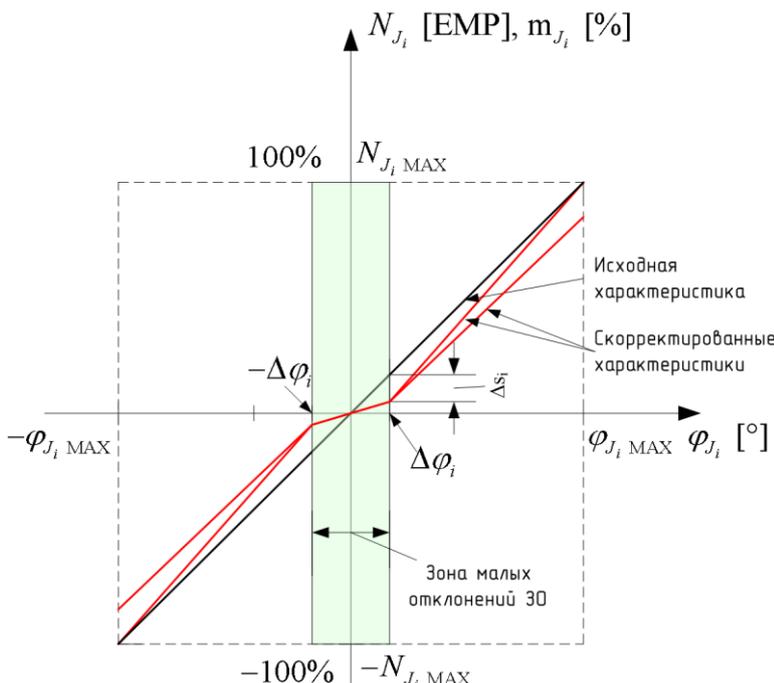


Рисунок 2.24 Варианты адаптированных характеристик задающего органа

Алгоритм адаптации характеристики ЗО в зоне малых отклонений построен следующим образом:

Шаг 1	<p>На тренажерно-моделирующем комплексе, имитирующем работу манипулятора, выполняется регистрация действий оператора при выполнении типовых операций.</p> <p>По каждой управляемой координате выбирается начальная величина зоны малых отклонений ЗО:</p> $\Delta\varphi_i \leftarrow 0.1\varphi_{MAX}$ <p>(начальное значение зоны малых отклонений – 10%)</p>
Шаг 2	<p>По каждой управляемой координате ЗО выполняется поиск интервалов, в течении которых величина отклонения ЗО не выходит за границу зоны малых отклонений</p> $\left o_i \left[t_{mini,j}; t_{maxi,j} \right] \right < \Delta\varphi_i, \quad \forall i,$ <p>где $t_{mini,j}, t_{maxi,j}$ - время начала и окончания интервала j, в течении которого i-я координата o_i ЗО не превышает границу зоны малых отклонений</p>
Шаг 3	<p>На каждом полученном в шаге 2 интервале $j_i \in [0; j_{i\ max}]$ выполняется осредненная оценка количества локальных экстремумов \hat{k}_i (каждый экстремум соответствует «перекладке» направления движения джойстика по координате i, что соответствует оценке оператором движения манипулятора с повышенной скоростью и реакцией оператора по ее уменьшению).</p> <p>При превышении величины \hat{k}_i пороговой величины k_{max} принимается решение о снижении на участке $[-\Delta\varphi_i; \Delta\varphi_i]$ коэффициента передачи статической характеристики на величину Δs_i.</p> 

Шаг 4

Выполняется итеративное выполнение шагов 1-3 с изменением величин $\Delta\varphi_i$ до достижения требуемых критериев качества реакции оператора

Аналогичным образом функционирует алгоритм в зоне максимальных отклонений, при этом выполняется оценка длительности нахождения рукоятки задающего органа в ее максимальном отклонении. При превышении данной длительности некоторой предельной величины (что интерпретируется как недостаточность величины управляющего воздействия) принимается решение о увеличении коэффициента передачи статической характеристики.

Для применения адаптированных характеристик ЗО разработан программный модуль [47] работы с базой данных статических характеристик ЗО, входящий в систему хранения настроек и параметров СУ. На рисунке 2.25 приведена архитектура таблиц системы управления базой данных (СУБД) для хранения статических характеристик задающих органов.



Рисунок 2.25 Структура таблиц хранения статических характеристик ЗО в СУБД СУ

На этапе подготовки к работе система управления по исходным данным о типе задающего органа и идентификаторе оператора из таблицы «Характеристики ЗО» для каждой

степени подвижности задающего органа выполняет считывание массива опорных точек и далее использует его для формирования выходных значений путем кусочно-линейной интерполяции.

Введение подрежима управления «Регистрация траектории» позволяет оператору выполнять управление манипулятором в любом из автоматизированных режимов с одновременным автоматическим или автоматизированным формированием массива мгновенных значений вектора состояния манипулятора и с последующей регистрацией данных массивов в СУБД СУ с назначаемым оператором номером траектории.

Предлагается следующий алгоритм регистрации траектории:

Шаг 1	Оператор формирует кинематическую конфигурацию манипулятора, соответствующую начальной точке траектории \mathbf{q}^0
Шаг 2	<p>С помощью технических средств человеко-машинного интерфейса на пульте оператора (сенсорного экрана) выбираются и задаются следующие данные:</p> <ul style="list-style-type: none"> – способ регистрации промежуточных точек траектории: автоматический или автоматизированный (по команде оператора). Для автоматического режима формируется период дискретизации точек траектории $T_{\text{ТРАЕКТ}}$ с заданным по умолчанию или введенным оператором значением; – порядковый номер траектории; – наименование траектории
Шаг 3	Включается режим «Регистрация траектории» с помощью назначенного на данную функцию дискретного канала управления ЗО
Шаг 4	<p><u>Для автоматического способа регистрации промежуточных точек:</u></p> <p>Для момента времени $n \cdot T_{\text{ТРАЕКТ}}$ по датчикам манипулятора регистрируется вектор состояния манипулятора</p> $\mathbf{S}^n(n \cdot T_{\text{ТРАЕКТ}}) = \begin{pmatrix} n \cdot T_{\text{ТРАЕКТ}} \\ \mathbf{q}^n = \mathbf{q}(n \cdot T_{\text{ТРАЕКТ}}) \\ \dot{\mathbf{q}}^n = \dot{\mathbf{q}}(n \cdot T_{\text{ТРАЕКТ}}) \end{pmatrix},$ <p>где n – номер такта отсчета шага регистрации.</p> <p><u>Для автоматизированного способа регистрации промежуточных точек:</u></p> <p>В момент формирования управляющего воздействия по назначенному на данную функцию дискретному каналу управления ЗО выполняется регистрация вектора состояния манипулятора</p> $\mathbf{S}^i(t) = \begin{pmatrix} t_i \\ \mathbf{q}(t_i) \\ \dot{\mathbf{q}}(t_i) \end{pmatrix},$ <p>где t_i – момент времени включения дискретного канала управления.</p>

	Шаг 4 выполняется до тех пор, пока режим «Регистрация траектории» не будет отключен
Шаг 5	Осуществляется SQL-запрос к СУБД СУ манипулятора с передачей в СУБД метаданных выполненной траектории (идентификатор оператора, дата и время регистрации, номер манипулятора и т.д.) совместно с массивом $\mathbf{S}(n \cdot T_{\text{ТРАЕКТ}}), \mathbf{S}(t)$. С целью оптимизации времени готовности СУ к последующему воспроизведению зарегистрированной траектории, на данном шаге предлагается осуществлять расчет и регистрацию в СУБД коэффициентов полиномов программной траектории согласно алгоритму расчета, описанному в 2.3.7
	Конец алгоритма

Режим «Воспроизведение траектории» позволяет оператору и системе управления в автоматическом режиме сформировать последовательность прохода опорных точек траектории, выбранной из СУБД ранее зарегистрированных траекторий.

Предлагается следующий алгоритм воспроизведения траектории:

Шаг 1	Оператор переводит СУ в режим «Воспроизведение траектории» путем включения назначенного на данную функцию дискретного канала ЗО
Шаг 2	СУ выполняет SQL-запрос к СУБД, формирующий список ранее записанных траекторий. Оператор с помощью средств человеко-машинного интерфейса выбирает номер требуемой траектории
Шаг 3	Выполняется синтез линейной траектории перевода схвата манипулятора от текущей его конфигурации к начальной точке выбранной траектории. Синтез выполняется согласно алгоритму, описанному в разделе 2.3.7. Информация о готовности СУ к подведению манипулятора к начальной точке траектории выводится оператору
Шаг 4	Оператор инициирует подвод манипулятора к начальной точке траектории путем включения назначенного на данную функцию дискретного канала ЗО, визуально и с помощью технических средств осуществляя контроль движения манипулятора
Шаг 5	При достижении допустимой окрестности начальной точки траектории система управления формирует информационное сообщение о готовности к исполнению траектории
Шаг 6	Оператор инициирует движение манипулятора к конечной точке траектории путем включения назначенного на данную функцию дискретного канала ЗО, визуально и с помощью технических средств осуществляя контроль движения манипулятора
Шаг 7	При достижении допустимой окрестности конечной точки траектории система управления формирует информационное сообщение об окончании воспроизведения траектории.
	Конец алгоритма

Результатом выполненного этапа является синтезированный способ комбинированного управления манипулятором от двух задающих органов типа «многокоординатный

джойстик» в автоматизированном и автоматическом режимах работы (регистрация и воспроизведение траектории), предложен способ адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающего органа, 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 манипулятора.

2.6 Синтез алгоритмов автоматизированного позиционирования схвата манипулятора с применением системы технического зрения

Системы технического зрения в настоящее время являются одними из главных источников информации для систем управления движением в условиях, когда объём априорной информации недостаточен для принятия решения о дальнейших действиях и, следовательно, необходим анализ внешней обстановки в режиме реального или близкого к реальному времени. Однако, широкому использованию СТЗ в технических комплексах в целом препятствуют объективные трудности внедрения зрительного информационного канала в контуры систем управления. Указанные трудности связаны со следующими проблемами [54, 69, 101]:

1. Проблема преобразования визуальной информации в данные результатов распознавания;
2. Проблема синтеза алгоритмов преобразований, обусловленная отсутствием универсальных алгоритмов решения задач зрительного распознавания объекта. Для каждой задачи СТЗ и в каждой конкретной ситуации фотометрических и траекторных условий оптимален лишь некоторый конкретный алгоритм, причём даже слабое изменение обрабатываемой зрительной сцены может потребовать смены используемого алгоритма преобразования фотометрического сигнала. Это вызывает необходимость обеспечения алгоритмической полноты и структурной устойчивости решения задач технического зрения на множестве возможных ситуаций и траекторий движения;
3. Проблема конструктивных недостатков технической реализации СТЗ, вызванная ограничениями динамических диапазонов свето- и цветопередачи, вопросами дискретности фотоприёмников, несовершенством оптического канала, ошибками калибровочных характеристик и временных привязок потока видеоданных;

4. Проблема условий эксплуатации, обусловленная как диапазоном климатических факторов, так и сопряженными факторами, например, влиянием химически агрессивных сред, ионизирующих излучений на оптическую систему и фоточувствительные элементы первичных видеопреобразователей.

Необходимость применения СТЗ в контуре управления внутрикамерными манипуляторами обусловлена следующими факторами:

1. Недостаточным обзором внутрикамерного пространства с рабочего места оператора вследствие применения толстостенных защитных стекол, имеющих тенденцию к изменению своих оптических свойств, помутнению;
2. Необходимостью детального наблюдения за объектами манипулирования при выполнении операций наведения схвата, взятия и отпускания объектов, особенно при взаимодействии с межкамерной транспортной системой;
3. Возможностью автоматизации операций подведения схвата манипулятора к объекту манипулирования, что позволяет уменьшить человеческий фактор и время выполнения этапов захвата и отпускания объекта;
4. Возможностью введения автоматического учета нахождения технологической тары и материалов на отдельных этапах технологического процесса.

Интеграция технологических, производственных данных в единую информационную среду предприятия в большинстве случаев дает возможность оценки текущего состояния производственного цикла, соотнесения с планом, формирования промежуточных и итоговых отчетов, выявления «узких мест» производственной цепочки, реализации аналитических и прогнозных функций. Специфика предприятий атомной промышленности накладывает дополнительные требования к учету времени начала и окончания отдельных технологических операций, учету целостности и места нахождения технологической тары и материалов.

Одним из ключевых факторов реализации данных задач является способ идентификации исходных, промежуточных и итоговых объектов и средств производства и синтез систем идентификации и интеграции с автоматизированными информационными системами предприятия. Существующие идентификационные системы на базе передачи радиосигналов (в частности, RFID) в условиях предприятий атомной промышленности фактически неприменимы из-за слабой стойкости электроники к действию ионизирующих излучений и ограничениям на использование беспроводных каналов передачи данных.

В связи с вышеизложенным, в рамках синтеза подсистемы технического зрения, как части системы управления, в работе **предлагается способ комбинированного применения системы технического зрения и подходы** для решения следующих задач:

1. Оперативного наблюдения за рабочим пространством манипулятора;
2. Идентификации объектов, маркированных оптически распознаваемыми метками;
3. Автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора по информации от СТЗ;
4. Информационного обмена с системой управления манипулятором и системами АСУ ПП.

Условия эксплуатации стационарных радиационно-стойких манипуляторов, функционирующих в условиях герметичных камер, накладывают ряд ограничений на структуру, аппаратный состав СТЗ, ее пространственную конфигурацию и технические средства защиты от внешних воздействий. Одним из основных параметров СТЗ в данном случае является обеспечение требуемого ресурса работы ее компонентов в условиях радиационных полей. На сегодняшний день первичные преобразователи изображения для систем технического зрения, работающие в радиационных полях, строятся на передающих телевизионных трубках с накоплением заряда (видиконах) либо полупроводниковых светочувствительных матрицах. Математические модели, в частности, модель Митчелла [100], уточненная и подтвержденная многочисленными экспериментальными исследованиями, выражает ряд зависимостей полупроводниковых структур от типа и мощности ионизирующего излучения, интегральной дозы облучения и ряда других параметров. В практическом аспекте эксплуатация видеокамер в условиях радиационных полей с чувствительными матрицами, построенными на МОП-структурах, приводит к постепенной необратимой деградации изображения, появлению эффекта «снега», и, с течением времени, полной потере фоточувствительности матрицы. Оптические свойства объективов видеокамер при нахождении в зоне действия ионизирующих излучений также деградируют. Способы уменьшения влияния радиационных излучений общеизвестны и выражаются в снижении поглощаемой дозы путем экранирования, уменьшении времени нахождения объекта в радиационном поле, увеличении расстояния от источника излучения. Особенностью эксплуатации оборудования в условиях герметичных камер является постоянное влияние среды камеры на фактически неизвлекаемые из рабочей зоны камеры элементы и си-

стемы, что делает невозможным защиту расстоянием и временем. Таким образом, единственно возможным способом является защита экранированием (отражено на рисунке 2.26 как «Средства защиты»).

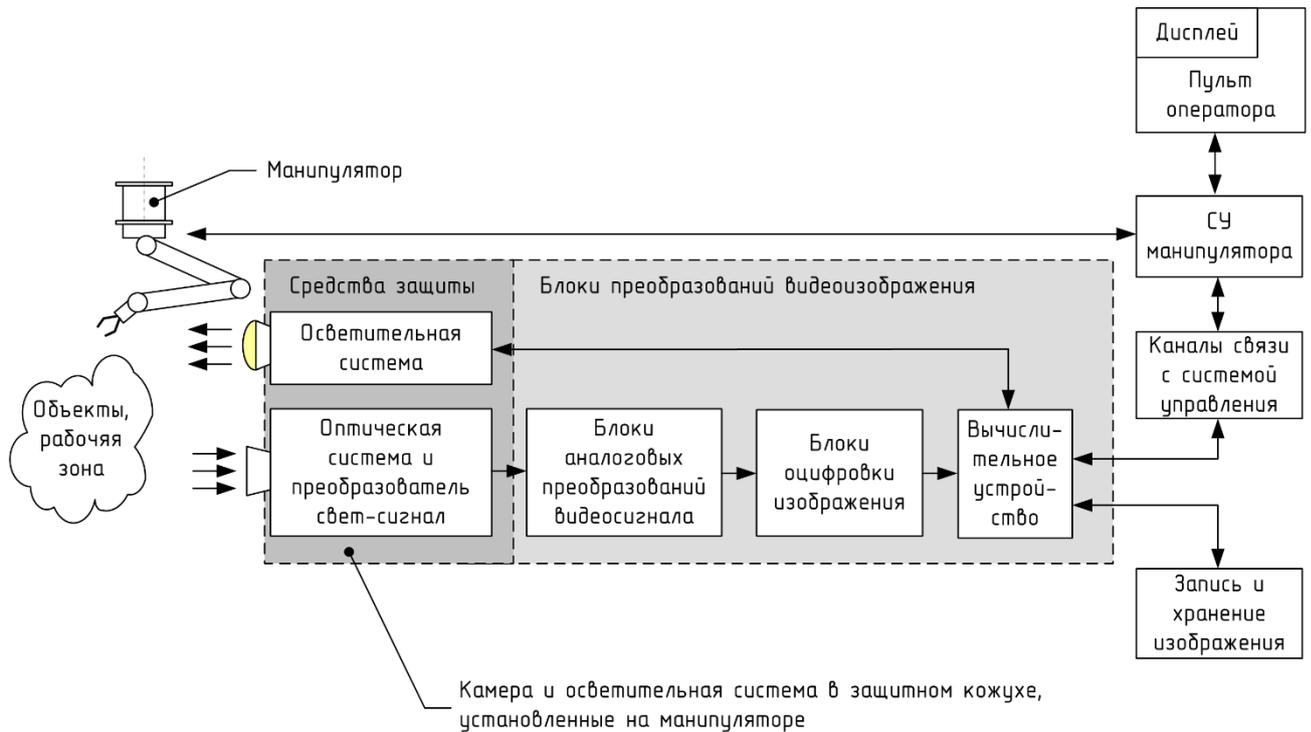


Рисунок 2.26 Структура СТЗ внутрикамерного манипулятора, оборудованная средствами защиты

Одним из вариантов дополнительной защиты оптической системы, фоточувствительной матрицы и электронных узлов видеокамеры является **предлагаемый способ** [35] экранирования входного отверстия видеокамеры внешним поворотным экраном с электроприводом (рисунок 2.27), а также позиционирование манипулятора в зону «парковки» в кинематической конфигурации, минимизирующей влияние локальных источников ионизирующего излучения на входную оптическую группу. При выполнении операций, не требующих использования СТЗ, поворотный экран (поз. 4, рисунок 2.28) перекрывает входное отверстие камеры, защищая таким образом оптическую систему. При необходимости, по команде от системы управления манипулятором, экран с помощью электропривода (поз. 6, рисунок 2.27) переориентируется (рисунок 2.27 б).

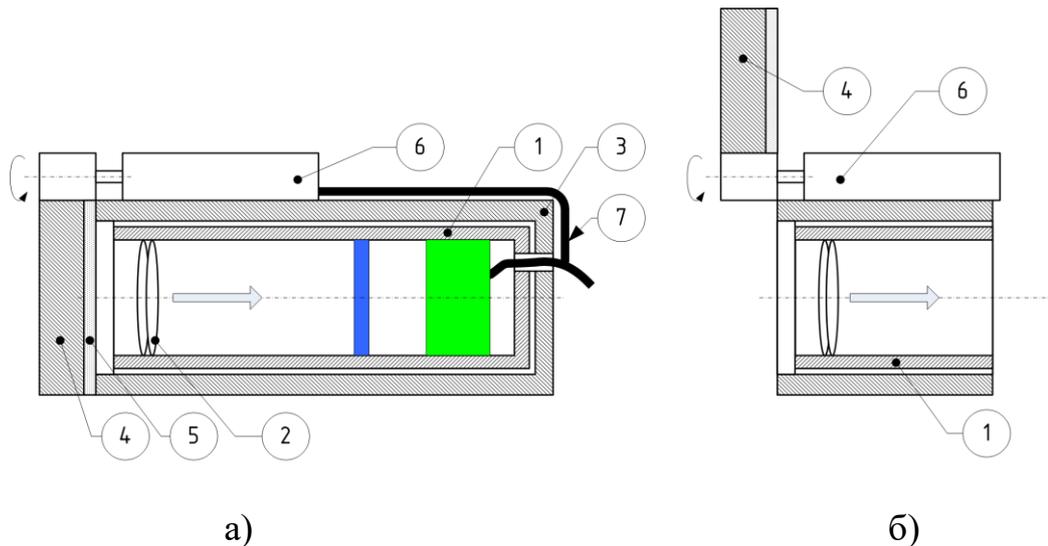


Рисунок 2.27 Организация экранирования видеокамеры дополнительным поворотным защитным экраном

На рисунке 2.27 обозначены:

- 1 – корпус видеокамеры;
- 2 – оптическая система видеокамеры;
- 3 – внешний защитный кожух;
- 4 – дополнительный поворотный защитный экран;
- 5 – щетка очистки защитного стекла видеокамеры;
- 6 – электропривод поворота защитного экрана;
- 7 – кабель питания и информационного обмена.

С целью реализации алгоритмов автоматизированного подведения схвата к объекту наблюдения/манипулирования **предлагается использование системы маркирования объектов двумерными оптическими идентификационными метками по стандарту ISO/IEC/ГОСТ 18004:2015 (QR-код) [35].** Двумерные оптические коды в общем случае представляют собой матрицу монохромных пикселей и ряда дополнительных структурных зон на изображении. Около 80% общеизвестных двумерных оптических кодов позволяют выполнять их идентификацию при произвольной пространственной ориентации [104], оставшиеся, в том числе QR-код, имеет структурные зоны, позволяющие осуществить измерение и вычисление положения и ориентации маркерной метки относительно видеокамеры (рисунок 2.28). Ключевыми особенностями QR-кода являются:

1. Наличие поисковых узоров в углах изображения с фиксированными соотношениями внутренних зон и нескольких синхронизирующих зон по всему коду позволяют нормализовать размер изображения и его ориентацию, а также угол, под которым видеосенсор расположен к поверхности изображения;
2. Использование в штрих-кодах циклических кодов Рида-Соломона (кодов коррекции), позволяет выполнять гарантированное декодирование первичной информации при потере до 30% визуальной информации из зоны данных [104].

Минимальный геометрический размер данного кода 21x21 модуль (версия 1) при наивысшем уровне коррекции обеспечивает хранение 17 десятичных цифр, либо строки из 10 символов, либо до 7 байт информации. С увеличением номера версии (размера кода в модулях), количество хранимой информации возрастает, и для версии 40 (177x177 модулей) может доходить до 4 кБайт информации. На данный момент использование QR-кодов размерностью 21x21 модуль (версия 1) рассматривается как оптимальное по информационной емкости и степени сложности оптического распознавания.



Рисунок 2.28 Структура QR-кода

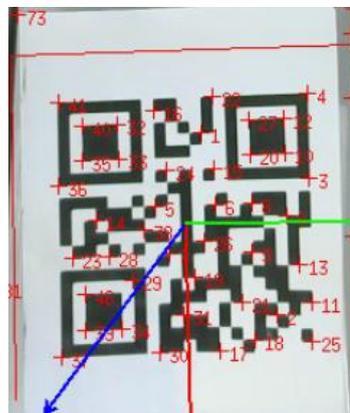


Рисунок 2.29 QR-код в поле зрения видеокамеры после обработки характерных признаков изображения с построенной по ним системой координат

На рисунке 2.30 приведены варианты цифрового изображения QR-кода при различной взаимной ориентации СК видеокамеры и СК, связанной с QR-кодом.

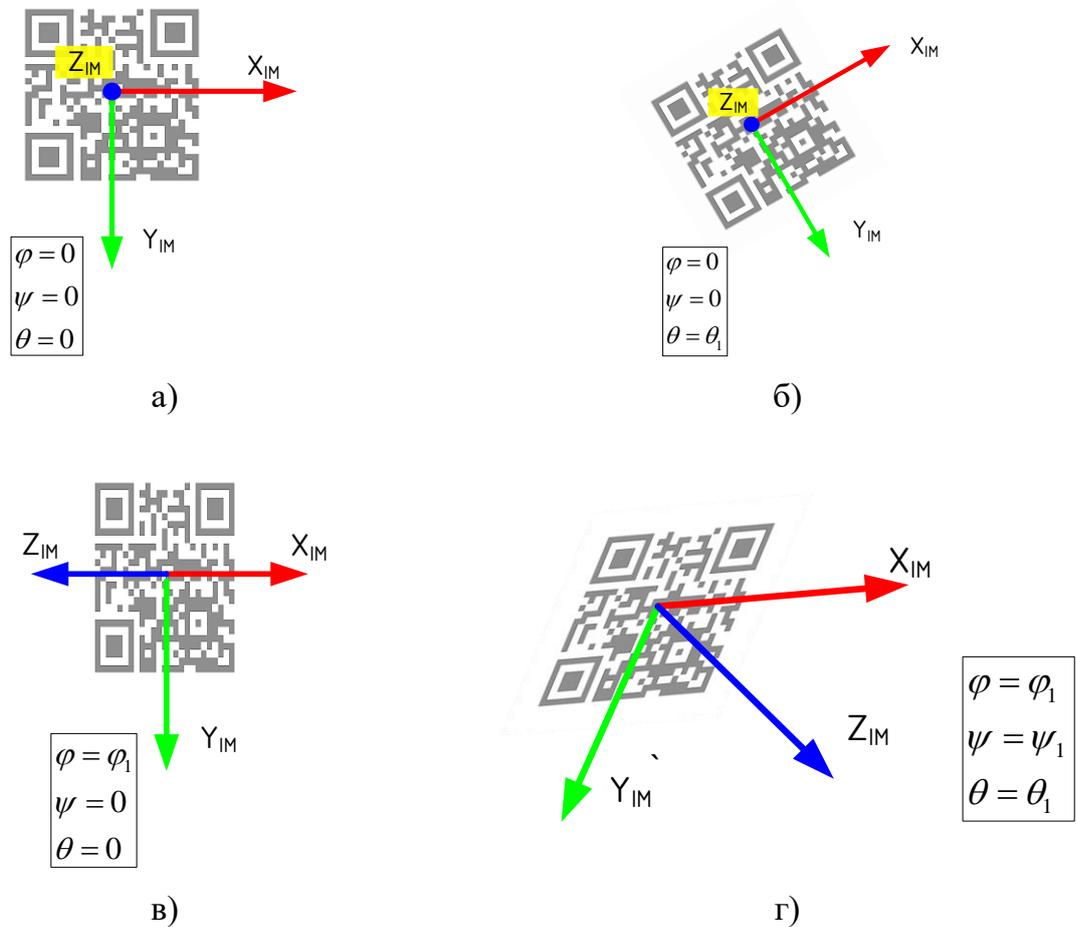


Рисунок 2.30 QR-код и связанная с ним система координат при его различной ориентации относительно видеокамеры

Алгоритм функционирования СТЗ для работы совместно с СУ манипулятора предлагается разбить на следующие этапы:

1. Нахождение характерных признаков объекта (-ов) на изображении;
2. Вычисление вектора положения и ориентации объекта, выбранного для дальнейших операций;
3. Вычисление положения целевой точки траектории. Привязка и ориентирование СК, связанной с целевой точкой;
4. Решение обратной задачи кинематики по положению для конечной точки;
5. Формирование траектории и расчет коэффициентов полиномов программной траектории движения манипулятора.

Основным и наиболее сложным расчетным этапом системы технического зрения в составе СУ радиационно-стойких манипуляторов является анализ полученного от видеокамеры и блоков электроники цифрового изображения путем выполнения последовательности вычислительных процедур (нормализация по яркостным параметрам и параметрам контрастности, бинаризация изображения, разбиение изображения на зоны, выделение содержащих характерные признаки изображения зон, выделение характерных признаков (ХП) объекта). Алгоритмы обработки и анализа изображений представлены значительным многообразием и выходят за рамки данной работы. Примем за основу, что СТЗ, базируясь на аппаратных решениях и программных алгоритмах, способна формировать массив характерных признаков объектов на изображении в виде:

$$O = (o_1, o_2, \dots, o_n), \quad (2.62)$$

где

- n – количество идентифицированных объектов в поле зрения камеры;
- o_i – вектор характерных признаков объекта.

На рисунке 2.31 приведен пример изображения СТЗ с идентифицированными характерными признаками объектов и синтезированными по ним системами координат.

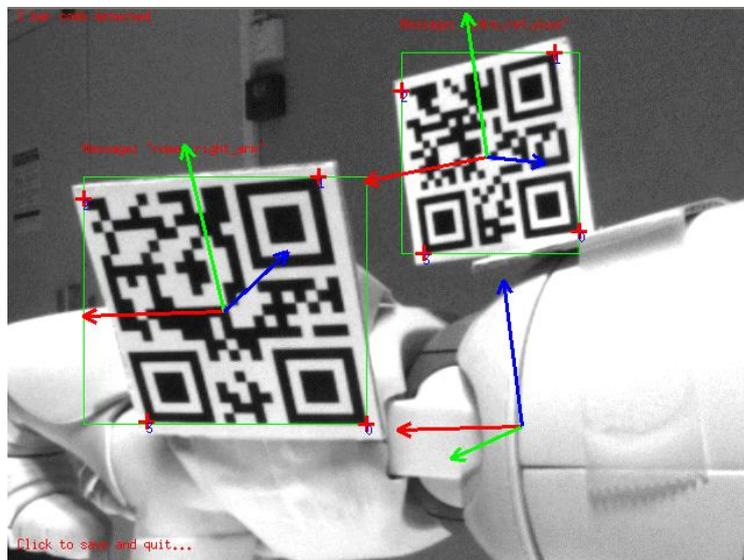


Рисунок 2.31 Поле зрения видеокамеры с несколькими объектами

Для выполнения внутрикамерных манипуляционных операций важнейшими ХП объекта, идентифицированного QR-кодом являются: линейное положение и пространственная ориентация объекта относительно системы координат, связанной с видеокамерой

СТЗ, а также информационная составляющая QR-кода в виде его уникального идентификатора, типа и т.д.

Для описания алгоритмов функционирования СТЗ в части расчета положения целевой точки введены следующие системы координат (рисунок 2.32 а, б):

$O_{CAM} X_{CAM} Y_{CAM} Z_{CAM}$	– система координат, связанная с герметичной камерой;
$O_0 X_0 Y_0 Z_0$	– базовая система координат манипулятора;
$O_6 X_6 Y_6 Z_6$	– система координат, связанная со схватом;
$O_E X_E Y_E Z_E$	– система координат, связанная с полюсом схвата;
$O_C X_C Y_C Z_C$	– система координат, связанная с видеокамерой;
$O_{OBJ} X_{OBJ} Y_{OBJ} Z_{OBJ}$	– система координат, связанная с объектом манипулирования;
$O_{IM} X_{IM} Y_{IM} Z_{IM}$	– система координат, связанная с QR-кодом;
$O_T X_T Y_T Z_T$	– система координат, связанная с целевой точкой (точкой конечного положения схвата на синтезированной траектории).

Взаимные положения и ориентации данных систем координат выражаются через матрицы однородных преобразований T_{i+1}^i , линейные сдвиги которых графически отображены на рисунке 2.32 через соответствующие радиус-векторы.

Алгоритм идентификации характерных признаков и расчета положения QR-кода вычисляет линейные координаты начала СК $O_{IM} X_{IM} Y_{IM} Z_{IM}$ в СК $O_C X_C Y_C Z_C$ в виде вектора $\vec{p}_C = (x_{IM}, y_{IM}, z_{IM})$. Ориентация СК $O_{IM} X_{IM} Y_{IM} Z_{IM}$ QR-кода относительно СК камеры $O_C X_C Y_C Z_C$ вычисляется в виде вектора $\mathbf{o}_C = (\varphi_{IM}, \psi_{IM}, \theta_{IM})$, где $\varphi_{IM}, \psi_{IM}, \theta_{IM}$ – углы Эйлера. Информационная компонента QR-кода формируется в виде вектора $\mathbf{C} = (id, type, CRC)$, где id – уникальный идентификационный номер ($id \in \mathbb{N}$), $type$ – тип QR-кода, CRC – вектор информации о результатах идентификации (наличие ошибок и т.д.).

При наличии исходной информации в виде векторов $\vec{p}_C, \mathbf{o}_C, \mathbf{C}$ дальнейшим шагом функционирования СТЗ является алгоритм синтеза траектории подведения схвата манипулятора к объекту. Задачей алгоритма является формирование начальной, конечной и, при необходимости, промежуточных точек траектории подведения и ориентирования полюса схвата манипулятора, выраженной в базовой системе координат манипулятора.

Рассмотрим случай, изображенный на рисунке 2.32 а), когда плоскость, перпендикулярная фокальной оси камеры, параллельна плоскости, образованной осями X_{IM}, Y_{IM} СК, связанной с QR-кодом, и выполняются следующие начальные условия:

$$\begin{aligned} \vec{p}_C &= (x_{IM}, y_{IM}, z_{IM}) = (x_1, 0, z_1); \\ \mathbf{o}_C &= (\varphi_{IM}, \psi_{IM}, \theta_{IM}) = (\varphi_1, 0, 0), \end{aligned} \quad (2.63)$$

где

x_1, z_1, φ_1 – некоторые координаты в момент времени t .

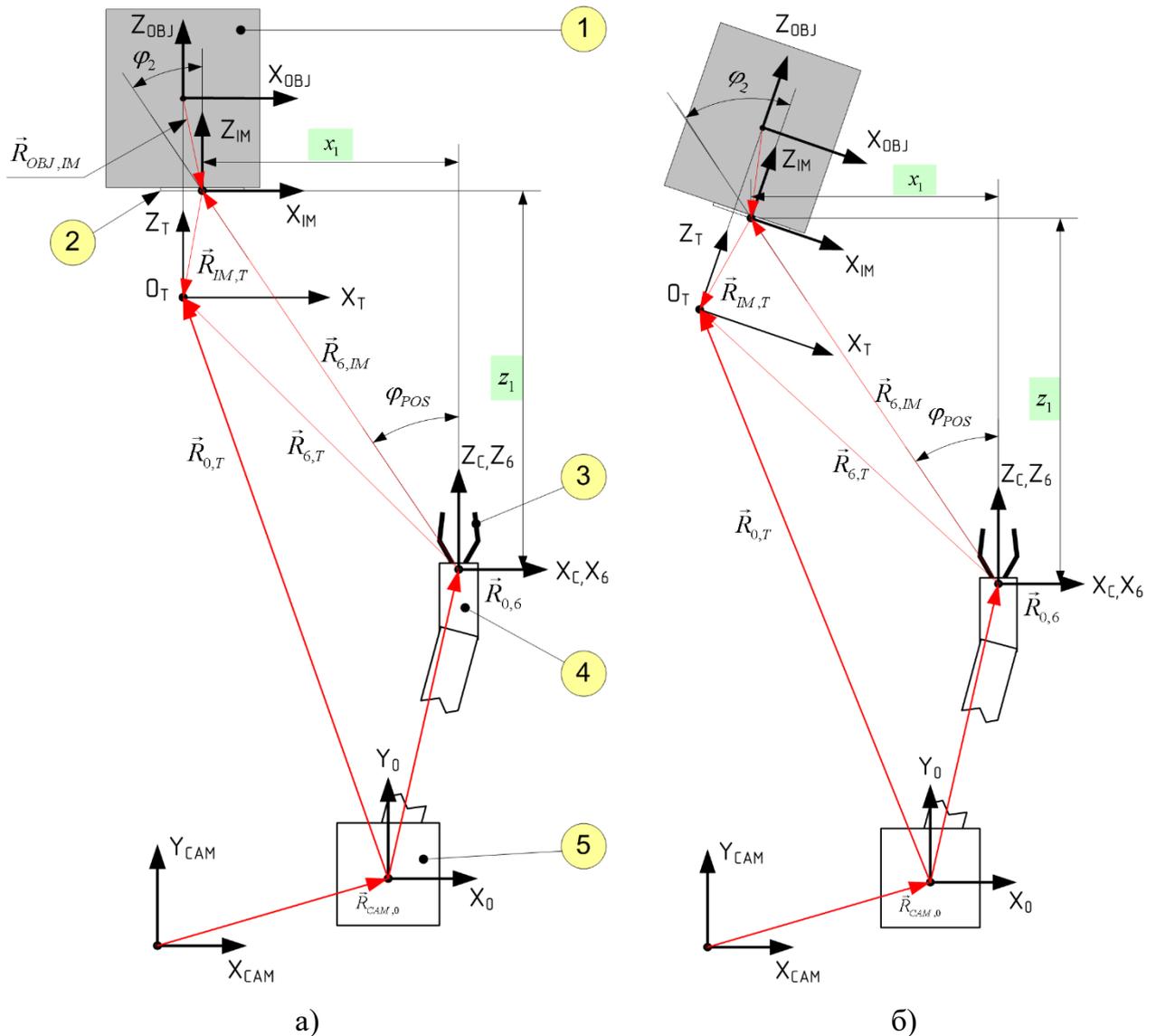


Рисунок 2.32 Взаимная ориентация систем координат при двух вариантах ориентации объекта относительно манипулятора (вид сверху)

В этом случае

$$\varphi_{POS} = \arctg \left(\frac{x_1}{z_1} \right) = \varphi_1, \quad (2.64)$$

и положение точки Т (целевая точка траектории) в базовой СК рассчитывается как

$$\begin{aligned} T_{C,x} &= x_M + x_1 - \left(\vec{R}_{OBJ,IM} \right)_X; \\ T_{C,y} &= y_M - \left(\vec{R}_{OBJ,IM} \right)_Y; \\ T_{C,z} &= z_M + z_1 - \left(\vec{R}_{IM,T} \right)_Z; \end{aligned} \quad (2.65)$$

где

$\left(\vec{R}_{OBJ,IM} \right)_X, \left(\vec{R}_{OBJ,IM} \right)_Y$ – компоненты вектора $\left(\vec{R}_{OBJ,IM} \right)_X, \left(\vec{R}_{OBJ,IM} \right)_Y$, учитывающие смещение положения QR-кода на объекте относительно оси или плоскости симметрии, оптимальной для дальнейшего захвата объекта манипулирования;

$\left(\vec{R}_{IM,T} \right)_Z$ – расстояние от объекта до полюса схвата, формируется исходя из типа объекта манипулирования.

В случае, заданном начальными условиями (2.63) и изображенном на рисунке 2.32 а), ориентация СК $O_C X_C Y_C Z_C (O_6 X_6 Y_6 Z_6)$ совпадает с ориентацией СК $O_{IM} X_{IM} Y_{IM} Z_{IM} (O_T X_T Y_T Z_T)$. Тогда задачей наведения схвата манипулятора на объект является его линейное перемещение в точку Т без изменения ориентации схвата.

На рисунке 2.32 б) объект имеет аналогичные условию (2.63) линейные координаты, а угол φ_{IM} не равен углу φ_{POS} . При этом и линейные координаты точки Т в СК $O_C X_C Y_C Z_C (O_6 X_6 Y_6 Z_6)$, и ориентация СК $O_T X_T Y_T Z_T$ относительно СК $O_C X_C Y_C Z_C$ изменились

$$\begin{aligned} T_0 &= \vec{R}_{0,6} + \vec{R}_{6,IM} + R_{\Delta\varphi} \left(\vec{R}_{OBJ,IM} + \vec{R}_{IM,T} \right); \\ \mathbf{o}_T^C &= (\varphi_T, \psi_T, \theta_T) = (\varphi_2 - \varphi_{POS}, 0, 0), \end{aligned} \quad (2.66)$$

где

$\vec{R}_{0,6}, \vec{R}_{6,IM}$ – радиус-векторы, связывающие соответствующие системы координат;
 $\vec{R}_{OBJ,IM}, \vec{R}_{IM,T}$ – радиус-векторы, связывающие объект с базой и базой с точкой Т;
 $R_{\Delta\varphi}$ – матрица поворота, описывающая поворот на угол $\Delta\varphi$.

В наиболее общем случае положение и ориентация СК $O_T X_T Y_T Z_T$ по известным матрицам однородных преобразований, параметрам $\Delta\varphi = (\varphi_{IM} - \varphi_{POS})$, $\Delta\psi = (\psi_{IM} - \psi_{POS})$ и углу θ_{IM} вычисляются следующим образом:

$$T_0 = T_{IM,T} T_{OBJ,IM} T_{6,IM} = T_{IM,T} T_{OBJ,IM} \begin{pmatrix} R_\varphi R_\psi R_\theta & p_{IM,3x1} \\ \hline 0_{1x3} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{3x3} & p_{T,3x1} \\ \hline 0_{1x3} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.67)$$

где

- T_0 – матрица обобщенных координат перехода от СК $O_C X_C Y_C Z_C$ к $O_T X_T Y_T Z_T$;
- $T_{6,IM}$ – матрица обобщенных координат перехода из СК $O_6 X_6 Y_6 Z_6$ к $O_T X_T Y_T Z_T$, вычисленная по (1.5) с входными аргументами $\Delta\varphi$, $\Delta\psi$, θ_{IM} , p_T ;
- R_{3x3} – матрица конечного перехода от СК $O_6 X_6 Y_6 Z_6$ к $O_T X_T Y_T Z_T$.

Выходными данными алгоритма являются векторы \mathbf{p}_T и вектор углов Эйлера \mathbf{o}_T , полученный из матрицы R_{3x3} .

Зная текущее положение и ориентацию схвата манипулятора и расчетные параметры целевой точки, траектория движения манипулятора в обобщенных координатах может быть получена с использованием метода, описанного в разделе 2.3.6.

В работе предлагаются следующие два подхода к реализации движения манипулятора к объекту:

Подход 1

Наведение схвата осуществляется путем однократного вычисления требуемой позиции и ориентации схвата с дальнейшим автоматическим построением траектории наведения и ее исполнения;

Подход 2

Наведение схвата осуществляется путем вычисления и формирования требуемых управляющих воздействий на исполнительные приводы на каждом такте (кадре) поступления информации от СТЗ либо через определенный временной период коррекции $T_{КОРР}$.

Алгоритм, реализующие первый подход, менее ресурсоемок, т.к. при выполнении этапа движения манипулятора к объекту изображение от СТЗ не анализируется. Вторым подход

предпочтителен в двух случаях: а) для наведения на объекты, имеющие высокую вероятность перемещения во время этапа наведения; б) в случае значительной линейной или угловой погрешности наведения, вызванной, повышенными ошибками вычисления координат точки Т вследствие ограниченной разрешающей способности оборудования СТЗ (рисунок 2.33).

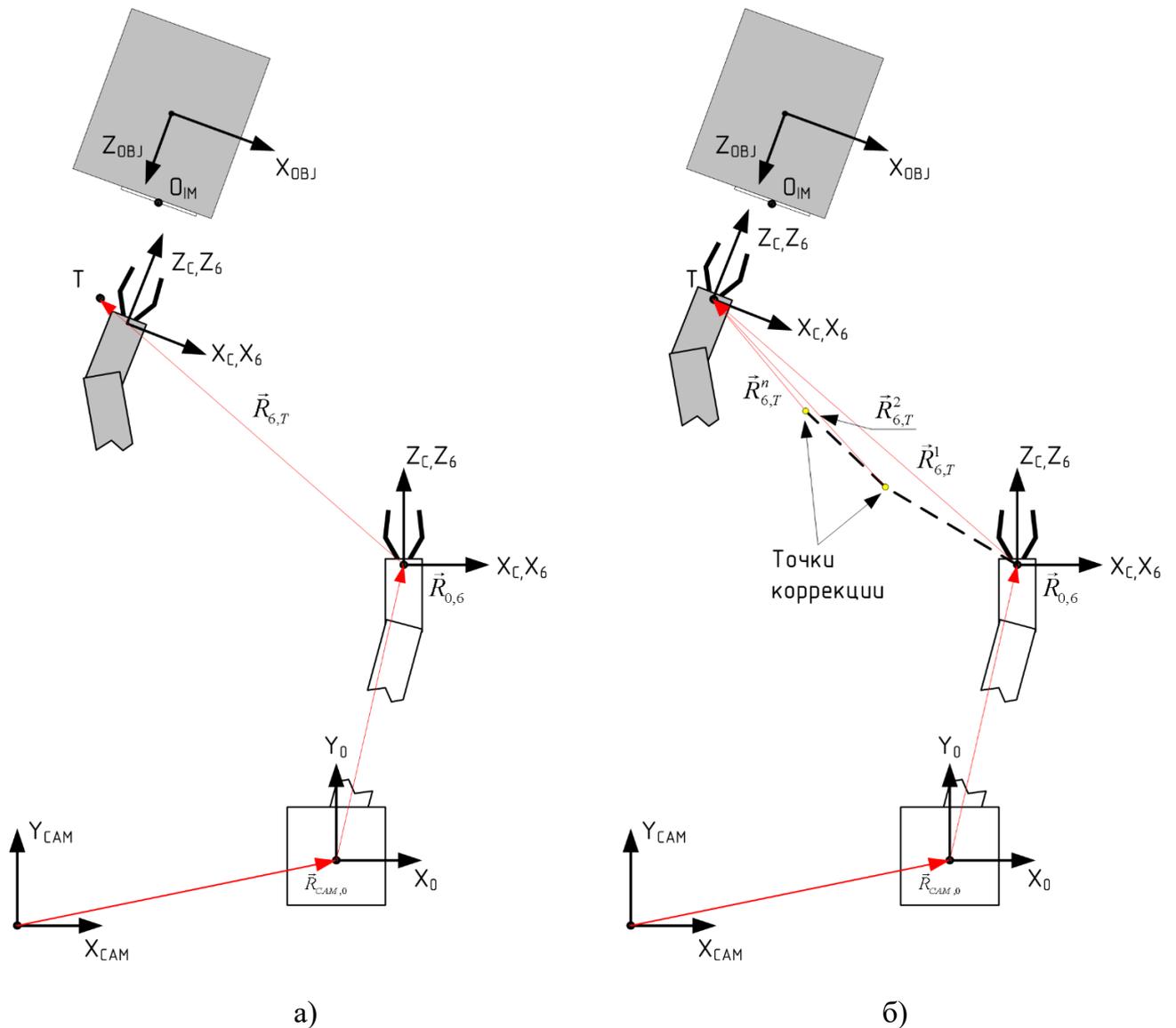


Рисунок 2.33 Движение манипулятора в двух вариантах построения траектории (однократное и периодическое при движении манипулятора)

На рисунке 2.34 приведена временная диаграмма событий, операций и действий СТЗ, СУ и оператора при использовании режима наведения.

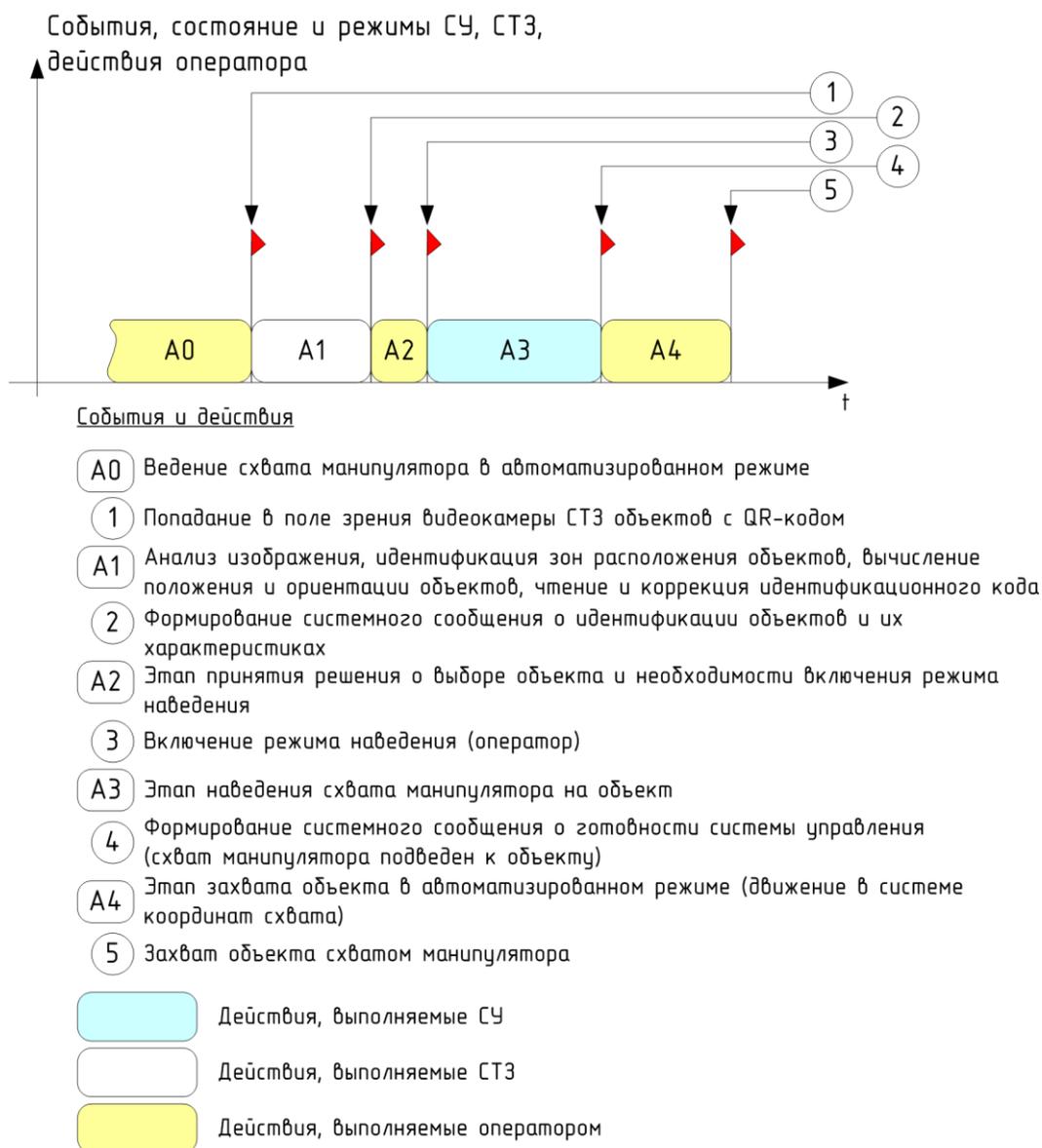


Рисунок 2.34 Временная диаграмма взаимодействия СТЗ, СУ, оператора

В качестве расширения структуры сообщений информационного обмена системы управления (раздел 2.4) в работе **предложено следующее множество информационных сообщений между программными компонентами СТЗ, системой управления и оператором** в части функционирования СТЗ (таблица 2.10):

Таблица 2.10 Расширение структуры информационных сообщений СУ в части СТЗ

№	Имя сообщения в системе управления и его структура	Описание
1	/vision_mode	Статус режима функционирования СТЗ
2	/vision_qr_mode	Статус режима распознавания QR-кодов
3	/vision_obj_count	Количество находящихся в поле зрения объектов с идентификационными метками

Таблица 2.10 (продолжение)

4	/vision_obj_ids	Идентификационная информация по каждому объекту (уникальный 17-значный идентификационный номер)
5	/vision_obj_pos	Информация о пространственном положении по каждому объекту (линейные и угловые координаты)
6	/vision_obj_selected	Номер выбранного оператором объекта при сопровождении (наведении)
7	/vision_tracking_mode	Статус режима сопровождения (наведении)
8	/vision_tracking_manipulator	Кинематические характеристики движения схвата при сопровождении (наведении)

Часть вышеприведенных сообщений визуализируется на пульте управления оператора в текстовой и графической форме. Пример изображения с камеры схвата с находящейся в поле зрения виалой (транспортной пробиркой) с нанесенным QR-кодом, сопровождающей код системой координат, детектированным и расшифрованным 17-значным идентификационным кодом представлен на рисунке 2.35.

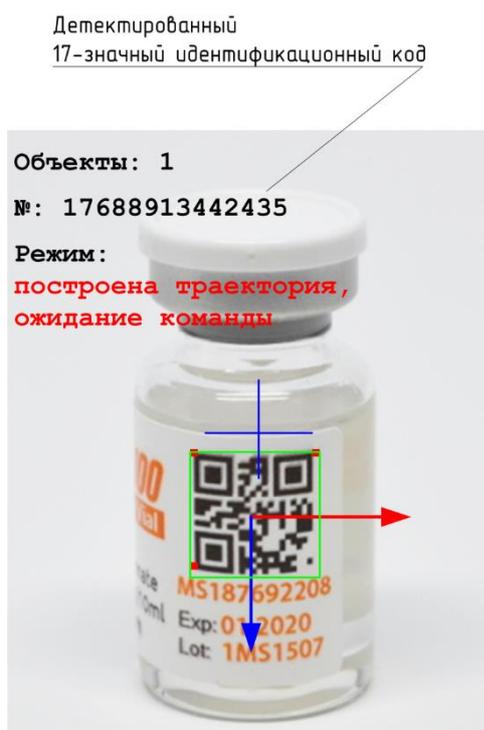


Рисунок 2.35 Вид объекта манипулирования и сопровождающей информации в окне вывода информации СТЗ

С учетом ряда специфических факторов технологического цикла работы с пробами, в данной работе предложена следующая система формирования/декомпозиции идентификационных кодов (рисунок 2.36):

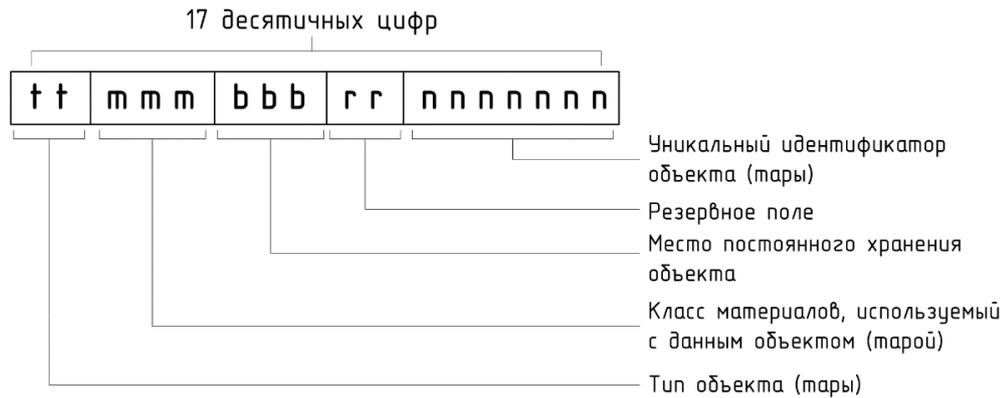


Рисунок 2.36 Предлагаемая структура 17-разрядного идентификационного кода объекта

При сохранении уникальности номера и некоторой начальной избыточности (10^{17} вариантов) данный способ позволяет ввести ряд дополнительных и резервных категорий классификации объекта.

Результатом этапа является предложенный алгоритм автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора на основе информации, поступающей от системы технического зрения путем анализа изображений объектов, идентифицированных двухмерным QR-кодом.

2.7 Синтез системы тренажерного обучения и анализа данных

Создание и последующая опытная и промышленная эксплуатация сложных программно-технических комплексов, оснащенных новыми типами систем управления, человеко-машинным интерфейсом сопровождается этапом освоения данных комплексов техническим персоналом. Данный этап характеризуется следующими организационно-техническими проблемами:

1. Возможными повреждениями оборудования вследствие ошибок при эксплуатации;
2. Неоптимальными действиями технического персонала на всех этапах эксплуатации оборудования, вызывающими кратковременные или долговременные нештатные режимы функционирования, режим повышенного энергопотребления и т.д.;
3. Недоработанностью или отсутствием программ обучения работе с оборудованием, отсутствием технической возможности выполнения тренажерной подготовки;
4. Неполнотой технической и/или эксплуатационной документации.

В связи с тем, что класс внутрикамерных радиационно-стойких манипуляторов является техническим объектом повышенной сложности, условия его эксплуатации являются

экстремальными, возможные повреждения манипулятора или внутрикамерного оборудования являются критическими для выполняемого технологического процесса, а последствия устранения повреждения могут представлять значительную техническую трудность (в целом связанную с двумя факторами: необходимостью дезактивации оборудования и максимально допустимым временем нахождения ремонтного персонала в радиационно-опасной зоне) в работе **предлагается аппаратно-программная архитектуры системы тренажерного обучения и регистрации действий оператора.**

В соответствии с задачами, поставленными в главе 1, систему тренажерного обучения (СТО) можно декомпозировать на четыре взаимосвязанные подсистемы: систему регистрации событий (СРС), систему хранения данных (СХД), систему тренажерной подготовки (СТП) и систему анализа действий (САД) технического персонала (рисунок 2.37).

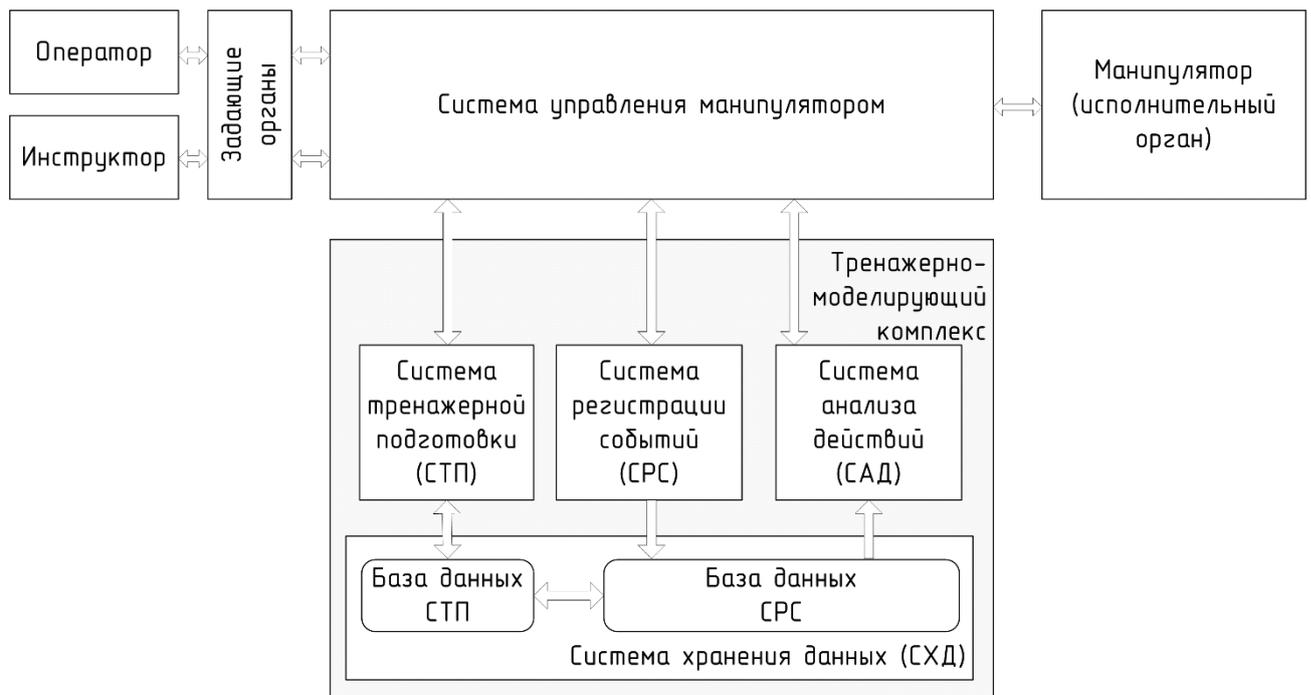


Рисунок 2.37 Подсистемы, входящие в систему тренажерного обучения

Функциональным ядром СТО является информационное взаимодействие СРС и СХД с ядром СУ, выражающееся в автоматической передаче и гарантированном сохранении событий и кадров данных от СУ в соответствии с их классами. Согласно предложенной концепции построения программной модели системы управления, информационные сообщения $M_{СУ}$ разделены на следующие классы:

1. Периодические от объекта управления (состояние манипулятора);
2. Аperiodические от оператора (состояние задающих органов);

3. Аperiodические от системы управления (признаки приближения к препятствию, предаварийные события);
4. Системные и служебные.

При построении СТО предлагается метод хранения разнородных классов данных, генерируемых в системе управления асинхронно или синхронно, в виде двухуровневой информационной модели, заключающейся в первичном сохранении данных в локальных буферных файлах внутренними средствами СРС и СУ, с последующей передачей сохраненной информации в реляционную систему управления базами данных (СУБД), рисунок 2.38. Предлагаемый метод по сравнению с прямым сохранением в СУБД дает следующие преимущества:

1. Минимизацию загрузки локального вычислителя СУ при сохранении данных;
2. Оптимизацию количества запросов к внешней или локальной СУБД;
3. Упрощение информационной структуры базы данных (БД).

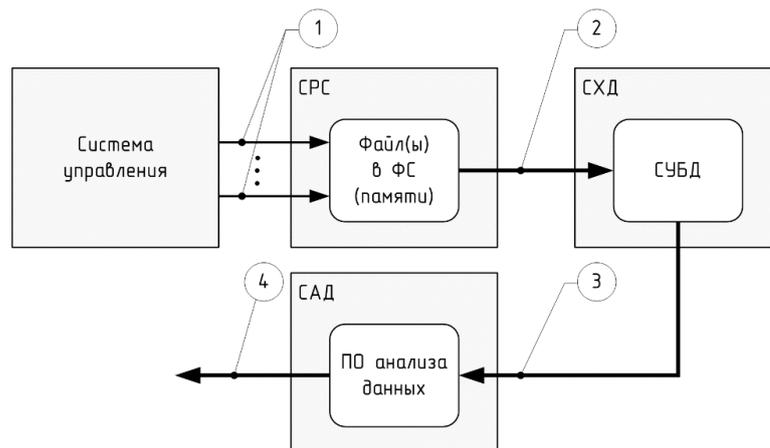


Рисунок 2.38 Функциональная структура системы тренажерного обучения

На рисунке 2.38 обозначены:

- 1 – асинхронные и синхронные события, векторы состояния от СУ, регистрируемые в локальных файлах;
- 2 – запрос к СУБД на запись данных по окончании цикла работы манипулятора;
- 3 – запрос к СУБД на чтение данных при анализе работы манипулятора;
- 4 – результаты анализа данных, сформированные в автоматическом или автоматизированном режиме.

В соответствии с принципом концептуального, информационно-логического анализа предметной области и методологии проектирования реляционных БД, предлагается базо-

вый вариант структуры БД СХД, где каждая из таблиц отражает определенную информационную сущность в структуре данных с соответствующими ей полями-атрибутами (таблица 2.11, рисунок 2.39):

Таблица 2.11 Состав таблиц СУБД СХД

Таблица БД	Описание
«Манипуляторы»	– таблица сведений о манипуляторе (место установки, заводской номер, атрибуты)
«Операторы»	– таблица сведений об операторском персонале (идентификаторы, персональные данные)
«Настроечные конфигурации»	– таблица хранения настроечных конфигураций манипулятора под определенный тип технологических операций, расположения в камере
«Технологические задания»	– таблица сменных или иных технологических заданий, сформированных системой верхнего уровня
«Запуски манипуляторов»	– таблица всех запусков манипуляторов с идентификаторами оператора, конфигурации, технологического задания, временем начала и окончания работы, массивом событий, действий, состояний и режимов СУ и объекта управления
«Нештатные режимы работы»	– таблица сведений о предупреждениях, предаварийных и аварийных событиях при запуске манипулятора

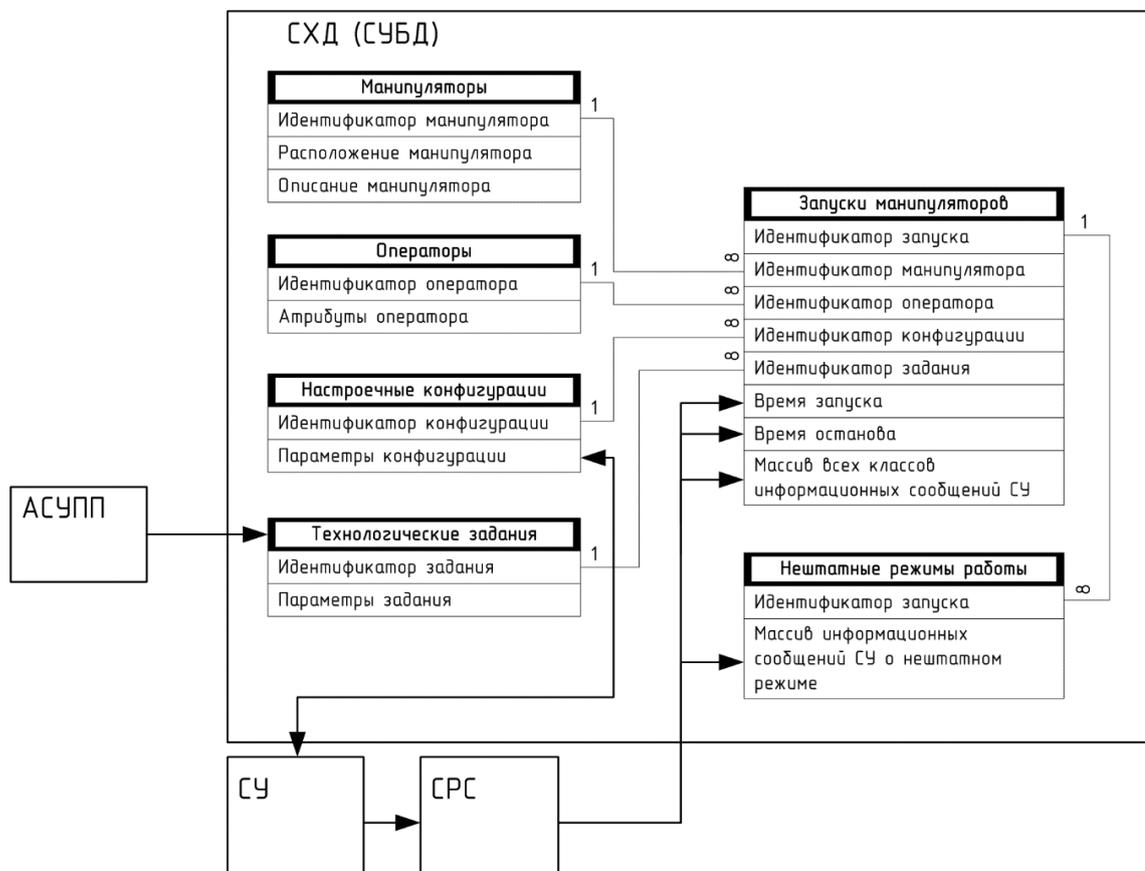


Рисунок 2.39 Структура таблиц и их отношений в системе хранения данных

Построение информационной части системы тренажерной подготовки базируется на предложенной архитектуре СХД, расширяя ее следующими категориями (таблица 2.12, рисунок 2.40):

Таблица 2.12 Состав таблиц СУБД СТП

Таблица БД	Описание
«Инструкторы»	– таблица сведений о инструкторском персонале (идентификаторы, персональные данные)
«Типы учебно-тренировочных заданий»	– таблица идентификаторов типа задания («практика», «управляемый тренинг», «квалификационный тренинг», «подтверждение компетенции»)
«Учебно-тренировочные задания (УТЗ)»	– таблица сформированных заданий в виде целей задания, критериев его выполнения, действий инструктора (при необходимости)
«Учебно-тренировочные программы (УТП)»	– таблица сформированных учебных программ подготовки в виде нескольких заданий и критериев их выполнения
«Выполнение УТП»	– таблица фактического выполнения заданий УТП в виде зарегистрированных информационных сообщений СУ рабочей станции оператора и СУ рабочей станции инструктора (при необходимости);

В системе тренажерной подготовки предлагаются следующие виды УТЗ (таблица 2.13):

Таблица 2.13 Виды учебно-тренировочных заданий СТП

Виды УТЗ	Возможные типы УТЗ
Базовые команды и операции по реконфигурации манипулятора	Практика, управляемый тренинг
Перевод манипулятора в исходное положение («парковка» манипулятора)	Практика, управляемый тренинг, квалификационный тренинг
Перевод манипулятора в произвольное положение	Практика, управляемый тренинг, квалификационный тренинг, подтверждение квалификации
Выполнение операций в прямоугольной декартовой системе координат схвата и базовой системе координат	Практика, управляемый тренинг, квалификационный тренинг, подтверждение квалификации
Захват и отпускание объектов	Практика, управляемый тренинг, квалификационный тренинг, подтверждение квалификации
Формирование, сохранение и воспроизведение траекторий движения	Практика, управляемый тренинг, квалификационный тренинг, подтверждение квалификации Подтверждение квалификации
Выполнение операций при аварийных режимах работы манипулятора	Управляемый тренинг, квалификационный тренинг, подтверждение квалификации

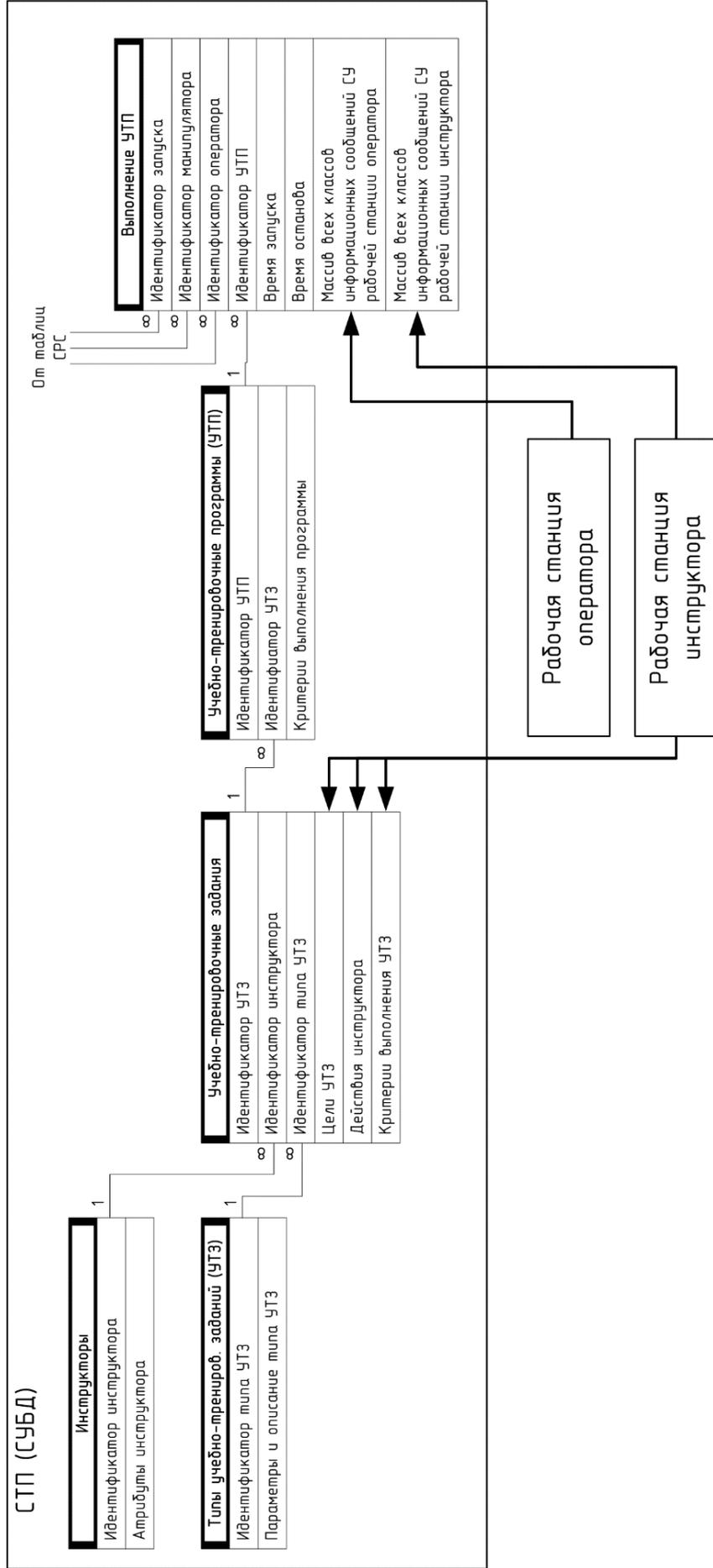


Рисунок 2.40 Вариант структуры СУБД системы тренажерной подготовки

В зависимости от вида и типа УТЗ критериями оценивания его выполнения могут являться:

1. Корректная последовательность операций включения и выключения (по анализу зарегистрированного временного ряда событий);
2. Время выполнения УТЗ;
3. Абсолютная величина отклонения обобщенных координат от заданных для конечной точки цели по окончании выполнения задания;
4. Значение суммы отклонений фактического радиуса-вектора от его величины в УТЗ

$$S_1 = \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_{3,i} - \mathbf{r}_i)^2, \quad (2.68)$$

где

- N – количество зарегистрированных в СРС сообщений о положении схвата манипулятора;
- $\mathbf{r}_{3,i}$ – радиус-вектор положения схвата манипулятора из УТЗ на момент времени (номер сообщения) i ;
- \mathbf{r}_i – радиус-вектор фактического положения схвата манипулятора на момент времени (номер сообщения) i .

5. Значение суммы отклонений фактического вектора обобщенных координат манипулятора от его значения в УТЗ

$$S_2 = \sum_{i=1}^N (\mathbf{q}_3 - \mathbf{q})^2, \quad (2.69)$$

где

- \mathbf{q}_3 – вектор обобщенных координат манипулятора из УТЗ на момент времени (номер сообщения) i ;
- \mathbf{q} – вектор фактических обобщенных координат манипулятора на момент времени (номер сообщения) i ;

6. Значение суммы отклонений фактического вектора состояния ЗО оператора от вектора состояния ЗО инструктора

$$S_2 = \sum_{i=1}^N (\mathbf{O}_И - \mathbf{O}_O)^2, \quad (2.70)$$

где

- $\mathbf{O}_И$ – вектор состояния ЗО инструктора на момент времени (номер сообщения) i ;
- \mathbf{O}_O – вектор состояния ЗО оператора на момент времени (номер сообщения) i ;

Расширяемая программная архитектура СУ, предложенная в разделе 2.4, позволяет организовать единое информационное пространство для нескольких операторских рабочих станций (при наличии соответствующей коммуникационной инфраструктуры). В этом случае идентичные рабочие места возможно функционально разделить на рабочую станцию оператора и рабочую станцию инструктора (рисунок 2.41), что позволяет реализовать режим управляемого тренинга с введением весовых коэффициентов между отклонениями задающих органов рабочей станции оператора и рабочей станцией инструктора.

Для оценки качества подготовки операторов и принятии решения о квалификации оператора предлагаются следующие подходы:

1. Наблюдение за действиями оператора и движениями манипулятора в режиме реального времени, используя программные средства визуализации текущей информации;
2. Анализ записанной видеoinформации с камер обзора, установленных на манипуляторе или в герметичной камере;
3. Визуализацию трехмерной модели манипулятора с нескольких точек обзора;
4. Анализ зарегистрированных системой СРС данных с помощью системы анализа действий.

Для отображения текущей системной информации в режиме реального времени **предложен подход** [36], основанный на распределенной (сетевой) архитектуре и использовании веб-браузеров как универсального средства вывода текстовой, табличной и графической информации, используя для этого следующие информационные технологии:

- программный модуль `ros-bridge`, обеспечивающий обмен сообщениями между инфраструктурой ROS и внешним программным обеспечением используя TCP-соединение, технологии WebSockets и JSON;
- веб-браузер с поддержкой технологии WebSockets;
- язык разметки текстовой и медиа информации HTML5;
- скриптовый язык создания веб-приложений JavaScript;
- протокол текстового обмена сообщениями JSON5.

Применение данного подхода позволяет осуществлять оперативный контроль за состоянием манипулятора и действиями оператора и инструктора с любого рабочего места объединенных в сеть рабочих станций.

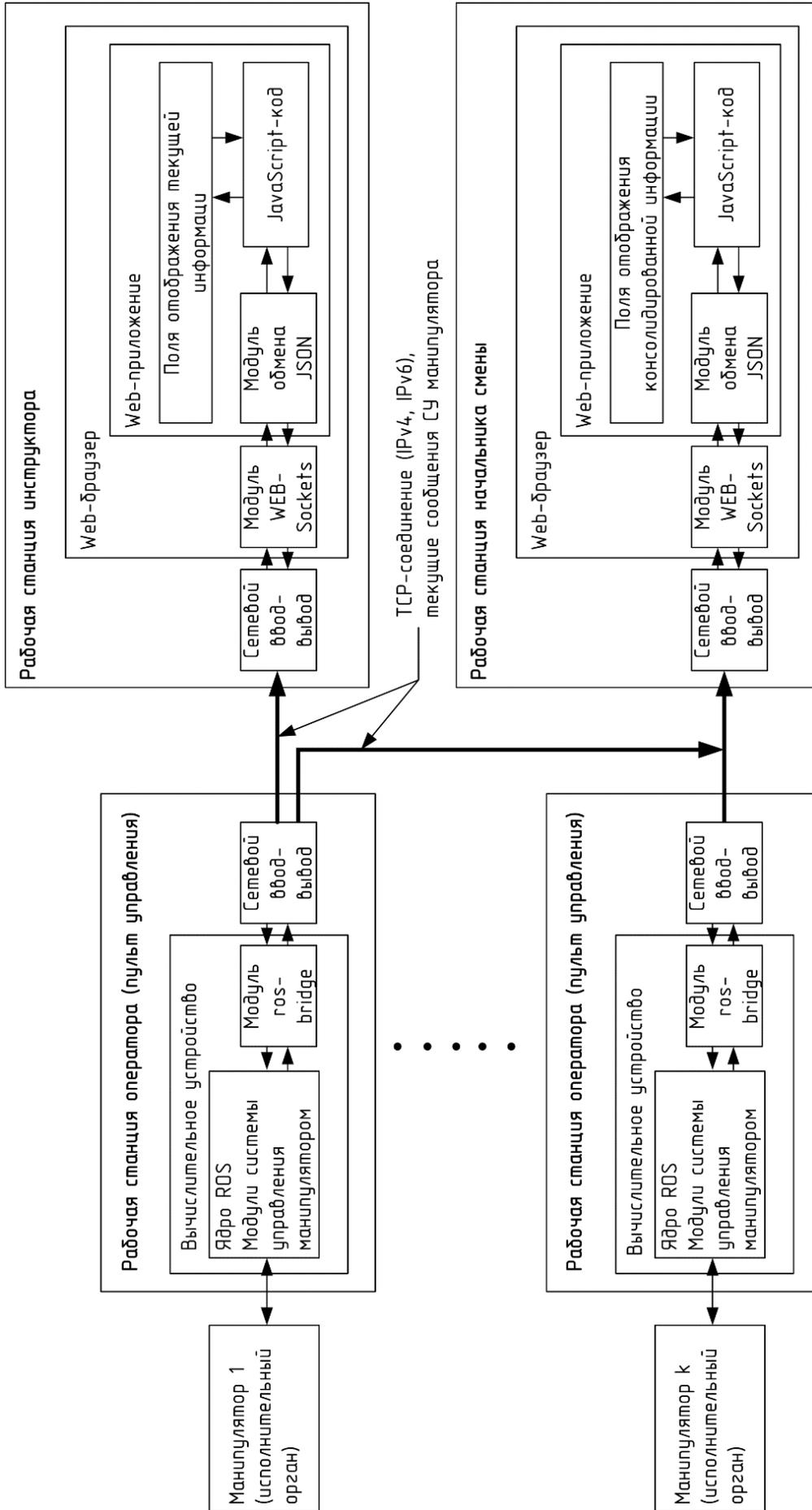


Рисунок 2.41 Структура объединенных в единое информационное пространство рабочих станций оператора, инструктора, начальника смены

Система анализа действий оператора по сформированному к СУБД запросу формирует выборку данных из СХД, позволяя выполнить с ней следующие действия:

1. Представление выборки в табличной и графической форме по всем типам записанных данных (действия оператора/инструктора, состояние СУ и манипулятора, сообщения от подсистем) или по отдельным их категориям;
2. Анализ режимов управления и характера движения манипулятора (в том числе с формированием анимированных 3D-моделей);
3. Выявление интервалов нахождения манипулятора в различных геометрических подзонах камеры;
4. Выявление интервалов времени нахождения манипулятора в кинематических конфигурациях, близких к недопустимым, вблизи препятствий и объектов манипулирования;
5. Визуализацию действий оператора в различных режимах.

Совокупность накопленных в СХД данных может в дальнейшем являться информационной базой интеллектуального анализа данных и систем машинного обучения для выявления общих закономерностей при управлении манипулятором.

Результатом данного раздела является предложенная архитектура, алгоритмы и программное обеспечение системы тренажерного обучения и регистрации действий операторов, структура базы данных системы тренажерного обучения. Предложенные алгоритмы реализованы в программном обеспечении, описанном в [46, 48].

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Для рассматриваемого класса 6-степенных манипуляторов с кинематическими параметрами вращательного типа, с учетом специфических требований к условиям эксплуатации (ионизирующие излучения и химически-активная среда), синтезирована структура системы управления манипулятором и ее программная архитектура, разработан человеко-машинный интерфейс «оператор-манипулятор».
2. Предложен способ комбинированного управления манипулятором от двух задающих органов типа «многокоординатный джойстик», разработаны алгоритмы управления и программное обеспечение для реализации режимов управления по заданной траектории движения либо по текущим командам оператора.
3. Предложен алгоритм формирования управляющих воздействий на приводы манипулятора (в автоматизированном режиме работы), отличающийся тем, что в уравнение вычисления управляющих воздействий введены матрицы оценки приближения вектора состояния манипулятора к граничным условиям и адаптивной подстройки коэффициентов передачи задающего органа, что позволяет исключить ударные механические воздействия на манипулятор при некорректных и/или несвоевременных действиях оператора в зоне кинематических ограничений.
4. Разработан алгоритм и программное обеспечение автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора на основе информации, поступающей от системы технического зрения путем анализа объектов, идентифицированных двухмерным QR-кодом, что минимизирует время выполнения технологических операций.
5. Разработана архитектура, алгоритмы и программное обеспечение системы тренажерного обучения и регистрации действий операторов, структура базы данных системы тренажерного обучения.

ГЛАВА 3.

**СОЗДАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИМ МАНИПУЛЯТОРОМ
ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНЫХ КАМЕР**

Проектирование и реализация технических решений, предложенных в главе 2, выполнялось в рамках опытно-конструкторских работ (ОКР) «Разработка конструкторской документации опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер» и «Изготовление опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер» для ФГУП ПО «Маяк». Исходные технические требования к исполнительному органу манипулятора и его системе управления представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Технические требования к исполнительному органу и системе управления (выдержки из технического задания к ОКР)

№	Описание требований
1. Конструктивные требования к исполнительному органу манипулятора	
1.1	ИО должен обеспечивать сферическую зону обслуживания с радиусом 900 мм
1.2	ИО должен иметь 6 вращательных степеней подвижности + схват
1.3	Максимальная грузоподъемность ИО на максимальном плече (900 мм) должна составлять не менее 10 кг
1.4	ИО должен осуществлять свою работу по командам от пульта управления
1.5	Максимальное усилие сжатия губок схвата должно составлять не менее 100 Н с обеспечением плавного регулирования
1.6	Линейная скорость перемещения полюса схвата должна плавно регулироваться от 0,01 м/с до наибольшей возможной при текущей конфигурации ИО
1.7	Распределение общей длины ИО по звеньям: – плечо 400 мм; – предплечье 300 мм; – кисть 200 мм
1.8	Углы поворота звеньев ИО, [угловые градусы], не менее: – ротация плеча ± 190; – качание плеча ± 110; – качание предплечья ± 110; – ротация предплечья ± 190; – качание кисти ± 110; – ротация захвата n*360 (без ограничений)

Таблица 3.1 (продолжение)

1.9	<p>Максимальные угловые скорости движения по осям, [угловые градусы/с], не менее:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ротация плеча ± 40; – качание плеча ± 40; – качание предплечья ± 90; – ротация предплечья ± 90; – качание кисти ± 90; – ротация захвата ± 90
1.10	Приводы ИО должны содержать тормозные элементы, фиксирующие выходные валы приводов при отсутствии команд оператора или при выключении питания
1.11	Должна быть предусмотрена возможность быстрой замены захвата на требуемый, из комплекта захватов (рабочих инструментов)
1.12	Электрический монтаж ИО должен быть выполнен скрытой проводкой в корпусных деталях ИО
1.13	Внешние детали ИО должны быть выполнены из нержавеющей кислотостойкой стали или из титановых сплавов. Конструкция ИО должна быть герметичной
2. Функциональные требования к системе управления, конструктивные требования к пульту управления (ПУ)	
2.1	<p>СУ должна обеспечивать возможность управления перемещением звеньев ИО в следующих режимах:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отдельно по каждой степени подвижности ИО (автоматизированный режим); – управление прямолинейным движением захвата манипулятора по вектору скорости, направление которого должно формироваться задающими органами на пульте управления; вектор скорости должен задаваться в системе трех взаимно перпендикулярных осей, одна из которых совпадает с продольной осью захвата, а вторая перпендикулярна плоскости сдвигания-раздвижения губок захвата (режим «Схват»)
2.2	Погрешность позиционирования полюса схвата манипулятора – не более ± 2 мм
2.2	СУ должна иметь режим программирования траекторий перемещений захвата манипулятора (путем программирования промежуточных точек на траектории). Количество запоминаемых траекторий движения – не менее 50
2.3	<p>Должен быть реализован режим автоматического воспроизведения движения захвата по ранее запрограммированным траекториям, при этом:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) скорость перемещения при отработке движений по программе должна быть регулируемой; б) должна быть обеспечена погрешность позиционирования в контрольных точках не более ± 2 мм
2.4	СУ должна иметь контуры защиты от нештатных режимов движения манипулятора, в том числе вызываемых некорректными действиями оператора
2.5	СУ и ПУ должны быть выполнены в виде моноблока, устанавливаемого непосредственно перед герметичной камерой или боксом

Таблица 3.1(продолжение)

2.6	ПУ должен содержать управляющий компьютер с сенсорным экраном и набор дискретных каналов управления, с помощью которых выбирается требуемый режим управления исполнительным органом	
3. Требования к условиям эксплуатации исполнительного органа манипулятора и системы управления		
3.1	Исполнительный орган манипулятора по условиям эксплуатации должен выполнять свои функции в следующих климатических условиях:	
	Температура окружающей среды, °С: – рабочая – хранения	+15... +35 –10...+40
	Относительная влажность воздуха, %	80% при 20°С
	Рабочее атмосферное давление, кПа (мм рт.ст)	86,6 (650) ... 106,7 (800)
3.2	Исполнительный орган манипулятора должен обладать следующими параметрами радиационной стойкости:	
	Гамма-излучение: максимальная мощность экспозиционной дозы с энергией от 0,1 до 3 МэВ, Гр/ч, экспозиционная доза, Гр	10 1000
	Нейтронное излучение: флюенс нейтронов при плотности потока 10^2 н/см ² со средней энергией 0,1 МэВ, н/см ²	10^8
	Бета-излучение: плотность потока бета-частиц, 1/мин см ² Флюенс бета-частиц, 1/см ²	1...10000 10...10000
4. Требования к питающему напряжению		
4.1	Номинальное напряжение питания, В	220
4.2	Частота питающего напряжения, Гц	50±3
4.3	Максимальная потребляемая мощность, Вт	1200

3.1 Конструктивное исполнение и результаты лабораторно-отрабочных испытаний манипулятора

В соответствии с исходными техническими требованиями спроектирован и изготовлен исполнительный орган (ИО) манипулятора роботизированного «МР-48», общий вид которого представлен на рисунке. 3.1. Кинематические параметры Денавита-Хартенберга приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Параметры Денавита-Хартенберга исполнительного органа «МР-48»

Сочленение (степень подвижности)	Сдвиг θ_i , [угл. град.]	α_i , [угл. град.]	a_i , [м]	d_i , [м]	Диапазон углового положения, [угл. град.]
1	0	90	0	0,14	+176 ... -251
2	90	0	0,39	0	± 109
3	90	90	0,02	0	± 95
4	180	90	0	0,32	± 194
5	180	90	0,02	0	± 109
6	0	0	0	0,35	± 360

Для оперативной замены технологического инструмента манипулятор имеет узел байонетной стыковки (поз. 11 рисунок 3.1), одновременно выполняющий сжатие-разжатие схвата ИО. Внешний вид исполнительного органа приведен на рисунке 3.2, электро-механические узлы степени подвижности «ротация плеча» – на рисунке 3.3.

Технические характеристики конструктивных элементов и электромеханической части исполнительного органа приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 Технические характеристики конструктивных элементов и электромеханической части исполнительного органа манипулятора «MP-48»

	Основание	Плечо	Локомья	Поворот кулаки	Наклон кулаки	Поворот шаров
Длина звена, [м]	-	400	300	-	200	-
Масса механизма звена с электроприводом, [кг]	10,3	8,5	7,8	5,3	2,8	1,6
Тип электродвигателя (производитель MAXON)	RE-40	RE-40 (2 шт.)	RE-40	RE-30	RE-30	RE-25
Тип тормозного устройства	MAXON AB-28					
Тип редуктора	ПЦР-100-135	ПЦР-100-135	ПЦР-60-115	ПЦР-47-70	ПЦР-47-70	MAXON GP-32
Коэффициент редукции, [отн. ед.]	1:382	1:382	1:286	1:190	1:190	1:318
Люфт вход-выход редуктора, [угл. град.]	0,02					
Диапазон угловой переориентации, [угл. град.]	+176...-251	±109	±95	±194	±109	±360*н
Диапазон достигаемых угловых скоростей, [угл. град./с]	±55	±55	±105	±115	±120	±100
Тип тахогенератора	MAXON RE-max 13					
Коэффициент передачи тахогенератора, [В/(угл. град./с)]	0,023					
Максимальная нелинейность тахогенератора, [%]	2					
Тип датчика угла	резистивный прерывистый, СП5-21а					
Коэффициент передачи датчика углового положения, [В/угл. град.]	0,015					
Нелинейность датчика углового положения, [%]	1,5					

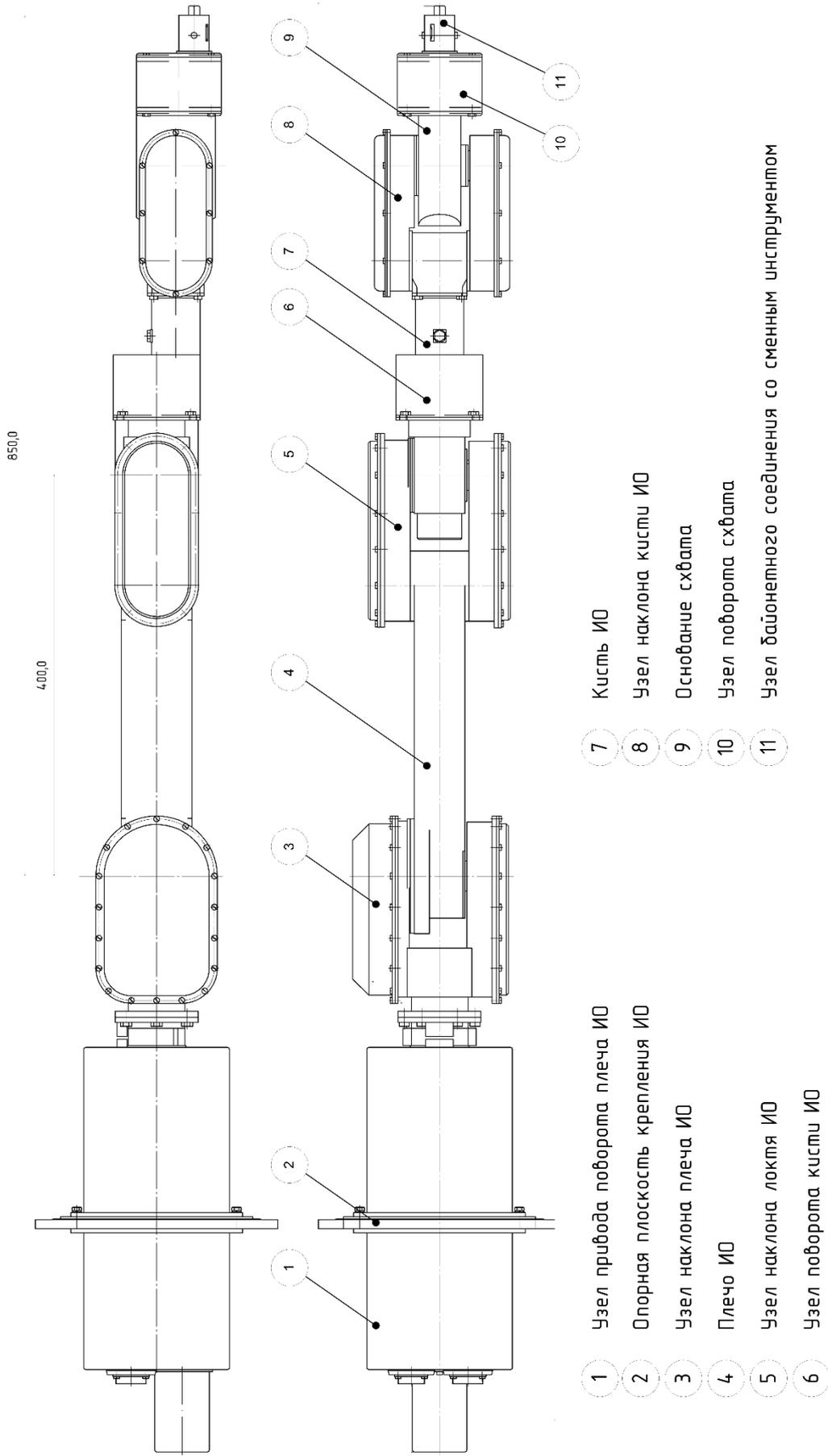
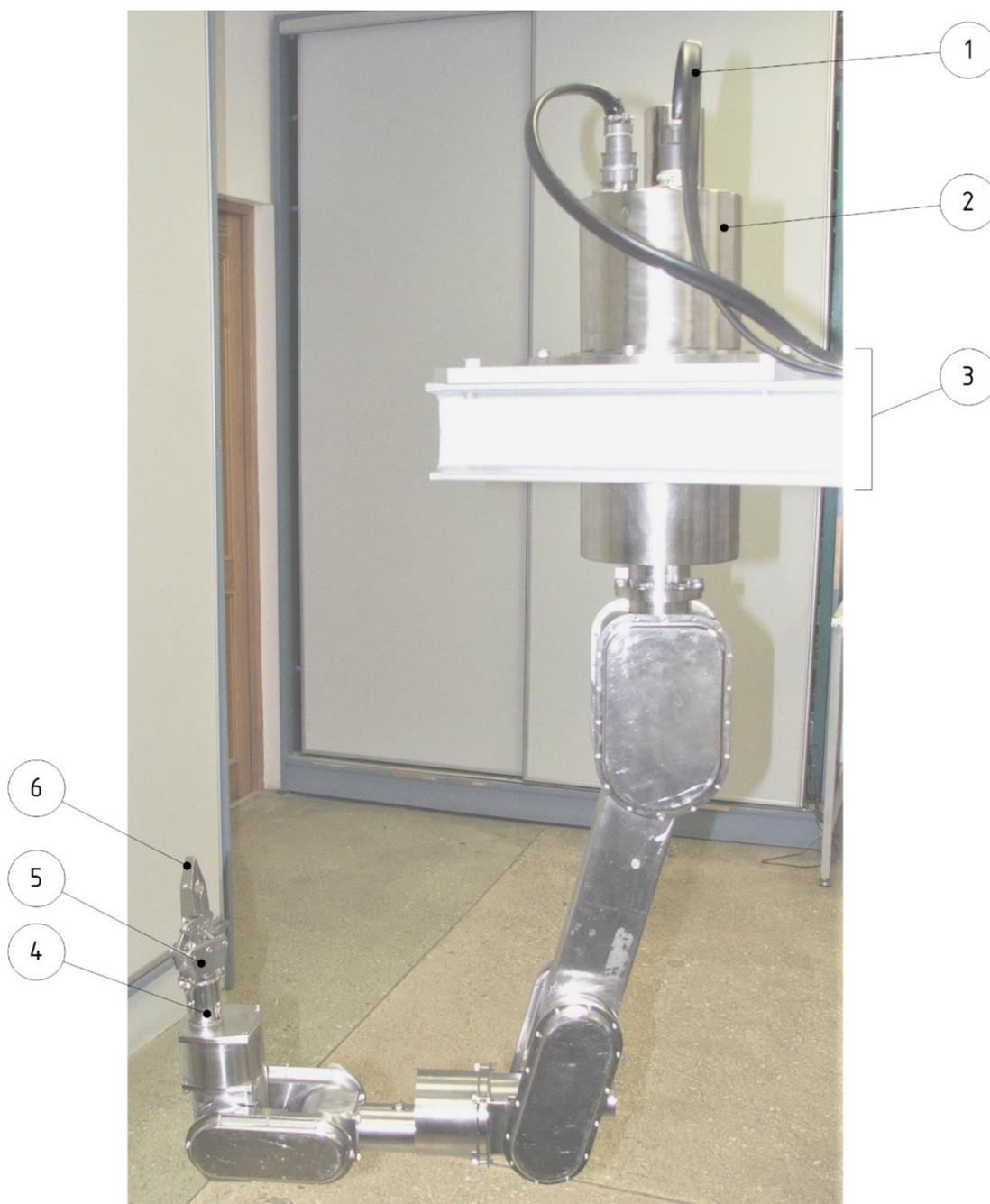


Рисунок 3.1 Общий вид (габаритный чертеж) манипулятора «MP-48»



- ① Кабели управления
- ② Защитный кожух механизма привода первой степени подвижности
- ③ Стойка-имитатор перекрытия герметичной камеры
- ④ Узел стыковки со схватом
- ⑤ Схват манипулятора
- ⑥ Губки схвата

Рисунок 3.2 Внешний вид манипулятора, установленного на технологическом стенде-имитаторе верхнего перекрытия герметичной камеры



- 1 Электродвигатель привода
- 2 Разъемы кабелей управления
- 3 Кабели управления
- 4 Кожух зоны установки редукторов
- 5 Кожух зоны установки чувствительных элементов (датчиков)
- 6 Датчик углового положения первой степени подвижности

Рисунок 3.3 Узел привода первой степени подвижности манипулятора «МР-48» со снятыми защитными кожухами

Управление манипулятором (исполнительным органом) осуществляется от спроектированного и изготовленного опытного образца пульта управления, включающего в себя:

1. Систему питания, формирующую необходимую номенклатуру питающих напряжений для компонентов системы управления и исполнительного органа;
2. Компоненты системы управления исполнительным органом: блок управления манипулятором (БУМ), блок ввода-вывода (БВВ);
3. Органы управления: два многостепенных джойстика (ЗО), выключатель блокировки управления, кнопка аварийного останова, расположенные на верхней панели пульта управления;

4. Органы индикации и сигнализации: звуковой излучатель, светодиодный индикатор, расположенные на верхней панели пульта управления;
5. Встроенный промышленный панельный компьютер Advantix PPC-12FN с резистивным сенсорным экраном размером 12”.

Структурная схема пульта управления на составные части приведена на рисунке 3.4.

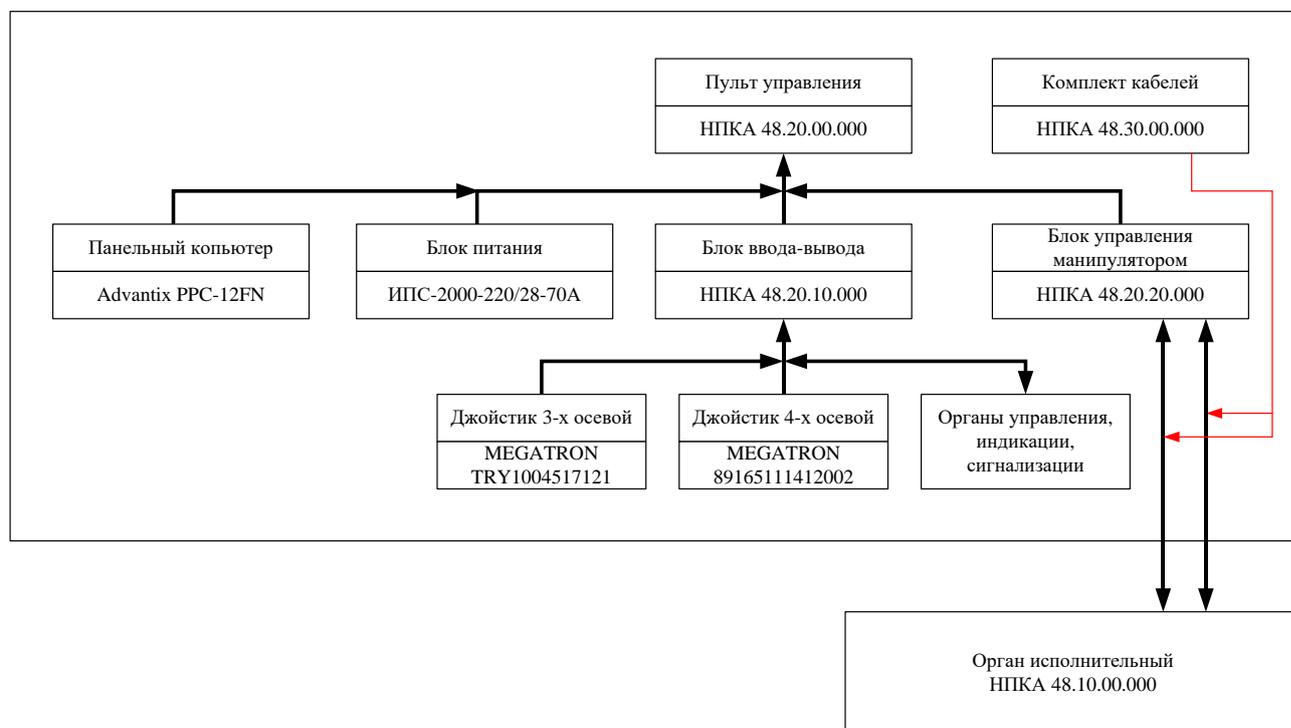


Рисунок 3.4 Структурная схема пульта управления «MP-48»

Задание режимов работы системы управления манипулятором выполняется с помощью программного обеспечения управляющего компьютера посредством резистивной сенсорной панели, а также кнопок, расположенных на задающих органах.

Модуль ввода-вывода НПКА 48.20.10.000 выполняет следующие функции:

1. Измерение (аналого-цифровое преобразование) выходных сигналов двух многоосевых задающих органов, пропорциональных величинам механических отклонений их осей. Разрешающая способность АЦП, приведенная к угловому отклонению рукояток ЗО (с типовым диапазоном отклонений от -35 угл. град. до 35 угл. град.), составляет не более 0.1 угл. град.;
2. Регистрацию состояния дискретных сигналов управления (кнопки на ЗО, тумблер блокировки управления и т.д.);
3. Информационный обмен (прием, декодирование команд, формирование ответных посылок) с вычислительным устройством (панельным компьютером) пульта управления

по интерфейсу RS-232 в соответствии с утвержденным протоколом;

4. Формирование управляющих сигналов на органы индикации и сигнализации, расположенные на передней панели пульта управления (звукоизлучатель, светодиодные индикаторы на джойстиках и панели управления).

Блок управления манипулятором НПКА 48.20.20.000 реализует следующие функции:

1. Коммутацию питающих цепей +24В (+30В) к электроприводам исполнительного органа посредством силовых полупроводниковых ключей, длительность (скважность) включения которых определяется алгоритмически исходя из режима работы и заданных уставок;
2. Измерение (АЦП-преобразование) выходных сигналов датчиков углового положения, датчиков угловой скорости исполнительного органа. Разрешающая способность АЦП по угловому положению составляет 0,087 угл. град., по угловой скорости – 0,065 угл. град./с;
3. Измерение величины тока, протекающего по силовым цепям электроприводов, поддержание требуемой величины тока (аппаратная реализация данной функции);
4. Реализацию алгоритмов управления по угловой скорости;
5. Реализацию алгоритмов защиты и блокировок, в том числе управление электромеханическими тормозными устройствами;
6. Информационный обмен (прием, декодирование команд, формирование ответных посылок) с вычислительным устройством (панельным компьютером) пульта управления по интерфейсу RS-232 в соответствии с утвержденным протоколом.

Персональный компьютер (вычислительное устройство СУ) реализует алгоритмы управления верхнего уровня, формируя при этом требуемые режимные команды и величины управляющих воздействий блоку управления манипулятором; обеспечивает интерактивный человеко-машинный интерфейс (вывод и прием информации посредством сенсорного экрана), взаимодействие с внешними системами управления и контроля.

Конструктивно модуль ввода-вывода и блок управления манипулятором выполнены в виде отдельных печатных плат (поз. 4,6 рисунок 3.8). Отдельные фрагменты электрических принципиальных схем СУ приведены на рисунках 3.5, 3.6.

Схема сопряжения с выходными аналоговыми сигналами ЭО

Цифровая часть с вычислительным процессором

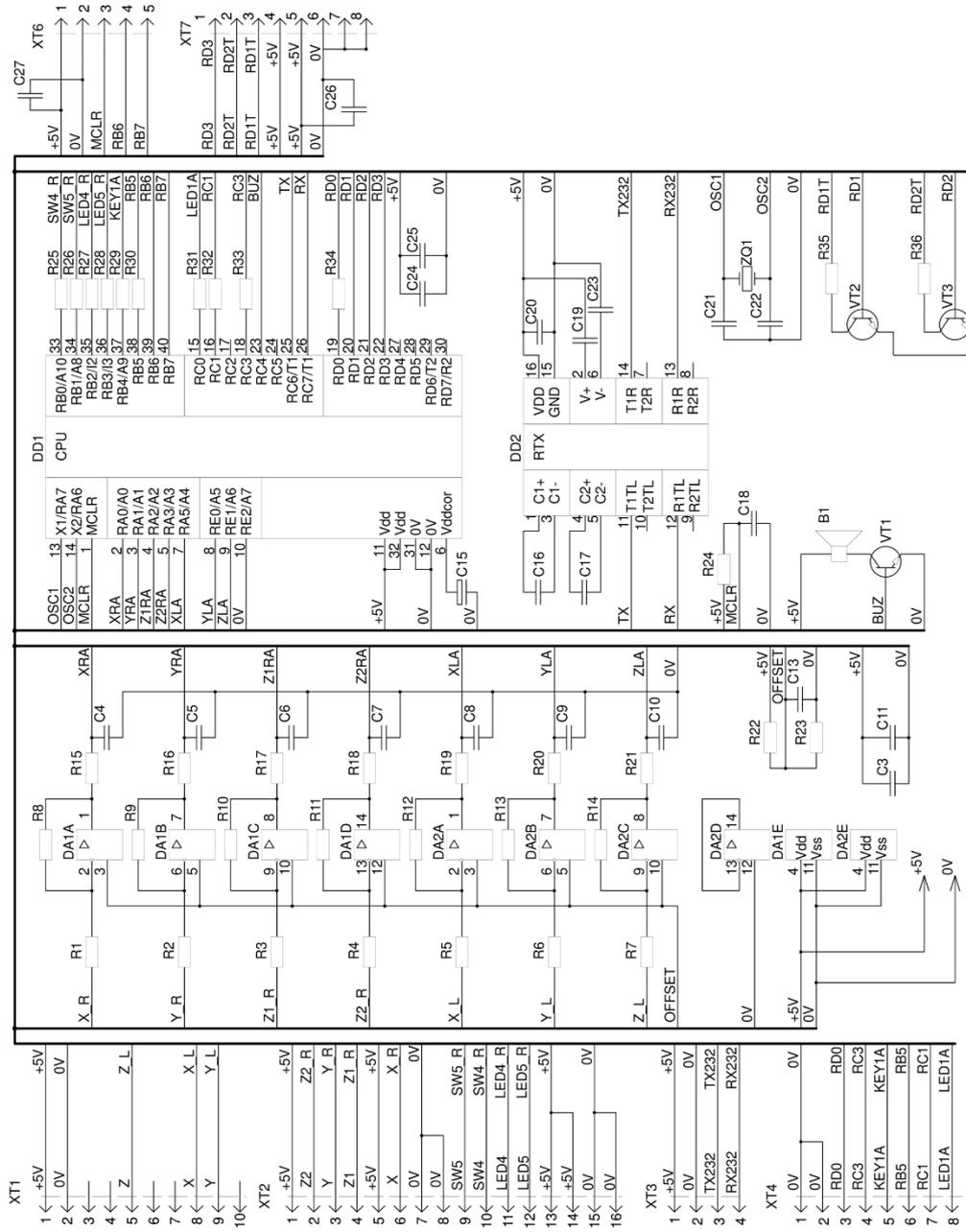
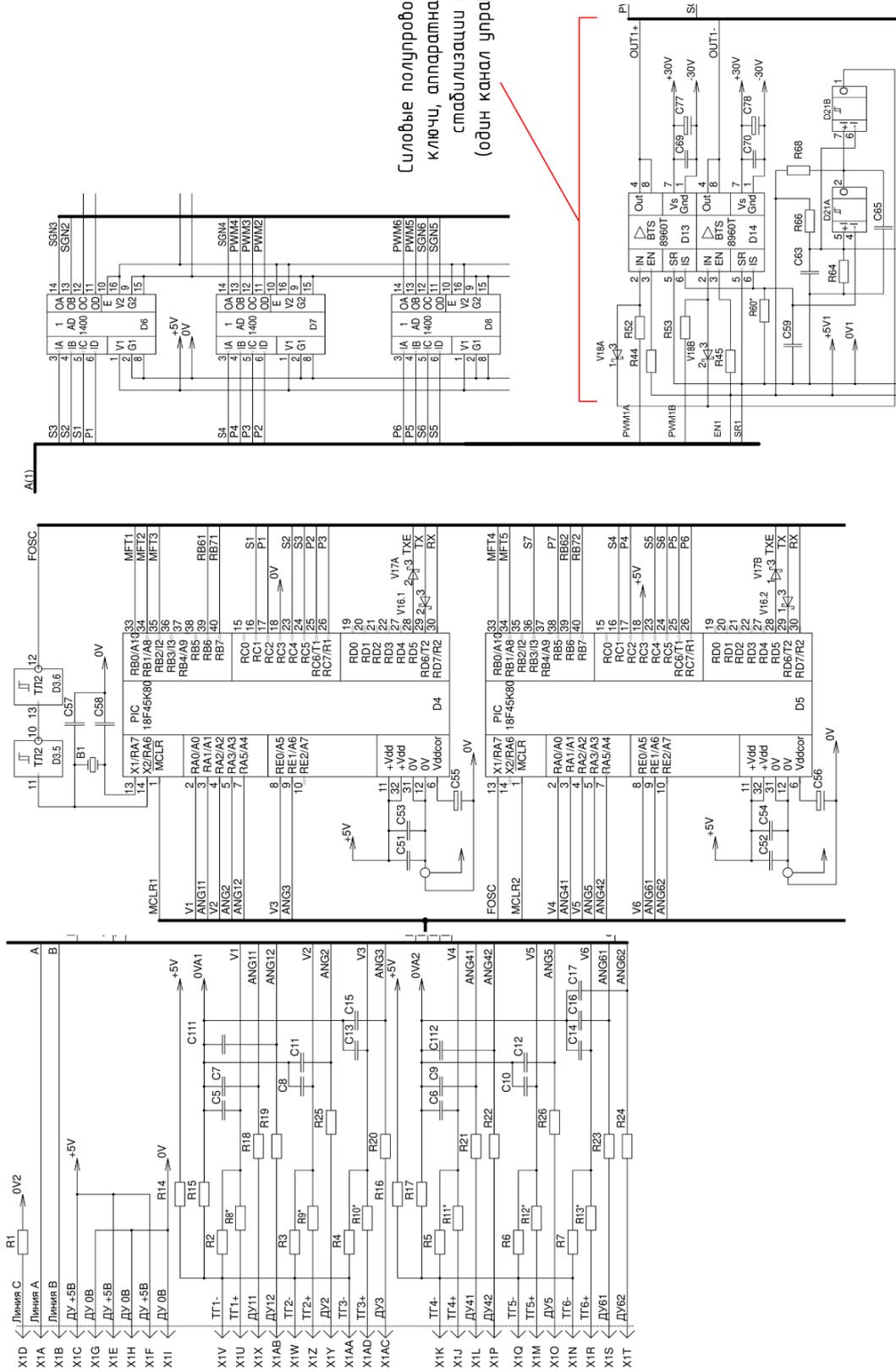


Рисунок 3.5 Фрагмент схемы модуля ввода-вывода

Схема сопряжения с выходными аналоговыми сигналами ИД

Цифровая часть с вычислительными процессорами

Схема гальванической развязки силовых цепей и цепей управления



Силовые полупроводниковые ключи, аппаратная схема стабилизации тока (один канал управления)

Рисунок 3.6 Фрагмент схемы блока управления манипулятором

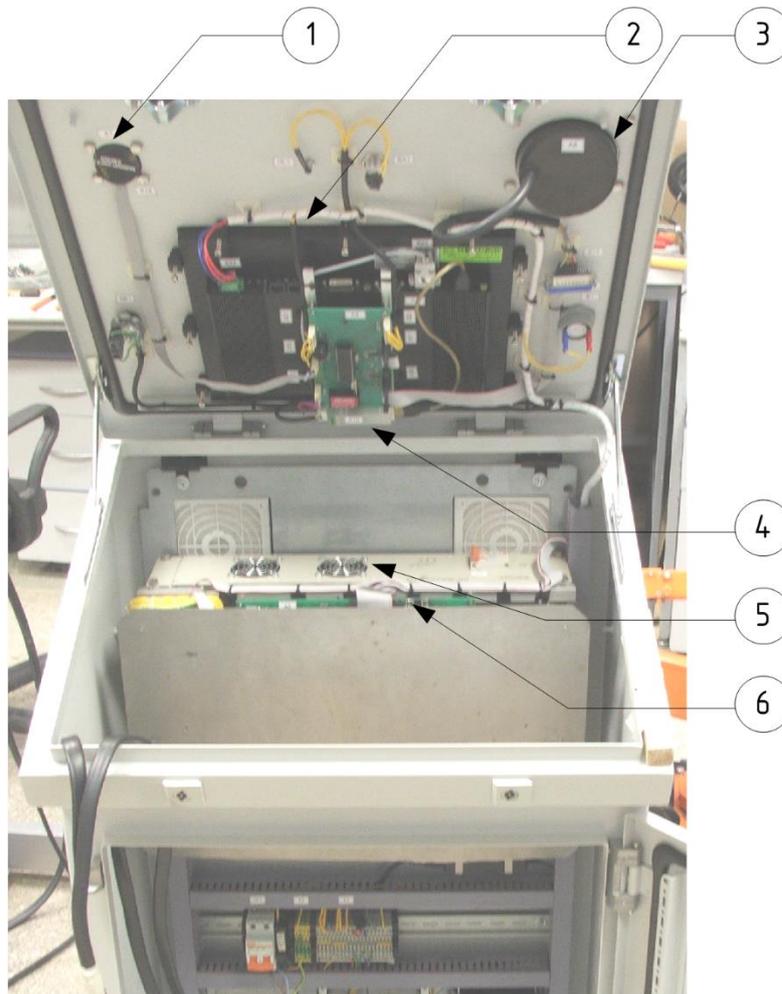
В соответствии с исходными требованиями, компоненты системы управления и человеко-машинного интерфейса размещаются вне камеры (в операторской зоне) в механическом конструктиве моноблочного типа (пульте управления), стыкуемого с исполнительным органом посредством кабелей. Внешний вид пульта управления представлен на рисунках 3.7, 3.8.

Задающие органы ПУ – многокоординатные джойстики MEGATRON серий 896 (правый ЗО) и TRY100 (левый ЗО), имеющие 4 и 3 степени подвижности соответственно. Помимо этого, правый ЗО дополнительно имеет 4 дискретных канала управления (2 из которых являются механически фиксируемыми), а также 2 дискретных единичных канала индикации. Тип чувствительного элемента задающего органа – потенциометрический, с линейной зависимостью «отклонение рукоятки задающего органа» – «выходное напряжение» (максимальная нелинейность характеристики – 1.5% от полного диапазона).



- 1 Промышленный персональный компьютер с сенсорным дисплеем
- 2 Задающий орган с 4 вращательными степенями подвижности (пропорциональными выходными каналами) и 4 дискретными выходными каналами
- 3 Корпус пульта управления
- 4 Ключ блокировки органов управления
- 5 Кнопка аварийного останова манипулятора
- 6 Задающий орган с 3 вращательными степенями подвижности (пропорциональными выходными каналами)

Рисунок 3.7 Пульт управления манипулятора «MP-48»



- ① Задающий орган с 3 вращательными степенями подвижности (пропорциональными выходными каналами)
- ② Промышленный персональный компьютер с сенсорным дисплеем
- ③ Задающий орган с 4 вращательными степенями подвижности (пропорциональными выходными каналами)
- ④ Блок ввода-вывода БВВ-4820 НПКА 48.20.10.000
- ⑤ Блок вторичного электропитания 24В 1600 Вт
- ⑥ Блок управления манипулятором НПКА 48.20.20.000

Рисунок 3.8 Пульт управления манипулятора «MP-48» с открытой верхней крышкой

При отработке аппаратного и алгоритмического обеспечения системы управления и лабораторно-отрабочных испытаниях манипулятора выполнены следующие функциональные тесты и тесты по точности:

1. Проверка массо-габаритных характеристик исполнительного органа на соответствие техническому заданию;
2. Проверка диапазона достигаемых и допустимых диапазонов угловых ориентаций по каждой степени подвижности исполнительного органа.

Значения диапазонов угловых ориентаций обеспечены конструктивно, проверены в ходе эксперимента и соответствуют требованиям технического задания, приведенным в таблице 3.3;

3. Проверка достигаемых угловых скоростей.

Эксперимент состоял в измерении времени угловой переориентации каждого сочленения (степени подвижности) от минимального до максимального углового положения при задании максимальной угловой скорости. В результате испытаний подтверждено выполнение требований технического задания;

4. Проверка грузоподъемности манипулятора.

Согласно техническому заданию, грузоподъемность манипулятора должна составлять не менее 10 кг. Лабораторно-отрабочные испытания осуществлялись последовательно с массами 1 кг, 5 кг, 10 кг, 12 кг. В каждом случае контролировалось выполнение операций перемещения груза из зон, расположенных в одной плоскости ниже точки подвеса манипулятора, перенос груза между плоскостями, расположенными на разных уровнях, подъем груза на полной длине манипулятора на угол 90 [угл. град.] и его дальнейшее удержание тормозными механизмами. Во всех случаях подтверждено функционирование исполнительного органа и системы управления.

5. Проверка погрешности и повторяемости приведения схвата манипулятора в контрольные точки, заданные в декартовой системе координат.

Согласно техническому заданию, погрешность позиционирования схвата манипулятора при автоматическом позиционировании (в режиме воспроизведения записанной траектории) исполнительного органа в заданную точку пространства не должна превышать значения ± 2 мм. Для контроля данного требования выполнены серии испытаний согласно схеме, изображенной на рисунке 3.9.

При выполнении испытаний в схвате исполнительного органа устанавливалось маркерное устройство либо источник точечного лазерного излучения, проецируемый на градуировочную сетку для фиксации положения схвата в плоскости ОХУ. Для регистрации координаты Z на кисти ИО устанавливался лазерный дальномер с разрешающей способностью 0.01 мм.

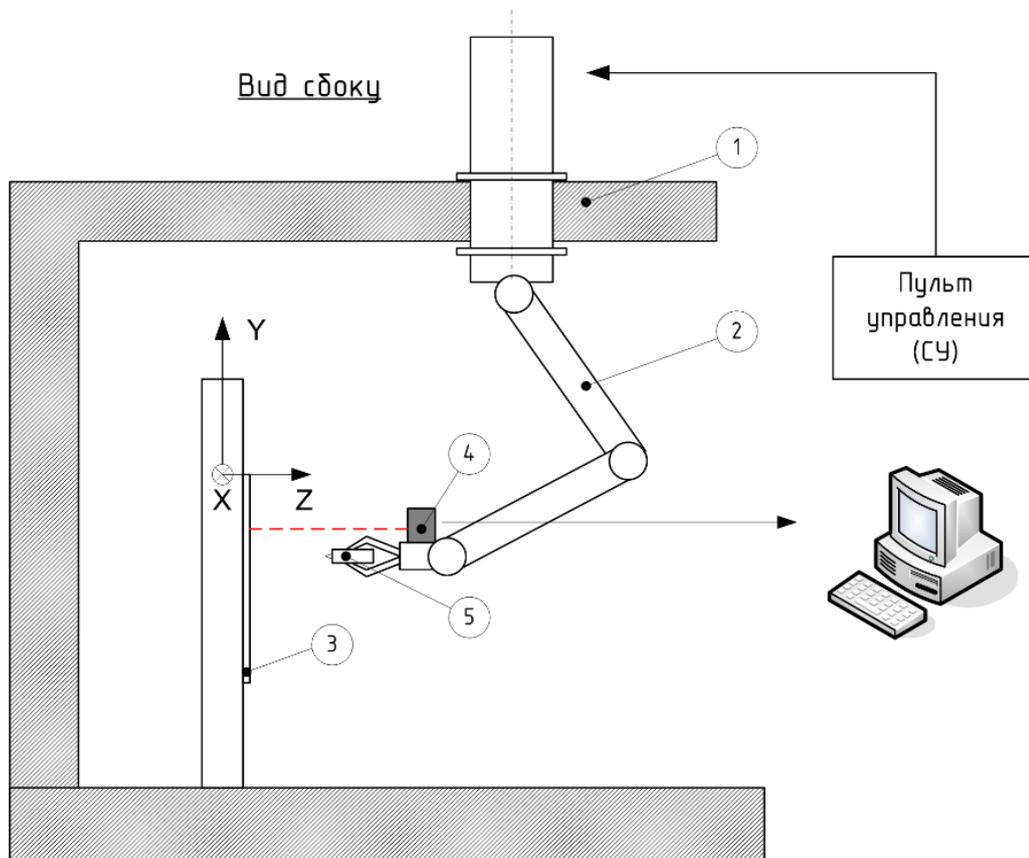
Система управления по заранее записанной траектории перемещает схват манипулятора до достижения окрестности целевой точки (финальной точки схвата). По формированию признака готовности выполнялось измерение положения лазерной метки на градуировочной сетке. Одновременно, по сигналу лазерного дальномера, регистрировалась координата Z. Были выполнены следующие серии измерений: вывод в финальную точку траектории из определенной стартовой точки (по 20 измерений), вывод в финальную точку траектории из произвольного положения манипулятора (по 40 измерений). Аналогичные испытания проведены для полезной нагрузки массой 1 кг и 10 кг. Результаты испытаний приведены на графиках (рисунок 3.10) и в таблице 3.4. При выполнении данного эксперимента по полю начальных точек из рабочей области исполнительного органа максимальные отклонения в финальной точке траектории не превысили величины 1.2 мм относительно требуемых координат.

Таблица 3.4 Результаты испытаний по точности вывода схвата манипулятора в заданную точку пространства

Операция	Среднее значение, [мм]			Максимальное отклонение, [мм]		
	\bar{X}	\bar{Y}	\bar{Z}	$ \Delta\bar{X} $	$ \Delta\bar{Y} $	$ \Delta\bar{Z} $
Вывод в финальную точку X=100 Y=400, Z=150 из начальной точки X=80, Y=350, Z=100 без полезной нагрузки (20 измерений), рисунок 3.10 а)	100,25	399,8	150,7	0,8	0,9	0,7
Вывод в финальную точку X=100 Y=400, Z=150 из начальной точки X=80, Y=350, Z=100 с полезной нагрузкой m=10 кг (20 измерений), рисунок 3.10 в)	100,3	399,2	150,5	0,75	1,3	0,6

Таблица 3.4 (продолжение)

Вывод в финальную точку $X=100$ $Y=400$, $Z=150$ из случайной начальной точки без полезной нагрузки (40 измерений), рисунок 3.10 б)	100	399,6	150,3	1,0	1,0	0,8
Вывод в финальную точку $X=100$ $Y=400$, $Z=150$ из случайной начальной точки с полезной нагрузкой $m=10$ кг (40 измерений), рисунок 3.10 г)	100,7	399,3	150,5	0,75	1,3	0,6



- 1 Технологическая стойка
- 2 Исполнительный орган
- 3 Градуировочная сетка с шагом 0,5 мм.
- 4 Лазерный дальномер с разрешающей способностью 0,01 мм (диапазон 50–150 мм)
- 5 Маркерное устройство либо точечный источник лазерного излучения

Рисунок 3.9 Схема проведения эксперимента по оценке точности позиционирования исполнительного органа

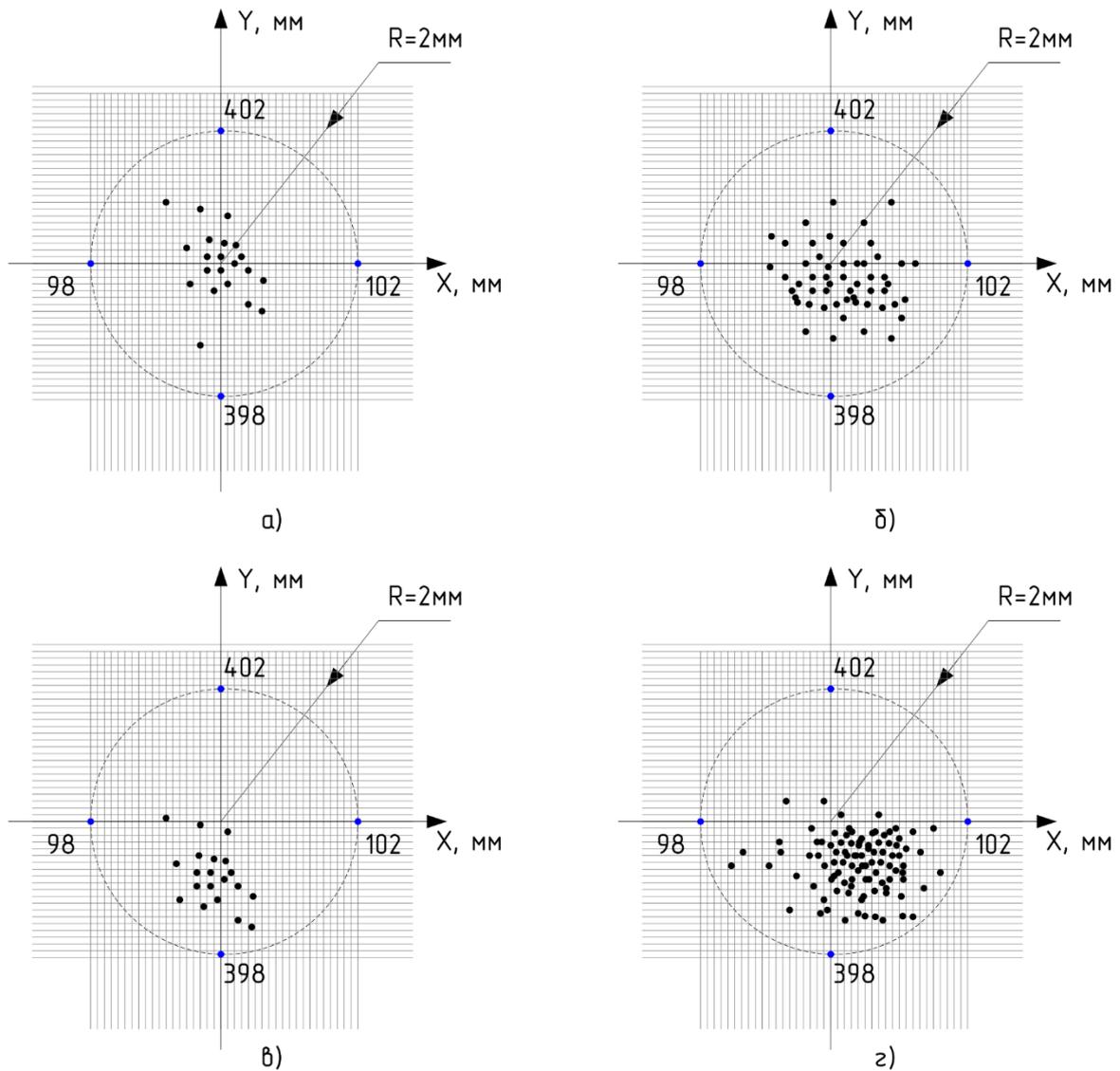


Рисунок 3.10 Результаты испытаний погрешности приведения в заданную точку пространства (изображены точки касания маркера плоскости OXY)

б. Реализация алгоритмов управления манипулятором и защиты от приближения к предельным значениям диапазонов обобщенных координат, вырожденным конфигурациям и виртуальным зонам безопасности.

При проектировании и отладке алгоритмов системы управления применен предложенный в главе 2 подход, позволяющий варьировать величину коэффициентов передачи «отклонение задающего органа» – «скорость движения манипулятора» (в пространстве обобщенных координат или декартовых координат) путем изменения весовых коэффициентов матриц оценки приближения вектора состояния манипулятора к граничным условиям \mathbf{C} и матрицы масштабных коэффициентов \mathbf{K} (2.57).

В качестве базового способа вычисления коэффициентов передачи «задающий орган»–«манипулятор» применена линейная функциональная зависимость коэффициентов

от модуля разности текущего значения компонента вектора состояния (углового положения, декартовой координаты и т.д.) до его пороговой величины, соответствующей границе зоны безопасности. При этом введены ограничения на минимальное (ненулевое) значение коэффициентов ($k_{MIN S_i O_{P_n}}$, $c_{i,k min}$) с целью сохранения минимально необходимой подвижности манипулятора в случае достижения границ зон безопасности или выхода за данные границы для обеспечения возврата к допустимым конфигурациям. Величины предельных отклонений, границ зон безопасности, величины коэффициентов $C_{i,k}$, $k_{MIN S_i O_{P_n}}$, $k_{MAX S_i O_{P_n}}$ а также характер зависимости настраиваются инженерным персоналом по результатам опытной эксплуатации. При этом используются следующие кинематических ограничения:

1. Величина приближения к максимальному радиусу нижней полусферы обслуживания (оценки нормы радиус–вектора схвата манипулятора с учетом примененного инструмента).
2. Величина приближения схвата и сочленений манипулятора к верхней рабочей плоскости зоны обслуживания, параллельной потолку герметичной камеры (оценка координаты Z по каждому сочленению манипулятора).
3. Величина приближения схвата и сочленений манипулятора к нижним рабочим плоскости зоны обслуживания, параллельным полу герметичной камеры (оценка координаты Z по каждому сочленению манипулятора).
4. Величина приближения схвата и сочленений манипулятора к боковым стенкам камеры (оценка координат X, Y по каждому сочленению манипулятора).
5. Оценка степени приближения манипулятора к вырожденным кинематически конфигурациям.
6. Величина приближения схвата и сочленений манипулятора к внутрикамерным препятствиям, геометрические параметры которых задается инженерным персоналом при вводе манипулятора в эксплуатацию в определенной герметичной камере с детерминированным составом внутрикамерного оборудования.

На рисунке 3.11 приведен результат эксперимента по подведению схвата манипулятора к плоскости Z с назначенной границей зоны безопасности $D_{MAX} = 0,1 м$. Точками t_1, t_2 обозначены моменты входа схвата в зону и выхода из зоны безопасности. Внутри зоны безопасности при идентичных управляющих воздействиях (отклонениях) задающего органа

характер скорости изменения координаты Z изменяется в сторону уменьшения (см. «Интервал подведения схвата», «Интервал отведения схвата»). Аналогичным образом функционируют алгоритмы подхода к вырожденным конфигурациям и предельным угловым положениям отдельных степеней подвижности исполнительного органа.

Результаты экспериментов соответствуют предложенному в главе 2 подходу к способу защиты ИО от вырожденных конфигураций ИО, от достижения предельно допустимых углов в кинематических парах, от столкновения с препятствиями внутри зоны обслуживания манипулятора.

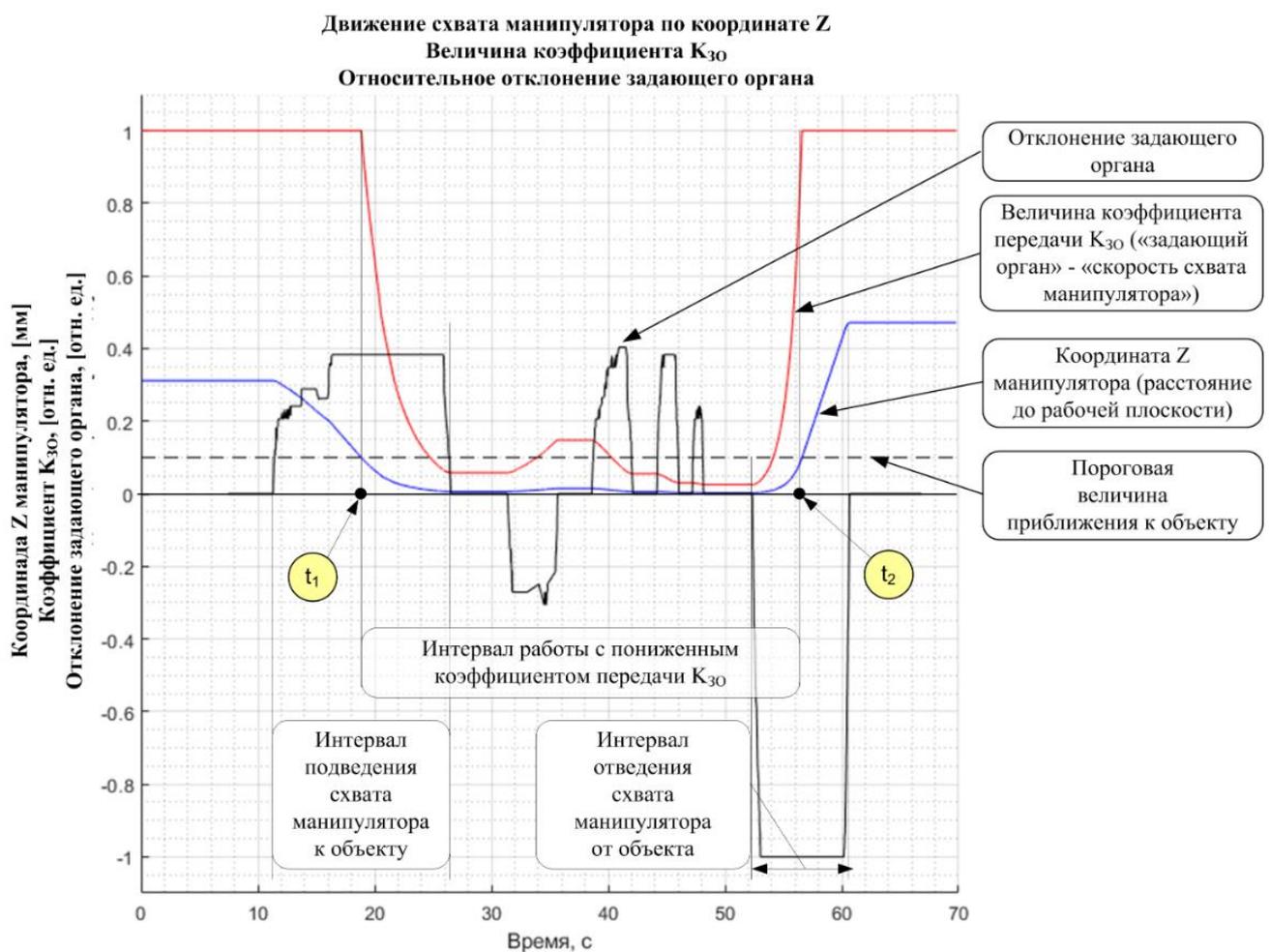


Рисунок 3.11 Пример параметров движения и управления манипулятором с адаптивным коэффициентом передачи управляющих воздействий при выполнении операций вблизи плоскости Z (граница зоны безопасности)

3.2 Реализация программной архитектуры и подсистемы визуализации информации

Программная архитектура СУ реализована в виде нескольких распределенных по вычислительным устройствам процессов, взаимодействующих друг с другом посредством аппаратных (межблочных) и программных коммуникационных интерфейсов, функционирующих в блоке управления манипулятором, блоке ввода-вывода, управляющем компьютере пульта управления, исполняемый код каждого из которых реализует требуемые функциональные возможности.

Программный код алгоритмов управления манипулятором (блок управления манипулятором), алгоритмов приема, фильтрации и адаптации сигналов задающих органов (блок ввода-вывода) реализован на языке С, программные модули для функционирования в инфраструктуре ROS – на языке С++. Состав программных модулей соответствует предложенной в главе 2 архитектуре и включает в себя модули взаимодействия с задающими органами, модули реализации основных алгоритмов управления манипулятором, модули регистрации действий операторского персонала, модули визуализации информации, модули системы технического зрения. На рисунке 3.12 приведен граф взаимодействия основных программных модулей СУ.

С целью введения возможности построения распределенных систем управления и наблюдения, при проектировании подсистемы визуализации, реализован предложенный в работах [36, 46, 48] и главе 2 способ представления информации в виде веб-приложения, базирующийся на следующих информационных технологиях, формирующих единую информационную среду:

1. Языке гипертекстовой разметки HTML;
2. Инструментальных средствах интерпретации HTML-структур (веб-браузерах);
3. Языковых средствах построения алгоритмов и конструкций управления для документов, написанных на языках текстовой разметки (JavaScript);
4. Формальных языках описания внешнего вида документов (CSS);
5. Протоколах межпроцессного взаимодействия между веб-браузером и сервером-поставщиком информации в режиме реального времени (WebSockets);
6. Формате обмена высокоуровневыми сообщениями между отдельными компонентами информационных систем (JSON);

7. Библиотеках представления элементов управления и визуализации (ChartJS и аналогичных).

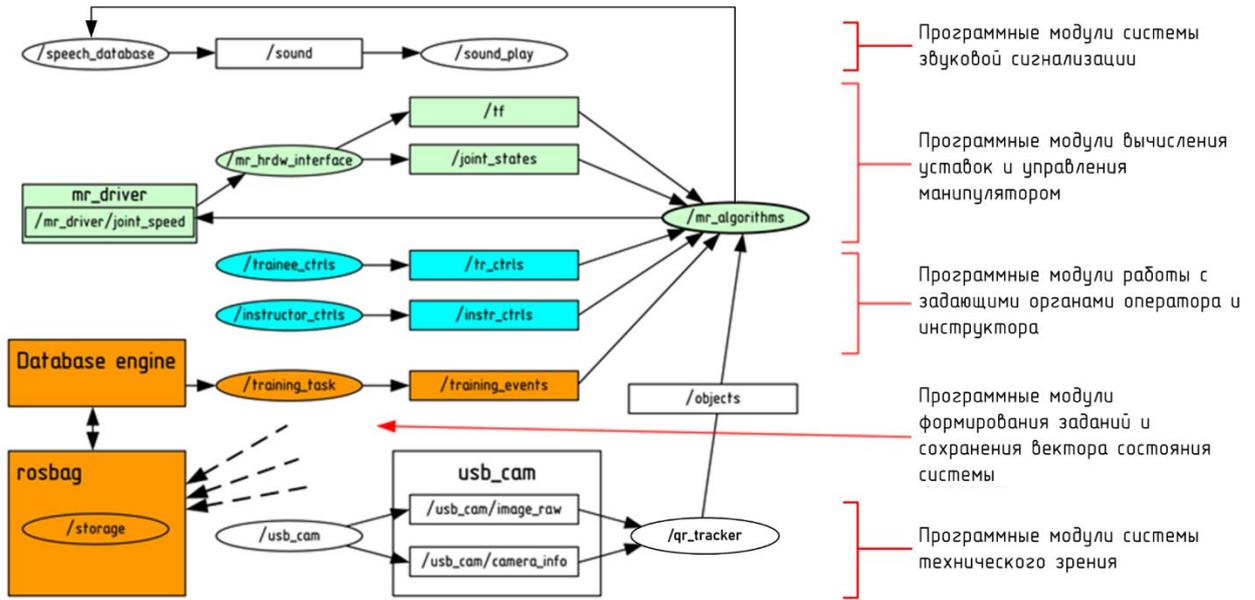


Рисунок 3.12 Состав основных программных модулей СУ, функционирующих на компьютере пульта управления

На рисунке 3.13 представлена реализованная в опытном образце манипулятора и системы управления структура межпроцессного обмена между ядром ROS (поз. 1), программными модулями системы управления (поз. 2), веб-сервером (поз. 3), веб-браузером (поз. 4).

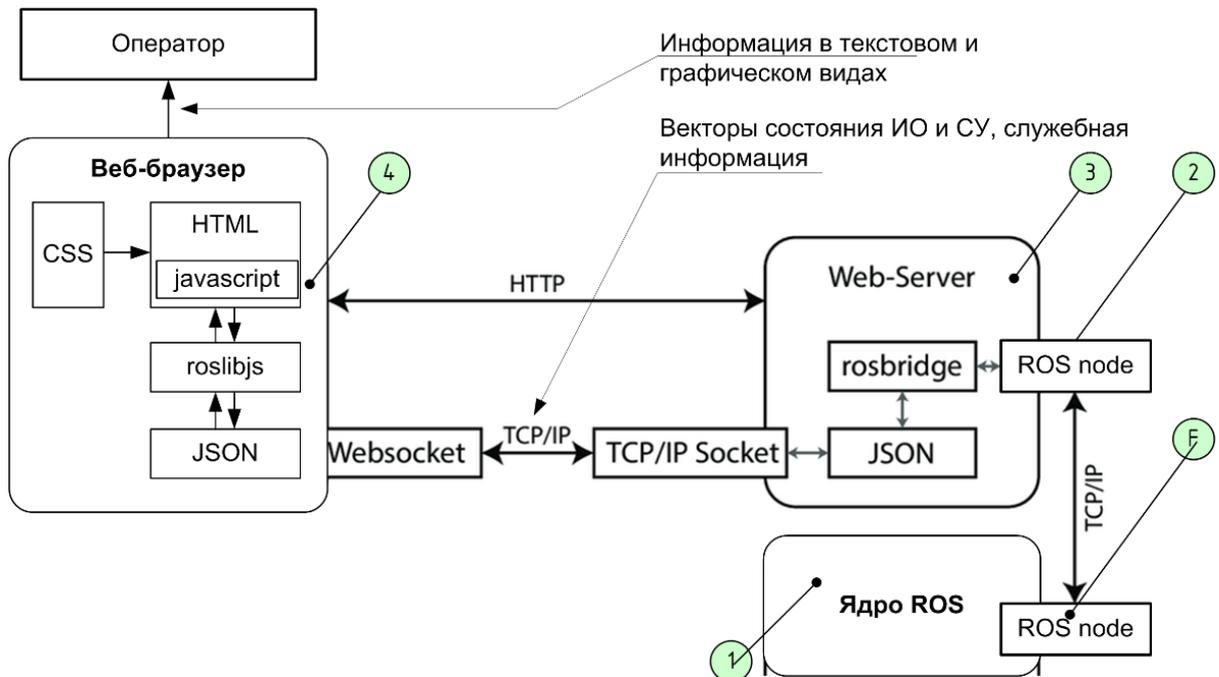


Рисунок 3.13 Структура информационного взаимодействия в подсистеме визуализации

В подсистеме визуализации введены категории выводимой информации. По каждой из

введенных категорий реализованы следующие способы представления информации:

1. Вектор состояния задающих органов:
 - а) текстовый вывод значений относительных отклонений ЗО по пропорциональным каналам (рисунок 3.14);
 - б) графическое представление относительных отклонений ЗО по пропорциональным каналам на плоскости (рисунок 3.14);
 - в) графическое представление состояния дискретных каналов управления ЗО;
2. Вектор состояния исполнительного органа (рисунок 3.15):
 - а) текстовый вывод значений угловых ориентаций и угловых скоростей в сочленениях;
 - б) представление исполнительного органа в виде трехмерной модели, описанной в форматах X3D либо STL;
 - в) представление угловых положений и угловых скоростей в виде временных зависимостей;
3. Матрицы обобщенных координат:
 - а) табличное представление в виде матрицы 4x4 элемента;
 - б) табличное представление в виде вектора положений $\mathbf{p}_{3 \times 1}$ и $\mathbf{s}_{3 \times 1}$, описывающего положение (в виде линейных координат) и ориентацию (в представлении углов Эйлера) системы координат, связанной с текущим звеном;
4. Предупреждающие сообщения, предаварийные и аварийные состояния:
 - а) отображение текста сообщений в поле вывода в виде списка с присвоением идентификаторов времени, источника информации и т.д.;
 - б) цветовое маркирование полей вывода информации пп. 1–3 в случае нахождения соответствующей компоненты вектора состояния внутри границ предаварийного или аварийного диапазонов (рисунок 3.15);
 - в) представление признаков (флагов) предаварийных и аварийных событий в виде таблицы с цветовой подсветкой полей;
 - г) звуковая индикация различного тона;
5. Информация от систем верхнего уровня, тренажерной системы, СУБД (рисунок 3.15):

отображение информации в текстовом и табличном виде в зависимости от подкатегории информации.

Состояние органов управления

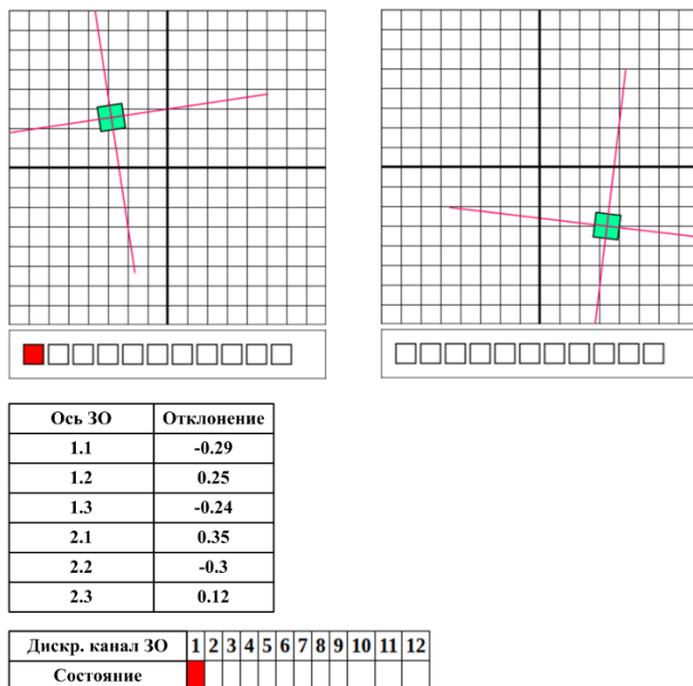


Рисунок 3.14 Текстовое и графическое представление состояния задающих органов в подсистеме визуализации (веб-приложении)

Консоль мониторинга управления МР-48

Общая информация

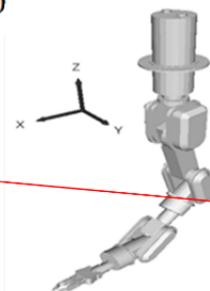
Оператор	Ивченко С.Н.	Инструктор	Павлов И.Н.	Зав № манипулятора	004
Начало работы	05.07.2018 09:45:06	Продолжительность работы	3163 с		
Кол-во сообщений о состоянии МР-48	395710	Кол-во сообщений о состоянии органов управления	6774		

Состояние манипулятора (углы, угловые скорости)

Звено	Угол	Скорость
Основание	69.27	0.00
Плечо	-17.47	0.00
Предплечье	-159.83	0.00
Кисть наклон	-85.59	0.00
Кисть поворот	4.87	0.00
Схват	-0.21	0.00

Состояние органов управления

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Зона вывода информационных сообщений от систем верхнего уровня

Зона табличного и графического представления вектора состояния манипулятора

Цветовое маркирование полей вывода вектора состояния при наступлении предаварийных, аварийных или граничных условий

Рисунок 3.15 Текстовое и графическое представление вектора состояния исполнительного органа, информации от систем верхнего уровня

Результаты лабораторно-отрабочных испытаний и испытаний в условиях реального производства подтверждают корректность функционирования программных модулей системы управления и предложенной в работе программной архитектуры в целом.

3.3 Экспериментальная программа оценки применимости СТЗ

Целью экспериментальной программы являлась оценка возможности применения оборудования СТЗ для решения задач идентификации объектов, времени детектирования QR-кода, оценки точности измерения геометрического положения и ориентации QR-кода в зависимости от размера идентификационного кода, степени освещенности и его положения в пространстве. Также проведена оценка погрешности вывода полюса схвата манипулятора к объекту, идентифицированному QR-кодом по траектории, параметры которой рассчитаны на этапе идентификации положения QR-кода.

Экспериментальные работы по оценке функционирования прототипа СТЗ для работы в герметичных камерах проводились с применением следующего оборудования:

1. Манипулятор UR10, по кинематическим, динамическим характеристикам и параметрам грузоподъемности близкий к манипулятору «MP-48»;
2. Мультиспектральная видеокамера оптического диапазона с разрешением матрицы 2048x2048 пикселей, частотой обновления кадров – 15 кадров/с, коммуникационным интерфейсом Ethernet. Видеокамера установлена на манипуляторе, при этом оптическая ось камеры совпадает с осью вращения схвата манипулятора;
3. Система управления манипулятором в составе штатного блока управления манипулятора UR10 (силовая часть) и пульта управления манипулятора «MP-48» с двумя задающими органами. Такт решения задачи управления (получение входных сигналов датчиков, расчет и формирование управляющих воздействий) – 120 Гц;
4. Люксметр SEW 2330 LX с верхним пределом диапазона измерения 40 000 Лк;
5. Одноосевое поворотное устройство с вертикальной осью вращения для ориентации объекта с QR-кодом;
6. Разработанное программное обеспечение системы управления, включающее в себя программный модуль СТЗ «qr_tracker».

Для решения задач оценки положения и ориентации QR-кода используемая оптическая камера была предварительно откалибрована способом внешней калибровки видеоустройств с использованием тестового изображения «шахматной доски».

В ходе работы была выполнена следующая экспериментальная программа:

1. Оценка времени «захвата» (времени распознавания и анализа) изображения QR-кода нескольких типовых размеров.

На данном этапе программы испытаний объект с нанесенным QR-кодом помещался в поле зрения видеокамеры в геометрической зоне гарантированного распознавания кода, при этом выполнялась регистрация момента времени выдачи сообщения об идентификационных признаках объекта (QR-кода). Осредненные значения времени по результатам 10 измерений для каждого типоразмера кода приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 Оценка времени захвата QR-кода

Количество идентифицированных объектов в поле зрения	Типоразмер QR-кода, (ширина, высота),мм	Дистанция, м	Время захвата, с
1	40 x 40	0,3	0,7
	30 x 30		0,7
	20 x 20		0,75
	15 x 15		0,8
2	40 x 40	0,3	0,74
	30 x 30		0,75
	20 x 20		0,79
	15 x 15		0,85

2. Оценка дистанции гарантированного захвата и сопровождения изображения QR-кода нескольких типовых размеров.

Данный этап предполагал оценку максимальной дистанции (Z_{1max} на рисунке 3.16) гарантированного распознавания идентификационных признаков QR-кода для каждого из типоразмеров. Стоит отметить, что при удалении от зоны «захвата» изображения алгоритмы модуля «qr_tracker» обеспечивают дальнейшее «сопровождение» QR-кода при его удалении от камеры вдоль ее оптической оси. При некотором предельном удалении объекта СТЗ полностью «теряла» QR-код на изображении. Данная дистанция (Z_{2max}) также фиксировалась. На предельной дистанции выполнялось перемещение QR-кода по осям X, Y и переориентирование по углу ϕ (рисунок 3.16) для оценки предельных значений до «потери» QR-кода. Данные приведены в таблицах 3.6, 3.7.

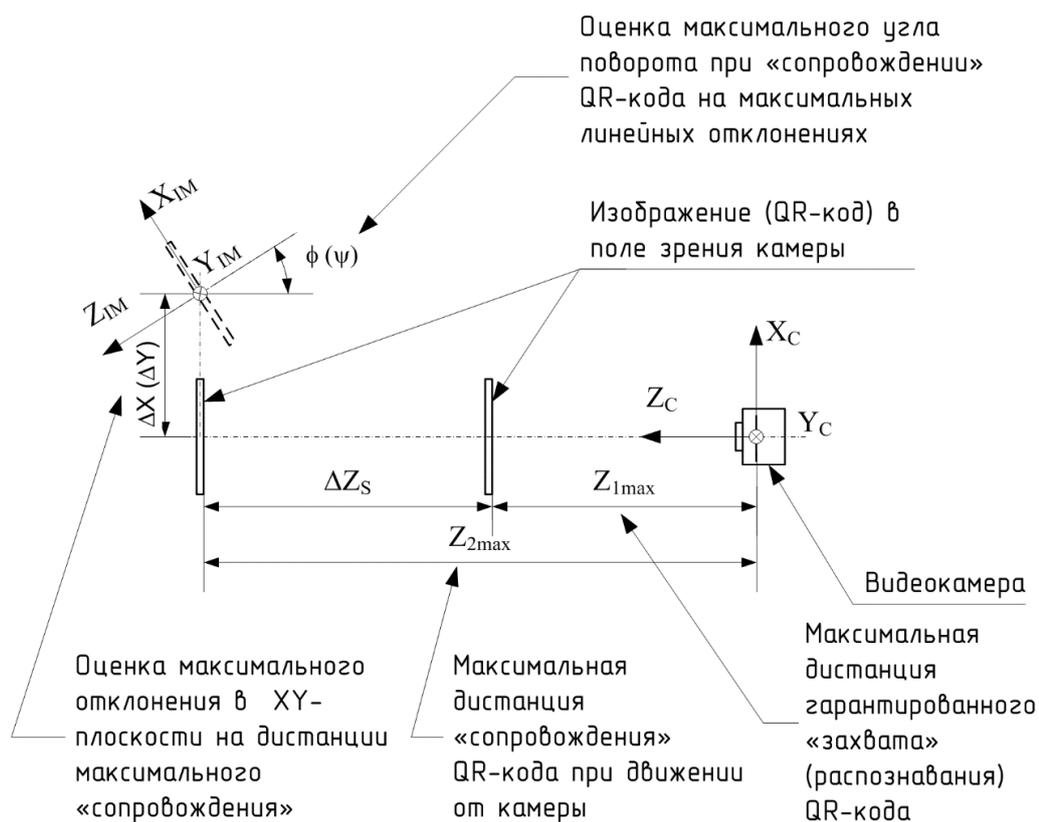


Рисунок 3.16 Схема эксперимента по оценке дистанции гарантированного захвата и «сопровождения» QR-кода

При выполнении смещения QR-кода на максимальной дистанции Z_{2max} по осям X , Y до начала выхода за поле зрения камеры потери признака идентификации QR-кода в СТЗ не наблюдалось.

Таблица 3.6 Оценка дистанции захвата и «сопровождения» QR-кода

Типоразмер QR-кода, (ширина, высота), мм	Дистанция гарантированного захвата Z_{1max} , м	Дистанция гарантированного «сопровождения» Z_{2max} , м
40 x 40	0,4	1,6
30 x 30	0,3	1,4
20 x 20	0,25	1,15
15 x 15	0,2	1,0

Таблица 3.7 Оценка величины угла ϕ на предельной дистанции Z_{2max}

Типоразмер QR-кода, (ширина, высота), [мм]	Предельная величина угла ϕ , [угл. град.]
40 x 40	76
30 x 30	72
20 x 20	71
15 x 15	69

3. Оценка точности определения линейного положения и угловой ориентации изображения QR-кода нескольких типовых размеров.

На данном этапе программы испытаний объект с нанесенным QR-кодом помещался в поле зрения видеокамеры в геометрической зоне гарантированного распознавания кода, в нескольких последовательных пространственных положениях, координаты которых заранее известны, при этом выполнялась регистрация информации о положении объекта, поступающей от СТЗ. В таблицах 3.8, 3.9 приведена выборка результатов измерения для QR-кода типоразмера 20x20 мм при ряде его фиксированных пространственных положений. В целом, по результатам эксперимента можно сделать вывод, что абсолютная погрешность вычисления положения программными средствами СТЗ не превышает 4 мм на расстояниях, превышающих 0.5 м, и составляет не более 1,5 мм в диапазоне расстояний 0–0,5 м, что достаточно для выполнения операций автоматизированного и автоматического захвата технологической тары.

Таблица 3.8 Оценка точности вычисления пространственного положения

Типоразмер QR-кода, (ширина, высота), мм	Пространственное положение (X; Y; Z), м	Максимальная погрешность вычисления положения с помощью СТЗ (X; Y; Z), *10 ⁻³ м
20 x 20	0; 0; 0,5	1,4; 1,5; 3
	0; 0; 0,7	2; 2,5; 2
	0,25; -0,2; 0,7	2,2; 2,6; 3,5
	0,05; 0,05; 0,2	0,8; 0,92; 1,8

Таблица 3.9 Оценка точности вычисления пространственной ориентации

Типоразмер QR-кода, (ширина, высота), [мм]	Пространственное положение (X; Y; Z), [м]	Пространственная ориентация ϕ , [угл. град.] (X=0; Y=0,1м; Z=0,3м)	Максимальная погрешность вычисления ориентации с помощью СТЗ ϕ , [угл. град.]
20 x 20	0; 0,1; 0,3	0	0,2
		10	0,5
		45	1,0
		60	2,5
		75	3,7

Продолжение таблицы 3.9

20 x 20	0; 0; 0,6	0	0,2
		10	1,5
		45	2,9
		60	3,4
		75	4,6

4. Оценка минимального уровня освещенности, необходимого для гарантированного «захвата» изображения.

Цель эксперимента – подтверждение функционирования и сохранения точности алгоритмов детектирования QR-кода при различных уровнях освещенности. Несмотря на в целом достаточный уровень освещенности рабочих зон герметичных камер, существует вероятность возникновения режимов работы с пониженной освещенностью. Экспериментально подтверждена функциональная и точностная работоспособность алгоритмов СТЗ при уровне освещенности объектов более 20 лк.

5. Оценка максимальной линейной скорости движения схвата манипулятора «MP-48» для гарантированного (без потерь информации) сопровождения изображения QR-кода.

При осуществлении эволюций полюса схвата манипулятора изменение положения идентифицируемых объектов в поле зрения видеокамеры от кадра к кадру может быть существенным для работоспособности СТЗ. Величина допустимой скорости схвата зависит от расположения объектов, характера движения манипулятора и ряда других факторов. В таблице 3.10 приведены сводные экспериментальные данные по допустимым величинам линейных скоростей схвата. Следует отметить, что реальные эксплуатационные скорости движения схвата как в режиме автоматизированного управления, так и в автоматических режимах меньше предельных величин скоростей гарантированной работы СТЗ.

Таблица 3.10 Допустимые скорости движения схвата манипулятора

Типоразмер QR-кода, (ширина, высота),мм	Удаленность объекта от камеры (координата Z), м	Характер движения схвата	Максимальная скорость движения схвата, м/с
20 x 20	0,3	В плоскости XY	0,18
		Вдоль оси Z	0,23
20 x 20	0,6	В плоскости XY	0,26
		Вдоль оси Z	0,35

Продолжение таблицы 3.10

40 x 40	0,3	В плоскости XY	0,14
		Вдоль оси Z	0,21
40 x 40	0,6	В плоскости XY	0,29
		Вдоль оси Z	0,4

б. Сравнительная оценка времени подведения схвата манипулятора к объекту в автоматизированном режиме (оператором) и автоматически с использованием системы технического зрения.

При выполнении операций манипулирования технологическими объектами внутри камеры наибольшую визуальную сложность представляют операции установки и взятия объектов из зоны камеры, сопряженной с зоной работы межкамерной транспортной системы, как наиболее удаленной от оператора. Как правило, начальной или конечной точкой технологических операций внутри камеры является именно транспортная система, и в этом случае применение алгоритмов СТЗ совместно с алгоритмами регистрации траектории движения дает максимальный эффект. В таблице 3.11 приведены экспериментально полученные диапазоны интервалов времени выполнения отдельных технологических этапов транспортной операции. Следует отметить, что установка объекта (возвращение технологической тары) на транспортную систему в определенное гнездо приемной кассеты в условиях ограниченной видимости может являться длительной процедурой, в связи с этим применение подсистемы воспроизведения траекторий дает значительный эффект по времени и, в целом, по уменьшению утомляемости оператора.

Таблица 3.11 Экспериментальные результаты оценки времени взятия и транспортировки технологической тары с использованием СТЗ

Выполняемая операция	Время выполнения операции, [с]		
	Автоматизированный режим		Автоматический режим с работой СТЗ и регистрацией траектории
	Оператор с непро-должительным опытом	Оператор с большим опытом	
Подведение схвата манипулятора в приемную зону камеры из промежуточных положений манипулятора	6,5-8	3,5-5	2-3

Продолжение таблицы 3.11

Подведение схвата манипулятора к объекту, идентифицированному QR-кодом	2,5-3,5	2,0-3,0	1,5-2,0
Взятие объекта манипулирования (технологической тары)	5-10	4-8	Выполняется в автоматизированном режиме с регистрацией траектории
Установка (возвращение) объекта на транспортную систему	10-15	7-10	2-3

3.4 Экспериментальные результаты оценки эффективности подсистемы тренажерного обучения

Предложенная в главе 2 архитектура и программная структура системы тренажерного обучения реализована в виде программной 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 банка 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 задающих органов на экране контроля действий подсистемы визуализации информации (рисунок 3.17). Экспериментальные исследования подсистемы тренажерного обучения осуществлялись на манипуляторе «UR10», кинематически-подобном опытному образцу манипулятора «MP-48».

Цель эксперимента: определить степень эффективности подсистемы тренажерного обучения по следующим критериям:

- а) времени выполнения типовых технологических операций или операций управления манипулятором;
- б) величине среднеквадратического отклонения воздействий оператора на задающие органы от требуемой идеальной траектории воздействий.

На рисунке 3.18, в таблице 3.12 приведен пример эксперимента (результатов эксперимента) по оценке действий оператора, осуществляющего перемещение ИО манипулятора «UR10» по одной обобщенной координате до и после программы обучения.

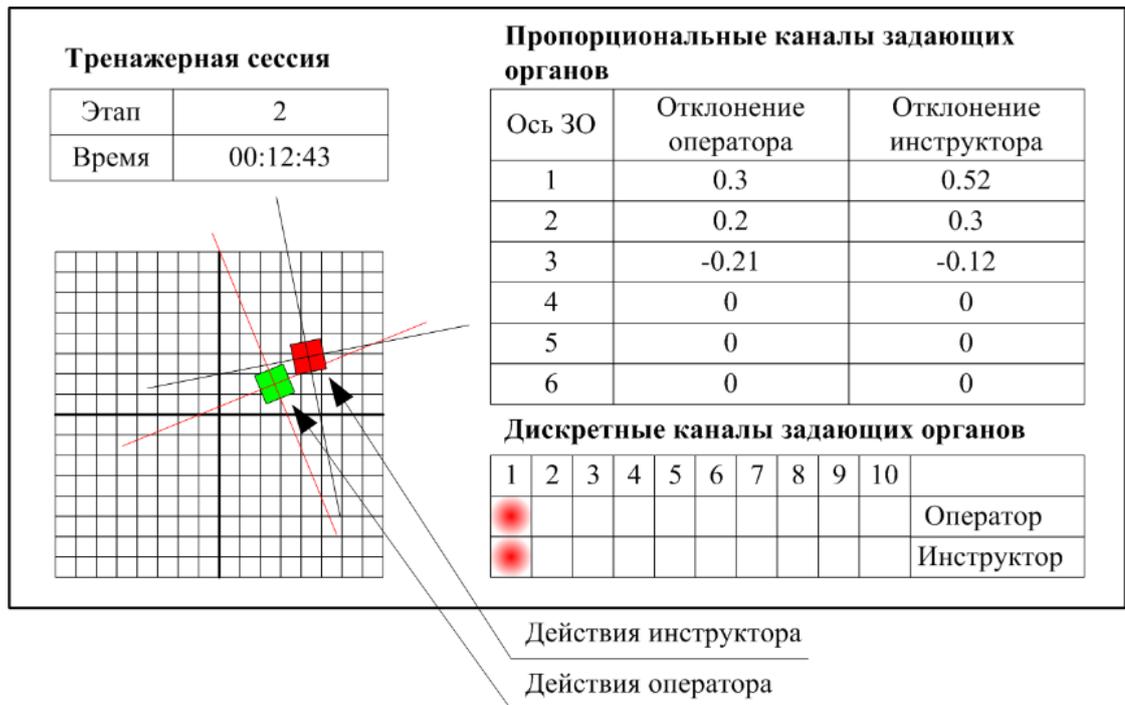


Рисунок 3.17 Окно контроля действий оператора и инструктора подсистемы визуализации информации

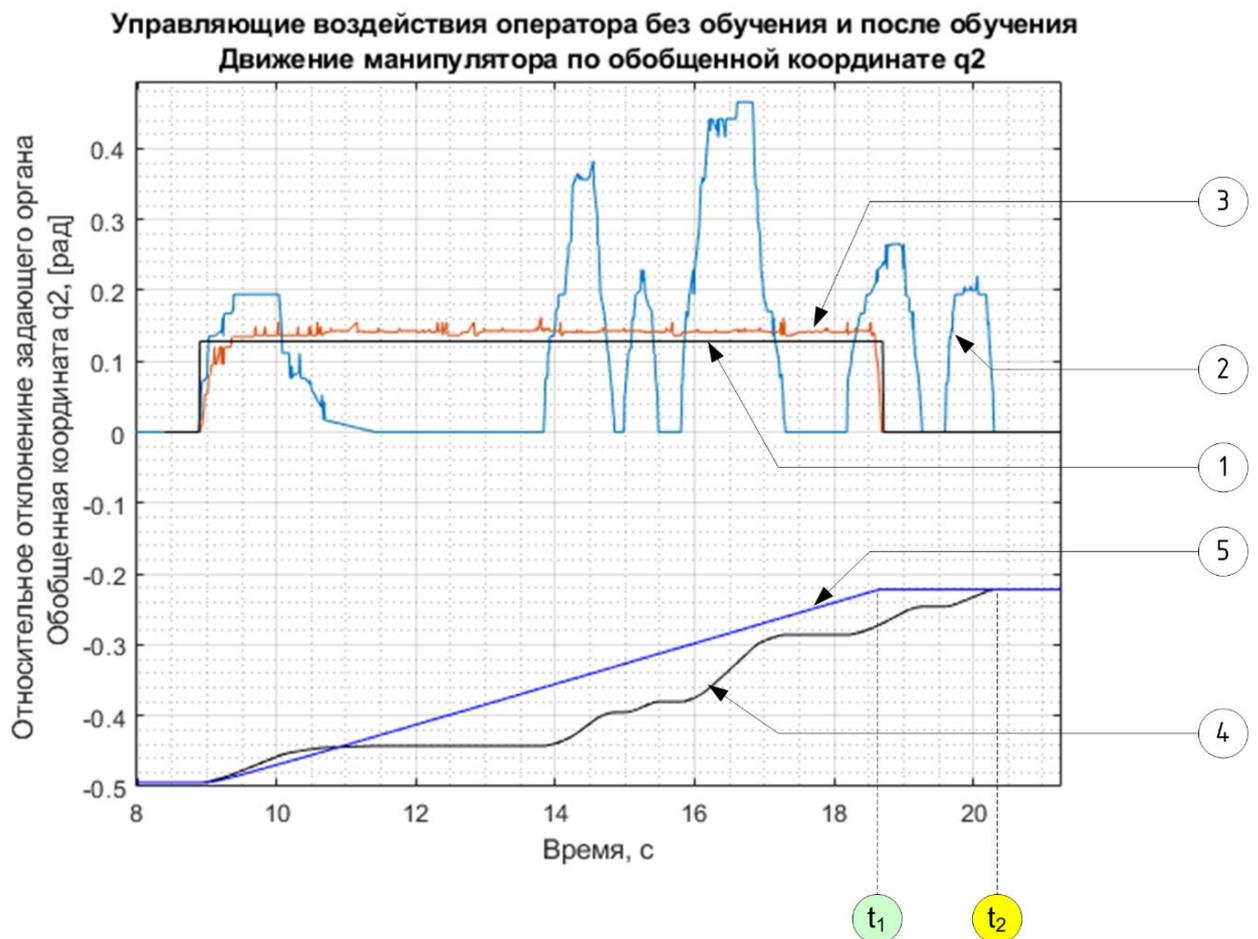


Рисунок 3.18 Пример управляющих воздействий оператора до и после программы обучения при перемещении ИО манипулятора по траектории

На рисунке 3.18 обозначены:

- 1 – идеальная траектория отклонения задающего органа;
- 2 – действия оператора (фактическое отклонение задающего органа), не прошедшего программу обучения;
- 3 – действия оператора (фактическое отклонение задающего органа), после выполнения отдельных элементов тренажерной подготовки (на данном рисунке – после тренажерных сессий суммарной продолжительности 4 часа);
- 4 – фактическое движение манипулятора по обобщенной координате q_2 при действиях оператора, обозначенных п. 2;
- 5 – фактическое движение манипулятора по обобщенной координате q_2 при действиях оператора, обозначенных п. 3.

Таблица 3.12 Оценка критериев качества управления для примера ведения манипулятора по одной обобщенной координате (рисунок 3.18)

Параметр	До обучения	После освоения элементов типовой программы тренажерного обучения
Время выполнения операции, [с]	25	19
Среднеквадратическое значение отклонения траектории воздействий оператора от идеальной (заданной) кривой, [отн. ед.]	0.1285	0.0239
Максимальное отклонение траектории воздействий оператора от идеальной (заданной) кривой, [отн. ед.]	0.3376	0.1281
Погрешность позиционирования схвата манипулятора, [мм]	± 7	± 2

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). Средневзвешенные значения критериев эффективности приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 Средневзвешенные значения критериев оценки выполнения операций в автоматизированном режиме для типовых технологических операций

Операция	До обучения		После выполнения программы обучения (4-6 часов)	
	Время выполнения, [с]	СКО траектории ЗО, [отн. ед.]	Время выполнения, [с]	СКО траектории ЗО, [отн. ед.]
Вывод манипулятора к окну транспортной зоны	21	0.22	6	0.11
Взятие технологической тары из контейнера	18	0.33	8,3	0.09
Транспортирование и позиционирование тары под измерительное оборудование	25	0.24	9,6	0.12
Замена инструмента в магазине инструментов	22	0.29	12	0.18
Вывод манипулятора в парковочную зону	11	0.17	7	0.11

Предложенная система тренажерного обучения совместно с модулем хранения данных СУ обеспечивает хранение всех системных событий, действий оператора и инструктора в базе данных, обеспечивая анализ и визуализацию событий в графическом и текстовом форматах. В таблице 3.14 приведены осредненные значения объемов регистрируемой информации, полученные по результатам опытной эксплуатации.

Таблица 3.14 Типы и объемы данных регистрируемых сообщений системы управления, действий оператора и инструктора

Тип сообщения	Описание	Темп поступления, Гц	Объем регистрируемой информации, МБ/мин
/tr_ctrls /instr_ctrls	Управляющие воздействия на задающие органы оператора и инструктора	1–50	0.1–1

Продолжение таблицы 3.14

/joint states	Кинематическая конфигурация манипулятора (угловые положения и угловые скорости звеньев манипулятора)	50–150	0.5–2
/tf	Матрицы однородных преобразований текущей кинематической конфигурации манипулятора	50–150	0.6–2.5
/training_events	Текстовые и числовые данные сопровождения текущей тренажерной сессии	непериодические	0–0.2
/usb_cam /image_raw	Видеопоток данных от внешней видеокамеры	10–50	5–20

3.5 Результаты испытаний и опытной эксплуатации исполнительного органа и системы управления в условиях действующего производства

Целью проведения испытаний и опытной эксплуатации исполнительного органа и системы управления манипулятора «МР–48» являлось подтверждение заявленных технических характеристик ИО и СУ на соответствие требованиям технического задания на ОКР. Проведение испытаний выполнялось по разработанной и утвержденной Заказчиком программе испытаний.

В процессе испытаний были подтверждены все заданные техническим заданием характеристики манипулятора, а также следующие его возможности:

1. Возможность работы в течение длительного времени (более 1000 часов) в герметичной камере с агрессивной химической средой и радиационными полями (Приложение 1. Акт испытаний № 193–2.1/22064).
2. Возможность выполнения манипулятором движений по ранее записанной траектории а также необходимый и достаточный объем памяти для хранения списка траекторий с количеством траектории, не менее 100, и количеством точек в каждой траектории, не менее 1000.
3. Функционирование системы управления в условиях реального производства:
 - автоматизированном режиме управления по каждой из степеней подвижности исполнительного органа от задающих органов, расположенных на пульте управления;
 - автоматизированном режиме управления движением схвата исполнительного органа по вектору скорости в одной из систем координат, направление и величина которого

- определяется величиной отклонений задающих органов на пульте управления;
- режиме защиты от несанкционированного доступа, режиме блокировки задающих органов, режимах автоматической аварийной остановки по нештатным значениям сигналов датчиков исполнительного органа,
 - режиме предупреждения и дальнейшего предотвращения приближения обобщенных координат манипулятора к их предаварийным и аварийным ограничениям, задаваемым в настройках системы управления;
 - режиме предупреждения и дальнейшего предотвращения (путем снижения коэффициентов передачи отклонений задающего органа) приближения исполнительного органа к его вырожденным конфигурациям.

Электромеханические чувствительные элементы и исполнительные электроприводы, входящие в состав ИО, прошли цикл испытаний и подтвердили свою работоспособность после облучения экспозиционной дозой $1,3 \cdot 10^6$ рентген.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

С целью подтверждения основных результатов теоретической части работы, изложенных в главе 2, проведен комплекс экспериментальных исследований и испытаний опытного образца манипулятора «МР-48» в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации в герметичных камерах реального производства. На основании проведенных работ сделаны следующие выводы и получены следующие результаты:

1. В рамках опытно-конструкторских работ по заказу ФГУП ПО «Маяк» спроектирован и изготовлен опытный образец радиационно-стойкого манипулятора, в состав которого вошла система управления, реализующая предложенные в диссертационной работе принципы ее построения и функционирования.
2. Экспериментально подтверждена работоспособность манипулятора «МР-48» в автоматическом и автоматизированном режимах, задаваемых оператором и системой управления.
3. Выполнена экспериментальная программа лабораторно-отрабочных испытаний и испытаний в условиях реального производства с подтверждением заданных параметров по точности, скорости, диапазону угловых положений степеней подвижности, грузоподъемности и радиационной стойкости манипулятора «МР-48».

4. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных алгоритмов и программного обеспечения адаптивного комбинированного управления манипулятором от двух задающих органов типа «джойстик» с реализацией защиты от нештатных конфигураций исполнительного органа.
5. Реализована и экспериментально подтверждена работоспособность предложенных алгоритмов системы технического зрения, выполнена оценка применимости СТЗ в реальных условиях эксплуатации.
6. Проведена экспериментальная оценка подсистемы тренажерного обучения, подтвердившая эффективность предложенных способов обучения операторов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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

1. Для рассматриваемого класса манипуляторов обоснован выбор 6-звенной кинематической схемы с подвижными сочленениями вращательного типа. Сформулированы требования к конструкции объекта управления (исполнительному органу манипулятора), типу задающего органа, структуре и алгоритмам работы системы управления манипулятором, с учетом влияния вредных факторов окружающей среды.
2. Разработана структура комбинированной системы управления манипулятором и ее программная архитектура, разработан человеко-машинный интерфейс «оператор-манипулятор», в том числе система представления текущей и статистической информации о состоянии исполнительного органа и системы управления с использованием современных информационных технологий (веб-доступ).
3. Предложен способ комбинированного управления 6-степенными манипуляторами с кинематическими парами вращательного типа от двух задающих органов типа «многокоординатный джойстик» с наличием дискретных каналов управления, что позволило реализовать востребованные на практике режимы работы (автоматизированный по текущим командам оператора либо автоматический по заданной или синтезированной по опорным точкам траектории).
4. 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.

5. Для синтезированной структуры системы управления предложен способ функционального расширения ее возможностей путем использования аппаратных и программных средств системы технического зрения. Предложен вариант структуры системы технического зрения, алгоритм автоматизированного позиционирования и ориентирования схвата манипулятора на основе информации, поступающей от системы оптического детектирования объектов, идентифицированных двумерным QR-кодом.
6. Предложена архитектура системы тренажерного обучения и регистрации действий операторов, позволяющая выполнять их эффективное обучение в режимах «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.
7. Разработан и изготовлен опытный образец радиационно-стойкого внутрикамерного манипулятора «МР-48» с системой управления. Введенный в опытную эксплуатацию на ФГУП ПО «Маяк» (госкорпорация «РосАтом») манипулятор реализован с использованием предложенных в работе научных и технических решений.

Указанные выше результаты диссертационной работы получены в рамках опытно-конструкторских работ «Разработка конструкторской документации опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер» и «Изготовление опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер» по заказам ФГУП ПО «Маяк», что подтверждается соответствующими актами (Приложение А, Приложение Б).

Научная новизна работы подтверждается патентом Российской Федерации на полезную модель (Приложение Г) и свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ (Приложение Д), а также публикациями в ряде изданий.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БВВ	– блок ввода-вывода
БД	– база данных
БУМ	– блок управления манипулятором
ЕМР	– единица младшего разряда
ДК	– декартовы координаты
ЗО	– задающий орган
ИО	– исполнительный орган
ЛСУ	– локальная система управления
НРБ	– нормы радиационной безопасности
ОКМ	– обобщенные координаты манипулятора
ОСРВ	– операционная система реального времени
ОЯТ	– отработавшее ядерное топливо
ОЗКП	– обратная задача кинематики по положению
ОЗКС	– обратная задача кинематики по скорости
ОКР	– опытно-конструкторская работа
ОС	– операционная система
ПЗК	– прямая задача кинематики
ПЗКП	– прямая задача кинематики по положению
ПУ	– пульт управления
РТК	– робототехнический комплекс
САД	– система анализа действий
СК	– система координат
СПМ	– степень подвижности манипулятора
СРС	– система регистрации событий
СТЗ	– система технического зрения
СТО	– система тренажерного обучения
СТП	– система тренажерной подготовки
СТТ	– система твердых тел
СУ	– система управления
СУБД	– система управления базами данных
СХД	– система хранения данных
ТК	– тренажерный комплекс

ТТ	– твердое тело
УВС	– управление по вектору силы
УВСК	– управление по вектору скорости
УП	– управление по положению
УТЗ	– учебно-тренировочное задание
УТП	– учебно-тренировочная программа
ХП	– характерные признаки
RFID	– Radio Frequency Identification
ROS	– Robotic Operating System

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоглазов Д. А. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями [Текст] / Д.А. Белоглазов, В.Ф. Гузик, Е.Ю. Косенко – М: Физматлит, 2015 – 297 с.
2. Бондарчук А.С. Интеллектуальные робототехнические и мехатронные системы. [Текст] / А.С. Бондарчук, В.С.Боровик, В.И.Гуцул, В.Г.Евтушенко.–Томск, 2017.– 256 с.
3. Бор-Раменский А.Е. Некоторые принципы построения дистанционно-управляемых копирующих манипуляторов [Текст] / А.Е. Бор-Раменский, В.С. Кулешов, Н.А. Лакота, В.И. Лобачев, Механика машин, выпуск 7-8 – М: «Наука», 1967, стр. 33-42.
4. Борисов О.И.. Методы управления робототехническими приложениями [Текст] / О.И. Борисов, В.С. Громов, А.А. Пыркин, Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 108 с.
5. Брагин В.Б. Системы осязания и адаптивные промышленные роботы. [Текст] / В.Б. Брагин, Ю.Г. Войлов, О.Д. Жаботинский, С.Л. Зенкевич, С.С. Камынин, А.А. Кирильчинко, В.В. Ключев [и др.] – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
6. Булгаков А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление.[Текст] / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев. – М.:СОЛОН ПРЕСС, 2008. – 488 с.
7. Буч Гради. Объектно–ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на С++ [Текст] / Буч Гради, Rational Santa – Clara, Калифорния, 359 с.
8. Вапник В.Н. Теория распознавания образов. Статистические проблемы обучения. [Текст] / В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис. – М.:Наука, 1974. – 416 с.
9. Гороховатский В.А. Структурный анализ: интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении [Текст] / Гороховатский В.А. – Харьков: Компания СМИТ, 2014. – 323 с.
10. Грошев И.В. Системы технического зрения и обработки изображений [Текст] / И.В. Грошев, В.И. Корольков. – Российский университет дружбы народов, Москва, 2008. – 212 с.
11. Егоров И.Н. Позиционно–силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами [Текст] / Монография / И. Н. Егоров.– Владимир: Изд–во Владим. гос. ун–та, 2010. – 192 с.

12. Зенкевич С.Л. Управление роботами [Текст] / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400 с.
13. Игнатова Е.И. Компьютерное моделирование исполнительных систем роботов [Текст] / Е.И. Игнатова, Н.В. Ростов.– Спб.:Изд-во Политехн. Ун-та, 2009. – 160с.
14. Ильин В. А. Алгоритмы планирования поведения интегральных роботов в условиях неполной информации о структуре внешней среды. [Текст] / В. А. Ильин. – Томск: Изд-во Томского университета, 1990. – 270 с.
15. Каляев И.А. Интеллектуальные роботы [Текст] / И.А. Каляев, В.М. Лохин, И.М. Маркаров, С.В. Манько, М.П. Романов, Е.И. Юревич. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.
16. Кареева Е.Д. Основы многопоточного и параллельного программирования. [Текст] / Е.Д. Кареева. – Красноярск.: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 356 с.
17. Козлов В.В. Динамика управления роботами [Текст] / В.В. Козлов, В.П. Макарычев, А.В. Тимофеев, Е.И. Юревич. – М.: Наука, 1984. – 336 с.
18. Кобринский А.Е. Некоторые проблемы теории манипуляторов [Текст] / А.Е. Кобринский, Ю.А. Степененко, Механика машин, выпуск 7-8 – М: «Наука», 1967, стр. 4-23.
19. Козырев Ю.Г. Захватные устройства инструменты промышленных роботов [Текст] / М.:Кнорус, 2010. – 312 с.
20. Колюбин С.А. Динамика робототехнических систем [Текст] / Учебное пособие. – Спб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с.
21. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники. [Текст] / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – Наука, 2006. – Кн.1. – 383 с.
22. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники. [Текст]/ А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес – Наука, 2006 – Кн.2 – 376 с.
23. Корытов М.С. Автоматизация синтеза оптимальных траекторий перемещения грузов мобильными грузоподъемными кранами в неоднородном организованном трехмерном пространстве [Текст] / М.С. Корытов. – Омск: СибАДИ, 2012. – 380 с.
24. Кулаков Ф.М. Супервизорное управление манипуляционными роботами [Текст] –М.: Наука, 1980. – 448 с.
25. Кулешов В.С. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы [Текст] / В.С. Кулешов, Н.А.Лакота, В.В. Андрюнин, – Машиностроение, 1986. – 328 с.

26. Кулешов В.С. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. [Текст] / Н.А. Лакота, В.В. Андриунин, Машиностроение, 1986.–328с.
27. Ласточкин А.А. Элементы и системы управления робототехнических комплексов для экстремальных сред [Текст] / А.А. Ласточкин, А.М.Потапов. – ЛДНТП, 1990. – 86 с.
28. Логунов М.М. Принципы устройства универсальных механических копирующих манипуляторов [Текст] / М.М. Логунов, Механика машин, выпуск 7-8 – М: «Наука», 1967, стр. 68-75.
29. Манипулятор МР-48 для атомной промышленности // Патент РФ №172431 U1, 07.07.2017. Бюл. № 19. / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, И.Ф. Круглов, Б.А. Морозов, М.В. Носиков.
30. Международная научная–техническая мультikonференция. «Актуальные проблемы информационно–компьютерных технологий, мехатроники и робототехники. Экстремальная робототехника нано–, микро– и макророботы». [Текст] // Материалы XX Международной научно–технической конференции. – ТТИ ЮФУ, 2009.
31. Магергут В.З. Роботы с компьютерным управлением / В.З. Магергут, В.Г. Рубанов, Д.А. Юдин [и др.]. – Б.: БГТУ, 2010. – 153 с.
32. Назаретов В.М. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. [Текст] / В.М. Назаретов, Д.П. Ким. – М.: Высш. шк., 1986. – 144 с.
33. Назиров Р. Р. Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2012». [Текст] / С. Ю. Желтов, Ю. В. Визильтер. – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2012. – 291 с.
34. Носиков, М.В. Алгоритмическое обеспечение зон безопасности манипулятора МР-48 [Текст] / А.М. Казанцев, М.В. Носиков // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 71 научной конференции ЮУрГУ. – 2017. – С. 478 – 486.
35. Носиков, М.В. Архитектура и алгоритмы функционирования системы технического зрения радиационно-стойких манипуляторов [Текст] / М.В. Носиков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 7. – С. 11 – 24. – DOI: 10.18698/0536-1044-2019-7-11-24.
36. Носиков, М.В. Архитектура тренажерной системы подготовки операторов радиационно-стойких манипуляторов [Текст] / М.В. Носиков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление,

- радиоэлектроника» – 2019. – Т. 19. – № 2. – С. 38 – 54.
37. Носиков, М.В. Использование двумерных матричных кодов для задач идентификации и наведения РТК на объекты [Текст] / М.В. Носиков // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 71-й научной конференции ЮУрГУ. – 2019. – С. 593 – 601.
38. Носиков, М.В. Радиационно-стойкие манипуляторы и методы расширения их функциональных возможностей [Текст] / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, Б.А. Морозов, М.В. Носиков // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции: труды 29 международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург. – 2018. – С. 114 – 125.
39. Носиков, М.В. Робот-манипулятор МР-48 для атомной промышленности [Текст] / И.В. Войнов, А.М. Казанцев, М.В. Носиков // Пром-Инжиниринг: труды IV международной научно-технической конференции. Москва-Челябинск-Новочеркасск. – 2018. – С. 270 – 275.
40. Носиков, М.В. Синтез системы управления радиационно-стойким манипулятором МР-48 для защищенных камер [Текст] / М.В. Носиков // «Экстремальная робототехника-2019»: труды 30 международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург. – 2019. – С. 425 – 440.
41. Носиков, М.В. Система управления роботом-манипулятором с использованием нейросетевых алгоритмов ограничения рабочей области схвата [Текст] / 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. – № 1. – С. 29 – 36.
42. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации [Текст]– М.: Наука. Главная редакция физико–математической литературы, 1981. – 208 с.
43. Платонов А.К. Программное обеспечение промышленных роботов [Текст] / А.Н. Домарацкий, Р.К. Казакова. – Москва, издательство «Наука», 1986 г. – 273 с.
44. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота–манипулятора [Текст] / Р. Пол. – М.:Наука, 1976. – 104 с.
45. Потапова Р. К. Речевое управление роботом [Текст] / Р. К. Потапова – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.

46. Программа для визуализации состояния и управления 6-степенным манипулятором с ангулярной системой координат / М.В. Носиков; Свидетельство 2019617582 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). – №2019616219; заявл. 29.05.19; опубл. 17.06.19.
47. Программа настройки и визуализации параметров задающих органов человеко-машинного интерфейса для управления радиационно-стойкими робототехническими комплексами в среде ROS / М.В. Носиков; Свидетельство 2020614430 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). – № 2020614430; заявл. 20.03.20; опубл. 08.04.20
48. Программа для регистрации действий операторского и инструкторского персонала тренажерной системы радиационно-стойких манипуляторов / М.В. Носиков; Свидетельство 2019663357 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Правообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (RU). – №2019663357; заявл. 01.10.19; опубл. 15.10.19.
49. Руднев А.А. Методы обработки видеoinформации в системах технического зрения промышленных роботов с применением Matlab. [Электронные ресурсы] / А.А. Руднев, Д.А. Юдин. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 33 с.
50. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение.[Текст]/ Г.А. Спыну. – К.: Высш. шк., 1991. – 311 с.
51. Тотухов К. Е. Интеллектуальная система компьютерной симуляции промышленных роботов сферической компоновки.[Текст] / К. Е. Тотухов, Диссертация, Кубанский государственный технический университет, Краснодар, 2015. – 178 с.
52. Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://фцп-яроб2030.рф/about/archiv/>, свободный. – Загл. с экрана.
53. Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами [Текст] / В.Н. Фрадкин, А.Л. Якубович. – М.:Наука, 1981. – 448 с.
54. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Д. Форсайт, Жан Понс. Пер. с англ.,– М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
55. Фу К. Робототехника [Текст] / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли–М.: Мир, 1989. – 624 с.

56. Цаленко М.Ш. Моделирование семантики в база данных [Текст] / М.Ш. Цаленко. – М.:Наука, 1989. – 288 с.
57. Шейна Г.П. Приводы и элементы систем управления роботов и манипуляторов [Текст] / Г.П. Шейна, В.П. Беляев. – Минск, 1998. – 71 с.
58. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. [Текст] / Д.Б. Юдин. – М.: Советское радио, 1974. – 400 с.
59. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами [Текст] / Е.И. Юревич. – Санкт–Петербург, 2000. – 85 с.
60. Ямпольский Л.С. Промышленная робототехника [Текст] / В.А. Яхимович, Е.Г. Вайсман [и др.] – К.: Техніка, 1984. – 264 с.
61. Adorno, V. Two-arm Manipulation: From Manipulators to Enhanced Human-Robot Collaboration / V.V. Adorno. – Université Montpellier 2, 2011. – 164 p.
62. Angeles, J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems [Текст] / J. Angeles. – Springer, 2014. – 589 p.
63. Angerer, A. Object-Oriented Software for Industrial Robots [Текст] / A. Angerer. – Augsburg University, 2014. – 263 p.
64. Apurda, D. Digital Communication: Principles and System Modelling [Текст] / D. Apurda. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 246 p.
65. Bergen, G. Collision Detection in Interactive 3D Environments [Текст] / G. Bergen. – Elsevier, 2004. – 278 p.
66. Blahut, R.E. Modem Theory: An Introduction to Telecommunications [Текст] / R.E. Blahut. – Cambridge University Press, 2010. – 497 p.
67. Chetto, M. Real-time Systems Scheduling 1: Fundamentals [Текст] / M. Chetto. – John Wiley&Sons, 2014. – 273 p.
68. Chetto, M. Real-time Systems Scheduling 2: Focuses [Текст] / M. Chetto. – John Wiley&Sons, 2014. – 251 p.
69. Corke, P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB [Текст] / P. Corke. – Springer, 2011. – 570 p.
70. Cubero, S. Industrial Robotics Theory, Modelling and Control [Текст] / S. Cubero. –Advanced Robotic Systems International, 2007. – 952 p.
71. Ericson, C. Real-Time Collision Detection [Текст] / D.H. Eberly, C. Ericson. – Elsevier Inc., 2005. – 189 p.

72. Gacovski Z. Mobile Robots – Current Trends [Текст] / Z. Gacovski. – InTech, 2011. – 414 p.
73. Helander, M.G. Handbook Of Human-Computer Interaction [Текст] / M.G. Helander, T.K. Landauer, P.V. Prabhu. – Elsevier, 1997. –1603 p.
74. Ibrahim, H. 9th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications [Текст] / H. Ibrahim, S. Iqbal, S.S. Teoh, M.T. Mustaffa. – Springer, 2017. – 861 p.
75. Inaki, M. Human Machine Interaction: Getting Closer [Текст] / M. Inaki. – InTech, 2011. – 260 p.
76. Jabłoński, R. Advanced Mechatronics Solutions [Текст] / R. Jabłoński. – Springer, 2016. – 668 p.
77. Jacko, J. Human-Computer Interaction: Theory and Practice (Part II) [Текст] / J. Jacko, C. Stephanidis. – Lawrence Erlbaum Associates, 2003. –1450 p.
78. Herbordt, W. Sound Capture for Human/Machine Interfaces [Текст] / W. Herbordt. – Springer, 2005. –273 p.
79. Kim, J. Virtual Reality [Текст] / J.-J. Kim. – InTech, 2011. – 672 p.
80. Koubaa, A. Robot Path Planning and Cooperation [Текст] / A. Koubaa, H. Bennaceur, I. Chaari [и др.]. – Springer, 2018.– 201 p.
81. Laplante, P.A. Real-Time Systems Design And Analysis [Текст] / P.A. Laplante, S.J. Ovaska. – IEEE Press, 2004. – 530 p.
82. Lenarcic, J. Intelligent Systems, Control, And Automation: Science And Engineering [Текст] / T. Bajd, J. Lenarcic, M.M. Stanišić // Robot Mechanisms. – Springer, 2013. – 333 p.
83. Levesque, J. Programming for Hybrid Multi/Manycore MPP Systems [Текст] / J. Levesque. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. – 374 p.
84. Low, K.-H. Industrial Robotics Programming, Simulation and Applications [Текст] / K.-H. Low. – InTech, 2006. – 677 p.
85. Lumelsky, V. Sensing, Intelligence, Motion [Текст] / V. Lumensky. – John Wiley&Sons, 2006. – 431 p.
86. Merz, S. Modeling and Verification of Real-Time Systems [Текст] / S. Merz, N. Navet. – ISTE Ltd, 2008. – 387 p.

87. Miller, M.R. Robots and Robotics [Текст] / M.R. Miller, R. Miller. – McGraw Hill Education, 2017. – 525 p.
88. Munro, N. Robot Manipulator Control [Текст] / N. Munro, F.L. Lewis, D.M. Dawson, C.T. Abdallah. – Marcel Dekker, 2004. – 607 p.
89. Nagata, F. Controller Design for Industrial Robots and Machine Tools. Applications to Manufacturing Processes [Текст] / F. Nagata, K. Watanabe. – Woodhead Publishing, 2013. – 231 p.
90. Nonami, K. Autonomous Control Systems and Vehicles: Intelligent Unmanned Systems [Текст] / K. Nonami, M. Kartidjo, K.-J. Yoon, A. Budiyo. – Springer, 2013. – 315 p.
91. Nosikov, M.V. Architecture of Human-controlled Arm Manipulator Operator Training System [Текст] / M.V. Nosikov // Proceedings of the Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 2018. pp. 1-6, DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570118.
92. Nosikov, M.V. Automatic and Manual Control Algorithms of Radiation-Proof Manipulators [Текст] / 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.
93. Nosikov, M.V. Robot-Manipulator MR-48 for Nuclear Industry [Текст] / 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.
94. Pires, J. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future [Текст] / J.N. Pires. – Springer, 2007. – 276 p.
95. Quigley, M. Programming Robots with ROS [Текст] / M. Quigley, B. Gerkey, W.D. Smart. – O'Reilly Media, 2010. – 116 p.
96. Sarkar, N. Human-Robot Interaction [Текст] / N. Sarkar. – InTech, 2007. – 521 p.
97. Sears, A. Human-Computer Interaction [Текст] / A. Sears, J. A. Jacko. – Taylor&Francis Group, 2009. – 302 p.
98. Siewert, S. Real-Time Embedded Components and Systems. With LINUX and RTOS [Текст] / S. Siewert. - Mercury Learning And Information, 2016. – 475 p.
99. Siciliano, B. Handbook of Robotics [Текст] / B. Siciliano, O. Khatib. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. – 226 p.
100. Sturges, R.H. Practical Field Robotics: A Systems Approach [Текст] / R. H. Sturges. –

- John Wiley&Sons, 2014. – 216 p.
101. Sun, Y. New Development in Robot Vision [Текст] / Y. Sun, A. Behal, C. R. Chung. – Springer, 2014. – 199 p.
 102. Tadokoro, S. Rescue Robotics. DDT Project on Robots and Systems for Urban Search and Rescue [Текст] / S. Tadokoro. – Springer, 2009. – 192 p.
 103. Topalov, A. Recent advances in mobile robotics [Текст] / A.V. Topalov. – InTech, 2011. – 452 p.
 104. Tribak, H. QR Code Patterns Localization based on Hu Invariant Moments [Текст] / H. Tribak, Y. Zaz // International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 8(9). – The Science and Information, 2017. – pp. 162-172.
 105. Zaphiris, P. Human Computer Interaction: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications [Текст] / P. Zaphiris, C.S. Ang. – Information Science reference, IGI Global, 2009. – 2734 p.
 106. Zhao, J. Advanced Theory of Constraint and Motion Analysis for Robot Mechanisms [Текст] / J. Zhao, Z. Feng, F. Chu, N. Ma. – Elsevier, 2014. – 480 p.
 107. Zhukov A.V. A robotic complex for hot cells and a training simulator. / A.V. Zhukov, V.V. Prikhodko, V.V. Svetukhin, A.A. Sobolev, E.M. Chavkin, A.N. Fomin, P.E. Kapustin, V.E. Kiryukhin, V.V. Levshchanov – Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS. – SaintPetersburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks "Gangut" Publ., 2019. – 418-424 pp.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт внедрения результатов кандидатской
диссертационной работы

info@npkcalibr.ru www.npkcalibr.ru



456320, Челябинская область, г. Миасс, ул. Богдана Хмельницкого, д. 64, кв.46 Тел. +7 (3513) 298932
Почтовый адрес: 456317, Челябинская область, г. Миасс, а/я 732 Факс +7 (3513) 298978

Научно-производственная компания «Калибр»

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Зоткин С.В.

« 12 » 10 20 17 г.



АКТ

внедрения результатов
кандидатской диссертационной работы
Носикова Максима Владимировича

Комиссия в составе:

- председатель – технический директор Ломов Е. П.
- член комиссии – начальник конструкторско-технологического отдела Лемперт Я.А.
- член комиссии – главный технолог Кулаченков К.Г.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Системы управления внутрикамерными радиационно-стойкими манипуляторами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)», использованы при проведении ОКР «Разработка конструкторской документации опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер» и ОКР «Изготовление опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер».

Вышеперечисленные ОКР выполнены НПК «Калибр» (Исполнитель) по договорам № 6/14 от 07.07.2014 г. и № 12/15 от 17.02.2015 г. с ФГУП ПО «Маяк» (Заказчик). В результате проведенных работ разработан и выпущен полный комплект рабочей конструкторской документации (включая аппаратную и программную составляющие системы управления), изготовлен опытный образец роботизированного манипулятора «MP-48».



456320, Челябинская область, г. Миасс, ул. Богдана Хмельницкого, д. 64, кв.46 Тел. +7 (3513) 298932
Почтовый адрес: 456317, Челябинская область, г. Миасс, а/я 732 Факс +7 (3513) 298978

Научно-производственная компания «Калибр»

Система управления манипулятора обеспечила:

- управление манипулятором от задающего органа (ЗО) с двумя многокоординатными джойстиками (в отличие от применяемых в настоящее время ЗО копирующего типа);
- работу манипулятора в автоматизированном режиме (с оператором в контуре управления);
- работу манипулятора в автоматическом режиме (без оператора, по заранее заданной траектории);
- исключение столкновения составных частей манипулятора с технологическими объектами и стенками герметичной камеры;
- адаптацию режимов и параметров системы управления манипулятором посредством разработанного специального программного обеспечения и человеко-машинного интерфейса.

Результаты ОКР (комплект РКД и опытный образец роботизированного манипулятора «MP-48») переданы Заказчику по актам № 1 от 06.11.2014 г., № 1 от 06.11.2015 г. для последующего проведения испытаний в условиях реального производства.

Председатель

Ломов Е. П.

Члены комиссии:

Лемперт Я.А.

Кулаченков К.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт о результатах испытаний роботизированного
манипулятора МР-48



ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ
"МАЯК"
ФГУП «ПО «МАЯК»

АКТ

№ 193-2.1/22064

На № _____ от _____

о результатах испытания
роботизированного манипулятора
МР-48

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

Ю.Т. Юлдашев

15.01.2020



Работа выполнена в рамках договоров на выполнение опытно-конструкторской работы (далее - ОКР) от 07.07.2014 № 6/14 «Разработка конструкторской документации опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер» и ОКР от 17.02.2015 № 12/15 «Изготовление опытного образца роботизированного манипулятора для герметичных камер».

В период с 2017 по 2019 года в цехе 1 завода 20 ФГУП «ПО «Маяк» проведены испытания роботизированного манипулятора МР – 48 по программе испытаний НПКА 48.00.00.001 ПМ.

В процессе испытаний по программе подтверждены все установленные техническим заданием характеристики манипулятора:

- управление манипулятором с помощью двух многокоординатных джойстиков в автоматизированном и автоматическом режимах управления (соответственно, с оператором и без оператора в контуре управления);
- герметичность конструкции манипулятора и возможность его длительной работы в агрессивной, мелкодисперсной среде защитной камеры;
- обеспечение работоспособности манипулятора в двух режимах;
- копирование движений оператора;
- возможность выполнения манипулятором траекторий движения по заранее написанной программе;
- реализован алгоритм работы манипулятора в разрешенных свободных зонах внутри камеры.

Согласно программы испытаний опытный образец манипулятора МР – 48 отработал более 1000 часов в камере с агрессивной средой.

В процессе эксплуатации выявлены дефекты отдельных узлов манипулятора, которые необходимо устранить при проектировании и производстве промышленных образцов.

Подтверждаем непосредственное участие Носикова М.В. в разработке аппаратной и программной части системы управления манипулятором МР-48.

Настоящий документ оформлен для предъявления в рамках защиты кандидатской диссертации на соискание ученой степени Носикова М.В.

Главный инженер завода

Начальник участка электрика




Н.А. Лупеха

Д.В. Шаронов

Шаронов Дмитрий Васильевич

3 62 12

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт об использовании в учебном процессе материалов и
результатов диссертационного исследования



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Декан электротехнического факультета
Южно-Уральского государственного университета
(научно-исследовательского университета),
доктор физико-математических наук, профессор


« 10 » 2020 г.



АКТ

внедрения результатов диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Носикова Максима Владимировича

на тему

«Системы управления внутрикамерными
радиационно-стойкими манипуляторами»

Комиссия в составе:

- председателя комиссии, заведующего кафедрой «Автоматика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), кандидата технических наук, доцента Голощапова Сергея Семеновича,
- старшего преподавателя, ученого секретаря кафедры «Автоматика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) Казанцева Александра Михайловича,
- заведующего лабораторией робототехники филиала Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) в г. Миассе Морозова Бориса Александровича

подготовила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
«Системы управления радиационно-стойкими манипуляторами», представленной на

соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в научно-исследовательской и образовательной деятельности кафедры «Автоматика» электротехнического факультета Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета).

Результаты исследований, полученных Носиковым М.В. используются при проведении следующих учебных курсов:

1. Технические средства автоматизации и управления (бакалавриат, направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»).
2. Автоматизированные информационно-управляющие системы (бакалавриат, направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»).
3. Цифровая обработка сигналов (бакалавриат, направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»).

Председатель комиссии:

заведующий кафедрой автоматике,
к.т.н., доцент



С.С. Голошапов

Члены комиссии:

старший преподаватель,
ученый секретарь кафедры «Автоматика»



А.М. Казанцев

заведующий лабораторией робототехники



Б.А. Морозов

Комиссия в составе:

– председателя комиссии, заведующего кафедрой «Автоматика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), кандидата технических наук, доцента Голошапова Сергея Сергеевича,

– старшего преподавателя, ученого секретаря кафедры «Автоматика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) Казанцева Александра Михайловича,

– заведующего лабораторией робототехники факультета Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) в г. Миассе Морозова Бориса Александровича.

подготовила настоящий акт о том, что результаты диссертации М.В. Носикова «Системы управления радиально-стержневыми манипуляторами» соответствуют

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Патент РФ на полезную модель
«Манипулятор МР-48 для атомной промышленности»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 172431

**МАНИПУЛЯТОР МР-48 ДЛЯ АТОМНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" (ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ))" (RU)*

Авторы: *Войнов Игорь Вячеславович (RU), Казанцев Александр Михайлович (RU), Круглов Иван Филиппович (RU), Морозов Борис Александрович (RU), Носиков Максим Владимирович (RU)*

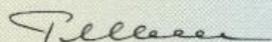
Заявка № 2016117227

Приоритет полезной модели 29 апреля 2016 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 07 июля 2017 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 29 апреля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



g.1599

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019617582

ПРОГРАММА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СОСТОЯНИЯ И
УПРАВЛЕНИЯ 6-СТЕПЕННЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ С
АНГУЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ КООРДИНАТ

Правообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)») (RU)*

Автор: *Носиков Максим Владимирович (RU)*

Заявка № 2019616219

Дата поступления 29 мая 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 июня 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019663357

**ПРОГРАММА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДЕЙСТВИЙ
ОПЕРАТОРСКОГО И ИНСТРУКТОРСКОГО
ПЕРСОНАЛА ТРЕНАЖЕРНОЙ СИСТЕМЫ
РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ МАНИПУЛЯТОРОВ**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО
«ЮУрГУ (НИУ)») (RU)*

Автор: *Носиков Максим Владимирович (RU)*

Заявка № 2019662139

Дата поступления 01 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 октября 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020614430

**ПРОГРАММА НАСТРОЙКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ЗАДАЮЩИХ ОРГАНОВ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО
ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
РАДИАЦИОННО-СТОЙКИМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ
КОМПЛЕКСАМИ В СРЕДЕ ROS**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО
«ЮУрГУ (НИУ)»)* (RU)

Автор: *Носиков Максим Владимирович* (RU)

Заявка № 2020613268

Дата поступления 20 марта 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 апреля 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

