

На правах рукописи

Эраки Мохамед Тахер Хамед

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МАНИПУЛЯТОРОМ
ДЛЯ РОЗЛИВА И МАРКИРОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

**Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (в пищевой промышленности)
(технические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена на кафедре «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель

Зубов Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», доцент кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств»

Официальные оппоненты

Глазков Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Прикладные информационные системы»

Амелькин Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный лингвистический университет», заведующий лабораторией трехмерного виртуального моделирования

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»

Защита состоится: «26» декабря 2019 г в 11:00 на заседании Совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д.212.148.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д. 33, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МГУПП» по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11 и на сайте ФГБОУ ВО «МГУПП» <http://mgupp.ru>.

Отзывы на автореферат и диссертацию просим направлять по адресу: 125080, г. Москва, Волоколамское ш., д. 11, ФГБОУ ВО «МГУПП».

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.212.148.02

Доктор технических наук, профессор

Жиров Михаил Вениаминович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Пищевая промышленность – одна из самых динамично развивающихся отраслей экономики. Новые технические возможности позволяют радикально решать типичные проблемы пищевых производств, связанные с соблюдением требований соблюдения микробиологического режима, предотвращение контаминации, устранения ручного труда и связанных с ним технологических потерь, повышения стабильности уровня качества продукции, дают возможность оперативно изменять ассортимент и производительность предприятия. Ввиду большого количества ручного труда, перспективно применение робототехнических комплексов, которые позволяют обеспечить большую гибкость производства, в том числе в задачах перемещения отдельных полуфабрикатов, заготовок, маркировки готовой продукции, особенно для малотоннажных производств, обладающими оборудованием, позволяющим производить различную продукцию по отдельным заказам. Ввиду высокой конкуренции на рынке напитков, производители вынуждены организовывать производство сезонных или приуроченных к каким-либо знаменательным событиям серий продукции, отличающихся не только составом напитков, но и видом бутылок и маркировки, что делает невозможным применение типовых автоматических линий, использующих традиционную тару и не поддающуюся существенной перенастройке.

Прогресс в развитии компьютерных технологий сделал возможным решение задач распознавания взаимного расположения физических объектов в режиме реального времени и управления исполнительными устройствами на основе предикторных адаптивных моделей, что позволяет снизить затраты энергии и повысить надёжность, безопасность и производительность агрегатов гибких линий пищевых производств.

Для того, чтобы машины и агрегаты гибких автоматизированных линий пищевых производств могли выполнять заданные задачи, необходимо выработать траектории перемещений исполнительных органов манипуляторов, а для их реализации – законы изменения скоростей, сил и моментов соответствующих приводных устройств. Для поиска и реализации алгоритма управления манипуляторами для решения задач пищевого производства необходимо использование математических моделей процессов, протекающих в ходе работы производственной линии.

Из вышесказанного следует, что проблема обеспечения динамично развивающейся пищевой промышленности универсальными программно-аппаратными средствами управления робототехническими комплексами актуальна.

Степень разработанности темы исследования. Одним из самых распространённых агрегатов в промышленности являются манипуляторы типа PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) и манипуляторы типа SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Это серийно выпускаемые промышленные манипуляторы, предназначенные для использования в промышленных приложениях, имеют 6 вращательных степеней свободы (PUMA

560) и 4 вращательные и 2 поступательных степеней свободы (SCARA). Связь между приложенными силами и перемещениями звеньев манипуляторов определяется кинематикой и динамикой. Механизм манипулятора рассматривается как последовательная цепь жестких звеньев, соединенных друг с другом вращательными или поступательными соединениями. Преобразование положения и ориентации конечных эффекторов робота-манипулятора из декартова пространства в совместное пространство называется задачей обратной кинематики. Для решения этой задачи традиционно используется матричный метод Денавита-Хартенберга, который использует матрицы 4x4 с координатами, который весьма требователен к вычислительным ресурсам с точности определения физических параметров, поэтому много внимания уделяется поиску упрощенных вычислительных схем либо методов управления, основанных на методах и подходах искусственного интеллекта. Множество работ в этой области, особенно зарубежных авторов, свидетельствует об актуальности и востребованности выбранной темы исследования.

Целью работы является повышение эффективности работы пищевого предприятия за счёт разработки и внедрения автоматизированной системы управления технологическим манипулятором с несколькими степенями свободы на основе имитационной модели.

Задачи исследования:

1. Создание математических моделей многозвенных технологических манипуляторов типов SCARA, PUMA, KUKA, обеспечивающих сохранение заданной точности позиционирования во всём пространстве рабочей зоны.

2. Разработка алгоритма управлением технологическим манипулятором, обеспечивающим оптимизацию заданного критерия в условиях ограничений (по мощности источника питания и по геометрии рабочей зоны).

3. Разработка структуры распределённой системы управления и моделирования технологического манипулятора, разделяющей функции текущего управления перемещением и моделирования с учётом физических свойств манипулятора и объектов.

4. Разработка и исследование системы компьютерного зрения для отслеживания движущихся по технологической линии объектов, скамерой расположенной на движущемся манипуляторе.

5. Разработка динамических и управляющих конструкций роботов манипуляторов SCARA и PUMA 560, с использованием (LabVIEW) и (SolidWork), для управления вращательными и линейными двигателями модели.

Объектом исследования является система управления производственно-технологическими и обеспечивающими процессами пищевого предприятия, а также используемые в настоящее время способы автоматизации управления процессами для данного типа предприятий пищевой промышленности.

Предметом исследования является совокупность теоретических и практических задач, связанных с созданием систем управления пищевого предприятия с универсальными манипуляторами типов PUMA, SCARA и KUKA, их архитектура, информационное, программно-техническое обеспечение и алгоритм проектирования.

Научная новизна:

1. Разработан новый метод поиска управления манипулятором при помощи кинематического анализа с учётом особенностей рассмотренных типовых манипуляторов, позволяющий снизить вычислительные ошибки расчёта траектории и таким образом обеспечить заданную точность позиционирования во всей рабочей зоне.

2. Предложен новый метод решения задачи имитационного моделирования технологического манипулятора, отличающийся распределением функций между программными средами – быстрой (LabVIEW) и медленной, точной (SolidWork), позволяющий рационально использовать вычислительные ресурсы.

3. Разработаны алгоритмы динамического анализа манипуляционных механизмов для системы технологического транспорта.

4. Разработан метод контроля траектории манипулятора, позволяющий избегать нежелательных столкновений в рабочем пространстве.

5. Разработаны численные модели манипуляционных механизмов, предназначенных для системы маркировки продукции.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическое значение диссертационной работы заключается в следующем:

1. Математическое описание кинематических задач управления манипулятора с требуемой конечной траекторией рабочего органа манипулятора.

2. Создание программы управления манипуляторами с моделированием их работы.

3. Структура системы управления манипуляторами PUMA 560, позволяющая обеспечить добавив мобильность манипуляторов, учёт ограниченных возможностей систем электропитания и возможности системы оптического распознавания.

4. Проведен структурный синтез манипуляционных механизмов для поступательных и вращательных движений

5. Проведен кинематический анализ манипуляционных механизмов для поступательных и вращательных движений PUMA, SCARA, KUKA.

6. Проведен динамический анализ манипуляционных механизмов для поступательных и вращательных движений PUMA, SCARA, KUKA.

7. Разработаны методика решения задач прямой и обратной кинематики с помощью разработанного геометрического подхода, позволяющая избежать столкновений манипулятора с окружающими объектами.

Практическая ценность диссертационной работы – модернизация системы управления технологическим манипулятором:

1. Алгоритмы решения обратной кинематической задачи для роботов типа PUMA, SCARA и KUKA, программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы.

2. Система оптического распознавания изделий, учитывающая совместное движение манипулятора и изделий.

3. Разработан программный интерфейс обратной кинематики робота-манипулятора (на примере SCARA Robot) который позволяет получить точные

решения.

4. Разработана система виртуального прототипирования мехатронной системы, позволяющая выбрать контроллер управлением движением манипулятора и требуемые двигатели и параметры энергетической подсистемы.

5. Разработана улучшенная модель робота PUMA 560, к которой добавлены средства для передвижения манипулятора.

6. Разработана и экспериментально исследована система обнаружения траектории двигающихся цветных объектов с использованием системы машинного зрения.

7. Разработан и внедрен (в качестве прототипа) на АО МБПК «ОЧАКОВО» аппаратно-программный комплекс для наклеивания этикеток на готовую продукцию.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании были использованы теория автоматического управления, методы математического моделирования, теория принятия решений, методы сетевого планирования, методы оптимизации (динамическое программирование), теория алгоритмов и методы программирования, методы создания систем технического зрения.

В процессе исследований применялось следующее программное и аппаратное обеспечение: LabVIEW 2014, NI-Softmotion module, LabVIEW 2015, NI vision assistant program, Solidworks 2016, HD pro Webcam Logitech C920, Laptop Toshiba i5.

Диссертация соответствует паспорту специальности ВАК 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в пищевой промышленности) по следующим областям исследований:

- автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки;
- методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.;
- теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация;
- методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структура системы управления движением манипулятора в условиях динамически изменяющейся окружающей среды.

2. Метод расчёта траекторий движения манипулятора, методика решения на его основе обратной кинематической задачи, позволяющая сохранить точность позиционирования во всей рабочей зоны.

3. Алгоритм поиска (выбора) оптимальной траектории движения манипулятора в условиях наложенных ограничений, обеспечивающий снижение вычислительных ресурсов.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Надежность данных подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с использованием программ моделирования SolidWorks, LabVIEW и экспериментальной проверкой отдельных частей работы на реальных объектах.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на 3 международных научных конференциях: Национальный Суперкомпьютерный Форум «НСКФ-2017», (28.11–1.12.2017, г. Переславль-Залесский); IX-й Международный Симпозиум «Полимерная индустрия: Инновации. Эффективность. Ресурсосбережение», (7 – 8.12.2016, г. Москва); XXIX Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ – 29», (31.05-3.06.2016, г. Санкт-Петербург).

По теме диссертационного исследования опубликовано 10 работ, из них 4 статьи – в научных журналах, рекомендованных ВАК и 3 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus.

Личное участие автора математическое моделирование типовых промышленных манипуляторов, разработка геометрического подхода к моделированию движения манипулятора и методика решение на его основе обратной кинематической задачи, создание необходимых программных комплексов, проведение вычислительных и натуральных экспериментов; интерпретация и обобщение результатов.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы. Работа содержит 120 страниц, 84 иллюстрации, 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена краткая характеристика работы: обоснована актуальность темы исследования; сформулированы цели и задачи работы; определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов; изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведён литературный обзор работ по математическому моделированию кинематики и динамики машин и агрегатов, объединенных в производственные линии с учётом их взаимодействия, взаимодействия их с окружающей средой. В СССР работы по созданию научных основ создания машин-автоматов, в том числе применительно к пищевой промышленности были разработаны академиком АН СССР И.И. Артоболевским, впоследствии академиком В.В. Кафаровым, профессором А.И. Бояриновым и рядом других учёных были заложены основы анализа, моделирования и автоматизации сложных производственных линий с учётом взаимодействия отдельных элементов. В общем случае для расчетов кинематических параметров технологических манипуляторов

широко используется (John J. Craig) метод Денавита-Хартенберга (Denavit–Hartenberg), использующий матричное представление координат процесса (ДН-представление), несмотря на критику такого подхода для ряда особых случаев (Taylor). (Hall, 1977) предлагает решать обратную кинематическую задачу путём её сведения к оптимизационной задаче. Ряд авторов (Angeles J., 1985), (Benjanarasuth, 2010) указывает на целесообразность и даже необходимость решения задачи управления манипулятором совместно с использованием динамической модели как самого манипулятора, так и его окружения. Многие авторы (S. Shital, N. Chiddarwar, B. Ramesh) уделяют внимание алгоритмам решения обратной кинематической задачи с учётом имеющихся технологических ограничений, которые могут как усложнить, так и упростить решение задачи.

Ряд авторов предлагают использовать для управления аппарат искусственного интеллекта (R.Y.Putra, S. Kautsar, A.V. Duka, Ngoc Son, N.) – в недетерминированной среде и с меняющимися задачами (Alcin, 2016), и в частности – искусственных нейронных сетей для решения задач обратной кинематики (Hasan, 2010), для поиска управления манипулятором в условиях изменяющегося окружения (Rossomando, 2017). Достоинством таких систем является высокая адаптивность и расширяемость, Недостатком является вероятностный характер решения, не гарантирующий нахождение наилучшего управления. По результатам литературного обзора сделан вывод, что возможно для которых моделей роботов за счёт снижения универсальности методики можно снизить вычислительную сложность и повысить точность и быстродействие позиционирования.

Во второй главе констатируется необходимость в решении кинематических задач, особенно задач обратной кинематики манипулятора-робота. Существующие универсальные алгоритмы расчёта кинематики (метод Денавита-Хартенберга) просты для записи в общем виде, но из-за ряда неустранимых недостатков (использование матриц) ресурсоёмки и обладают большой вычислительной погрешностью в некоторых случаях (например – областях, близких к центру рабочей зоны). Если технологические манипуляторы вынуждены работать именно в таких зонах, в которых метод ДН приводит к существенным вычислительным ошибкам, то это может или привести к замедлению движения манипулятора (что приводит к снижению производительности) или потребовать отладки одной траектории без возможности её изменения или вынуждено изменять режим работы с целью удаления рабочего органа от центра рабочей зоны, что требует больше места для каждого манипулятора.

Предложено для расчёта кинематики вместо универсального алгоритма использовать набор простых тригонометрических выражений, вызываемых алгоритмически по условиям конкретных движений, что позволяет сохранить требуемую точность во всём объёме рабочей зоны.

Для повышения возможной скорости перемещения манипулятора необходим учёт динамики движения (массы и моменты инерции манипулятора и перемещаемых объектов, сил трения), который осуществляется отдельным программным модулем и который рассмотрен в главе 3. Для снижения общих вычислительных затрат создан алгоритм выбора оптимальной траектории из

исходного положения манипулятора в целевое, с учётом отбрасывания заведомо неоптимальных. Поскольку у манипулятора есть несколько степеней свободы, которые могут рассматриваться как отдельные переменные оптимизации, то задачу управления манипулятором для перевода его из одного состояния в другое, можно рассматривать как задачу условной дискретной оптимизации. Для её решения создан алгоритм, являющийся модификацией алгоритма ветвей и границ: в отличие от полного перебора, отбрасываются кандидаты на решение, которые уже не смогут быть лучше уже найденного оптимального.

Для управления манипулятором, поиска оптимальной траектории и взаимодействия с программой-моделью реальности (в среде SolidWorks) использовались программы, созданные в среде LabVIEW с инструментарием NI-SoftMotion (в качестве контроллера для управления положением модели).

Использованное сочетание управляющего (оптимизирующего) модуля, созданного в среде LabVIEW, и моделирующего реальность модуля в среде SolidWork позволяет распределить функции и вычислительные ресурсы по разным ЭВМ с сохранением гибкости и производительности системы в целом. Сравнение возможностей встроенного ПО компаний-производителей промышленных роботов с предлагаемой системой представлено на таблице 1:

Таблица 1. Сравнение предлагаемого подхода с встроенным ПО компаний-производителей промышленных роботов

Название производителя	Тип манипулятора	Принцип работы ПО
Aubo (Китай-США)	SCARA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	Машинное обучение в сочетании с ДН-представлением
Dobot (Китай)	SCARA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	ПО на основе ДН-представления
Universal Robots (Дания)	PUMA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	Искусственный интеллект
ABB (Швеция-Швейцария)	KUKA и несколько специальных типов, встречающихся только у этого производителя	Машинное обучение
Предлагаемый подход	SCARA, PUMA, KUKA	LabVIEW на основе предлагаемых конструктивных аналитических методов

Преимущества системы управления на основе предлагаемых подходов:

- точные траектории, для получения которых не требуются обучающие точки (которые требуются для Aubo, Universal Robots);
- пользователь может задать любой критерий оптимальности, помимо заранее предложенного (минимизация времени перемещения) и любой набор ограничений (заранее заданы ограничения на рабочую область и предельную мощность),

благодаря чему может быть реализован сложный алгоритм движения в динамически изменяющейся окружающей среде;

- интерактивное моделирование и визуализация технологического процесса, что позволяет обеспечить совместную работу нескольких манипуляторов, находящихся вблизи друг друга;
- снижение необходимости в перекалибровке (она частично осуществляется путём адаптации модели манипулятора в среде SolidWorks), улучшение детализации и повторяемости движений, обеспечение достижения всех точек рабочей зоны и устранение столкновений;
- при необходимости пользователь может задать любой алгоритм движения на любом участке траектории.

Различия между предлагаемой разработанной методикой и традиционной методикой (DH), как в таблице 2:

Таблица 2. Различия между предлагаемой методикой и традиционной методикой (DH).

Различия	Предлагаемая методика (сводит задачу к двумерной)	Традиционная методика Denavit–Hartenberg (DH) (3-трёхмерная задача)
<i>Математические требования</i>	Не содержит высоких требований к математическому обеспечению, т.к. не использует матриц	Использует гомогенные матрицы 4x4 заданной структуры (John J. Craig 2005)
<i>Программного обеспечения</i>	Легко реализуется программных пакетах (наша реализация – LabVIEW)	Высокие требования к математическому обеспечению, вызванные использованием матриц
<i>Точность</i>	Сохраняется точность вычислений	Вычисления производятся с ограниченной точностью (Taylor, 1979)
<i>сингулярность</i>	Использование для представления позиций и ориентаций, что обеспечивает кинематику роботов, избегая сингулярностей	Сингулярность и нелинейные выражения совместных отношений являются основной проблемой в методе однородных матриц (Aydin and Kucuk, 2006)

“Геометрический” метод расчёта обратной кинематики заключается в алгоритме идентификации одной из 16 зон возможных вариантов взаимного расположения частей манипулятора при помощи набора условных операторов и использовании для решения задачи обратной кинематики на фрагменте траектории, находящемся в этой зоне, заранее выбранных тригонометрических выражений, обеспечивающих наилучшую точность.

В качестве примера разработанного “геометрического” метода расчёта рассмотрим фрагмент описания робота PUMA

Для геометрической схемы робота справедливы соотношения:

$$L_1 = \sqrt{x^2 + z^2} \quad L_2 = \sqrt{L_1^2 + d^2}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) \quad \phi_3 = \tan^{-1}\left(\frac{L_2}{d}\right)$$

$$L_3 = \sqrt{L_2^2 + y^2} \quad \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{L_2}\right)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{L_3^2 + El^2 - Wr^2}{2 \times L_3 \times El}\right)$$

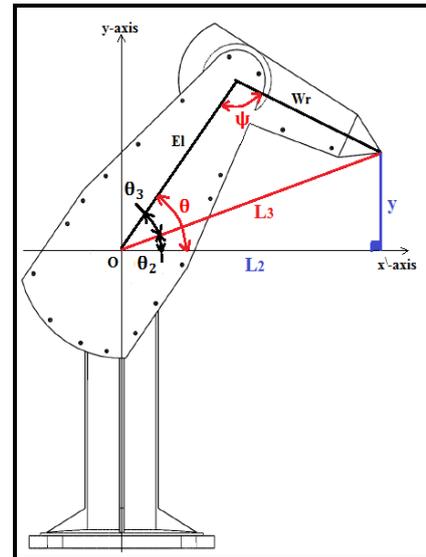


Рисунок 1. Схема манипулятора PUMA (RRR).

Для начальных движений, удовлетворяющих условиям (1–4) можно получить соответствующие выражения (см. рис. 2):

1- Когда $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, тогда:

$$\phi = 90 - (\phi_2 + \phi_3)$$

2 - Когда $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, тогда:

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right) \quad \phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{L_1}\right) \quad \phi = 90 - (\phi_3 - \phi_2)$$

3- Когда $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, тогда:

$$\phi = 270 - (\phi_2 + \phi_3)$$

4- Когда $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, тогда:

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right) \quad \phi_3 = \sin^{-1}\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \quad \phi = 270 - (\phi_3 - \phi_2)$$

$$\theta = \theta_2 - \theta_3$$

$$\psi = \cos^{-1}\left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El}\right)$$

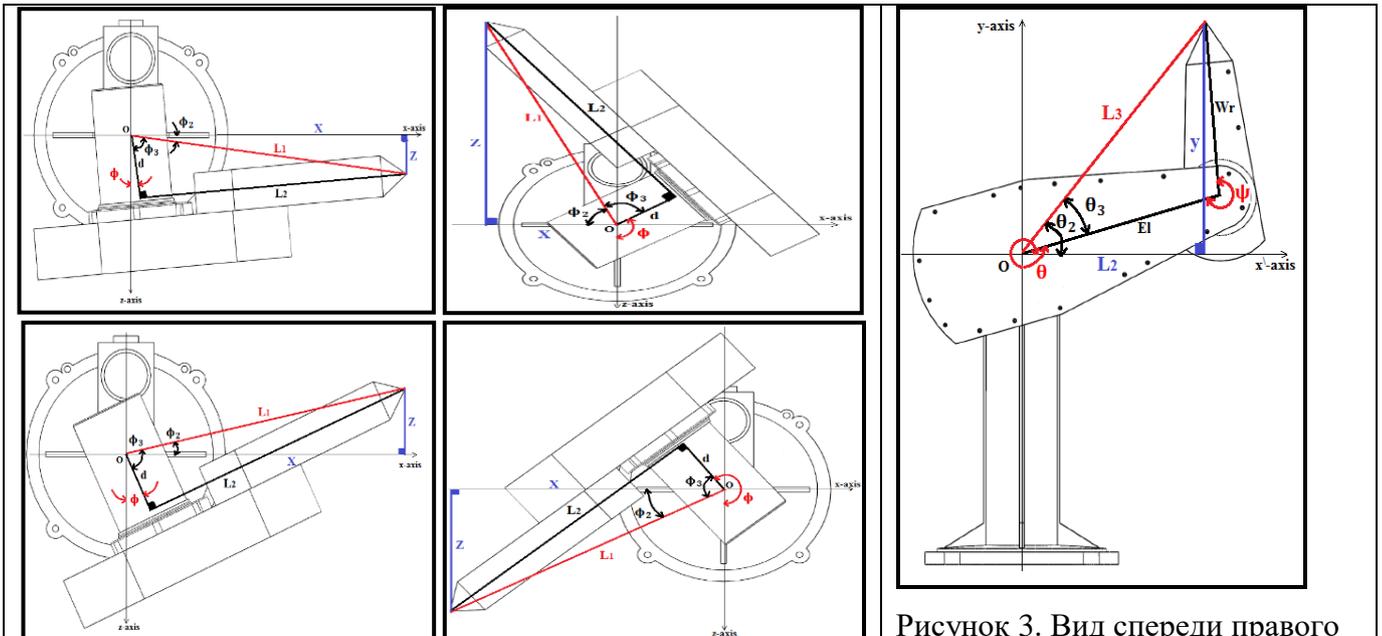


Рисунок 2. Вид сверху правого плеча для робота-манипулятора 3-DOF (RRR).

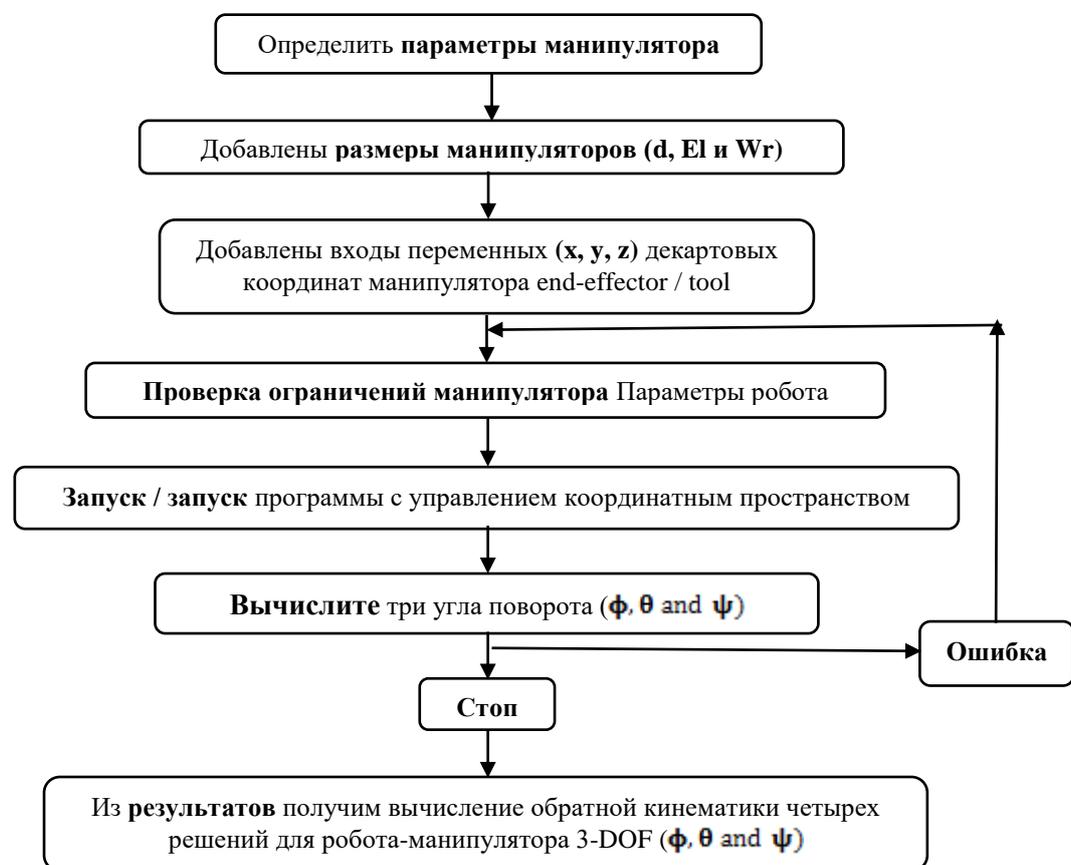
Рисунок 3. Вид спереди правого плеча-локтя для робота-манипулятора 3-DOF (RRR).

Для последующих движений можно найти (см. рис. 3):

$\theta = 360 + (\theta_2 - \theta_3)$	$\psi = 360 - \cos^{-1}\left(\frac{Wr^2 + El^2 - L_3^2}{2 \times Wr \times El}\right)$
1- Когда $(x > 0)$ и $(z \geq 0)$, тогда: $\phi = 90 - (\phi_2 + \phi_3)$	2- Когда $(x \geq 0)$ и $(z < 0)$, тогда: $\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x}{L_1}\right) \phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{L_1}\right) \phi = 90 - (\phi_3 - \phi_2)$
3- Когда $(x < 0)$ и $(z \leq 0)$, тогда: $\phi = 270 - (\phi_2 + \phi_3)$	4- Когда $(x \leq 0)$ и $(z > 0)$, тогда: $\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{z}{L_1}\right) \phi_3 = \sin^{-1}\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \phi = 270 - (\phi_3 - \phi_2)$

Аналогичным образом последовательно определяются формулы расчёта обратной кинематики для всех возможных состояний манипулятора.

На блок схеме 1 представлен алгоритм, использующий полученный подход.



Блок-схема 1. Алгоритм обратного кинематического программного обеспечения робота-манипулятора 3-DOF.

На рис. 4 представлен интерфейс программы прямой и обратной кинематики 3-DOF (RRR) робота. В созданной программе реализована схема как прямого, так и обратного кинематического программного обеспечения для робота SCARA с 3 степенями свободы (3-DOF) – вращательными (RRR) и 2 вращательными и 1 поступательной (RRP) с использованием разработанного геометрического подхода. Аналогично определены алгоритмы для роботов-манипуляторов типов SCARA и KUKA. В программе можно выбрать любую точку (X, Y, Z) в рабочей области манипулятора и добиться выполнения заданных ограничений. Кроме того, можем изменить размеры манипулятора в соответствии с требуемой

конструкцией и решить проблемы обратной кинематики для всех роботоманипуляторов. В рисунке 3 представлен графический пользовательский интерфейс робота PUMA. В разработанном интерфейсе требуемые параметры определяются и вычисляются для каждого соединения.

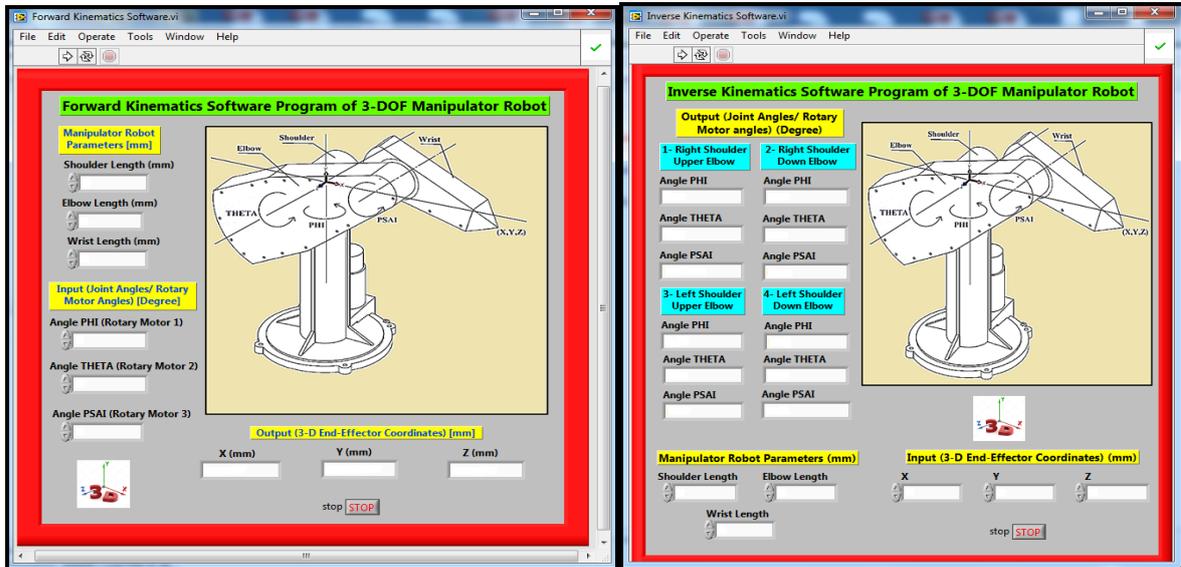


Рисунок 4. Интерфейс программы прямой и обратной кинематики 3-DOF (RRR) робота.

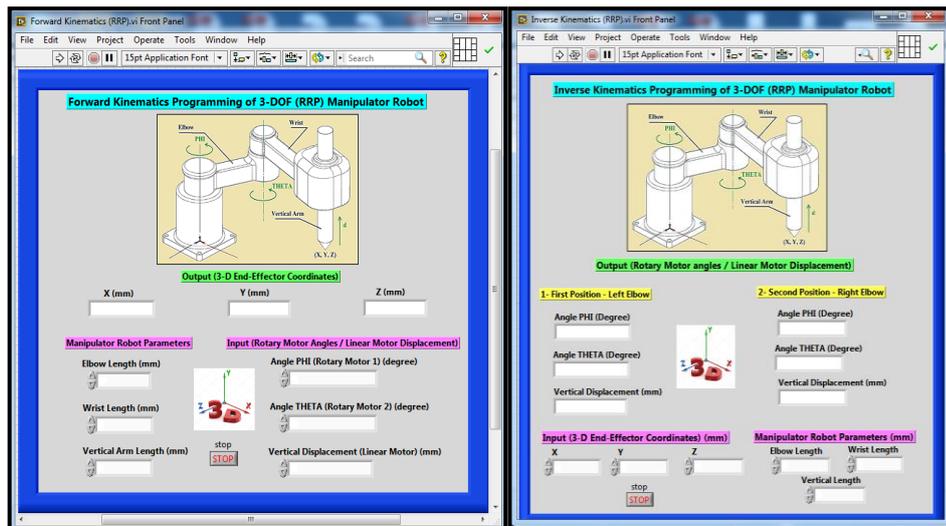


Рисунок 5. Интерфейсная программа прямого и обратного кинематики SCARA-робота.

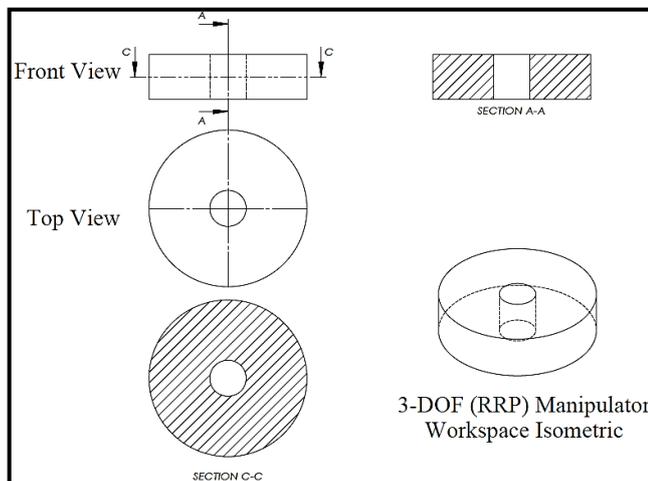


Рисунок 6. Рабочая зона робота-манипулятора 3-DOF (RRP).

На рисунке 6 показана рабочая зона робота SCARA для определения всех ограничений, вытекающих из задачи кинематики:

С помощью программы обратной кинематики и управления роботом SCARA можно управлять порядком и расположением роторных двигателей 1, 2 (в обоих положениях вывода: первая позиция – левое плечо и вторая позиция – правое плечо). Всего получается 16-возможных траекторий инструмента при перемещении из начальной точки в конечную, как показано на рисунках 7 и 8.

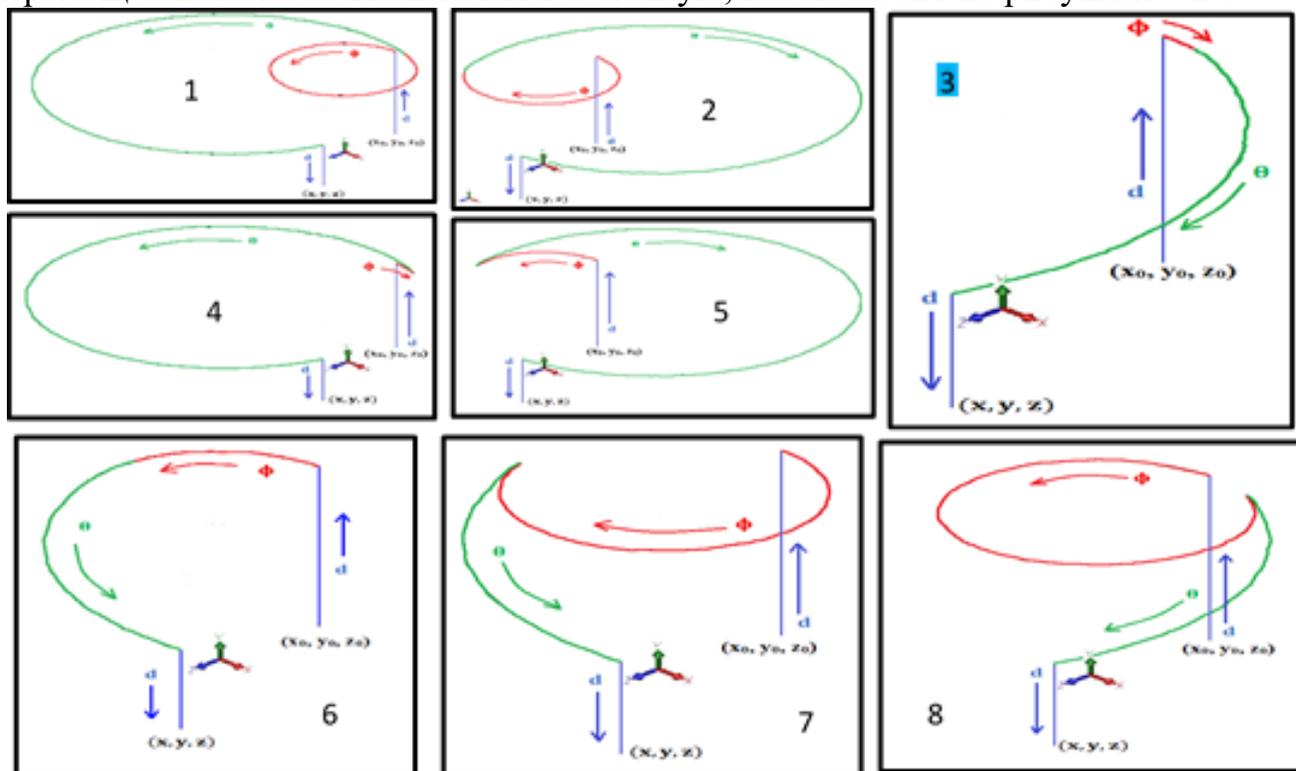


Рисунок 7. Возможные траектории из начальной точки (x_0, y_0, z_0) конечной (x, y, z) эффектора SCARA-робота, когда порядок роторного двигателя 1 (ϕ) является первым.

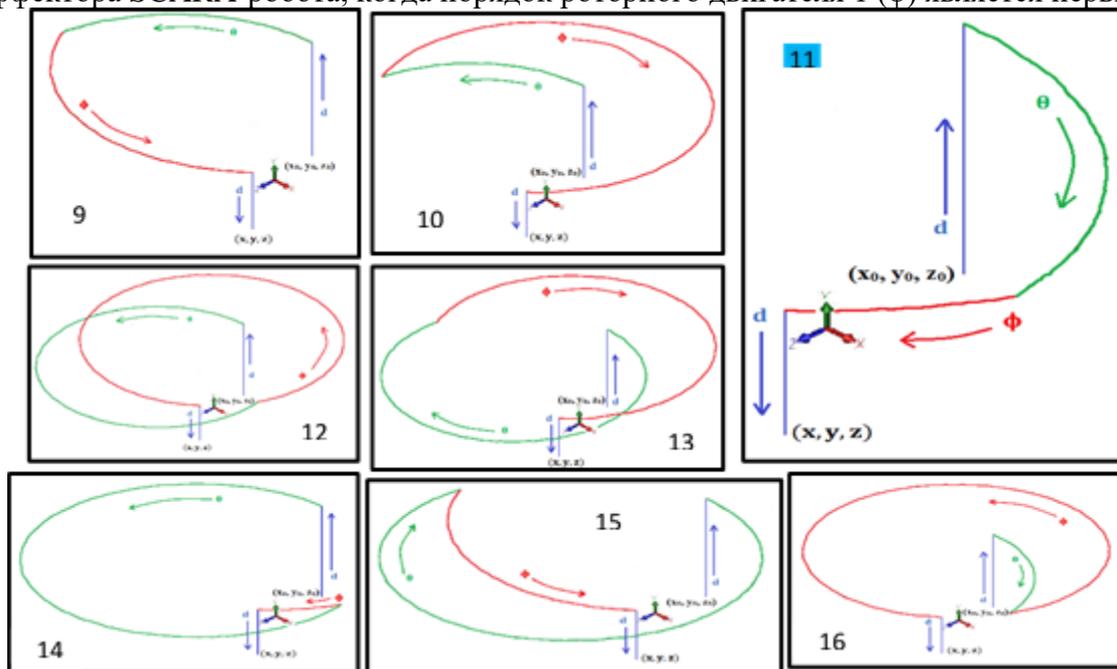


Рисунок 8. Возможные трехмерные траектории из начальной точки (x_0, y_0, z_0) рабочего инструмента робота SCARA до конечной точки (x, y, z) , когда порядок и расположение вращающегося двигателя 2 (θ) является первым.

Третья глава посвящена разработке динамических и управляющих конструкций роботов SCARA с использованием LabVIEW и SolidWorks и созданию разработки PUMA 560 с учётом ограничений реальных источников.

Решение задачи обратной кинематики является ресурсоёмким вычислительным процессом. Был использован алгоритм управления разрабатывается в среде LabVIEW, а модели Cad – сделанные с помощью пакета SolidWorks. Выбранные программные средства дают возможность получения подходящего решения и возможности контроля этой траектории.

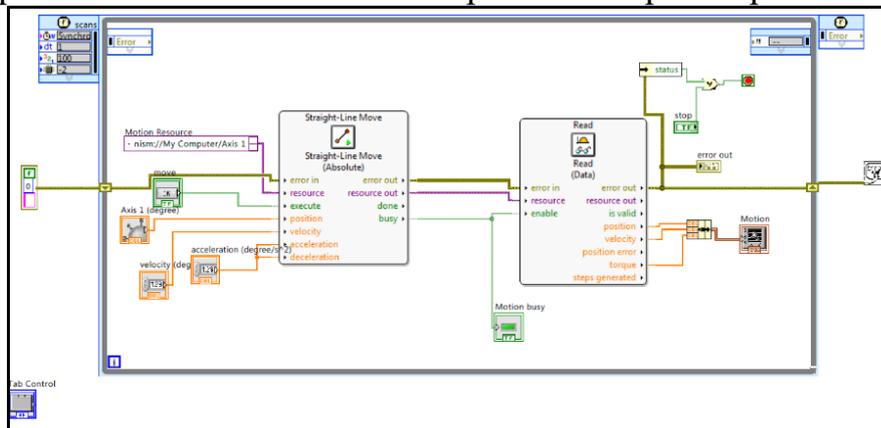


Рисунок 9. Базовая программа для управления моделью.



Рисунок 10. Интерфейсная программа для управления вращающимися и линейными двигателями модели cad.

В этом динамическом и контрольном исследовании построена связь между пакетами SOLIDWORKS и LabVIEW при помощи модуля NI-SoftMotion в качестве контроллера, где LabVIEW работает как Мастер, так как имеет общий контроль над системой и получает входные данные (задание). Выходы могут быть получены как из SolidWorks, так и из LabVIEW.

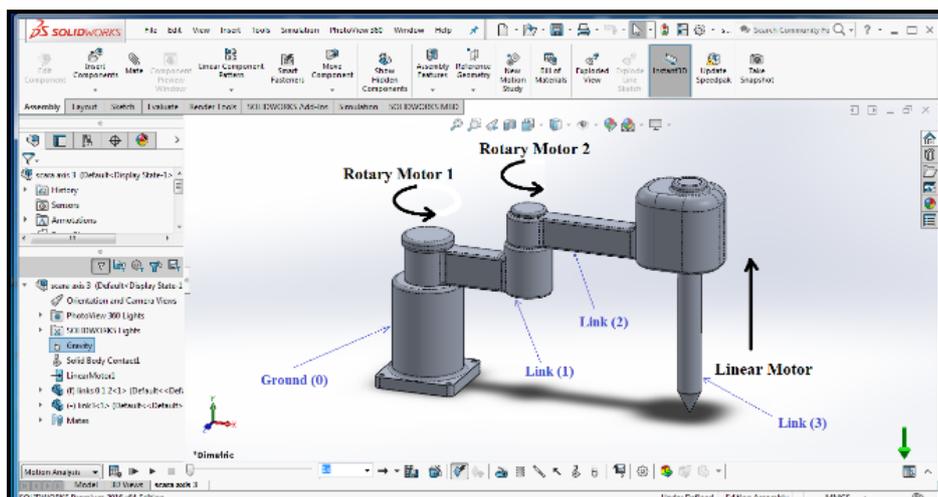


Рисунок 11. Изометрический робот SCARA с тремя движущимися осями.

Такая структура программного комплекса позволяет добавить учёт материала манипулятора (с характеристиками – плотность, коэффициенты трения), технические характеристики приводов и т.д.

Из программы моделирования с динамическим движением можно получить все диаграммы крутящих моментов для вращающихся двигателей и диаграмму силы для линейного двигателя.

Найдя максимальный крутящий момент и максимальное усилие в каждом соединении динамического манипулятора можно рассчитать требуемую мощность двигателя.

Пример. Разработка системы управления манипуляторами роботоманипулятором PUMA 560:

1. В этом исследовании рассмотрен манипулятор PUMA 560, изготовленный из алюминиевого сплава 1060 с плотностью 2700 кг/м^3 , см. данные в таблице 3:

Таблица 3. Характеристика элементов робота PUMA 560.

элемент	масса (Kg)
Base	42.32
Waist	11.972
Shoulder	45.486
Elbow	12.357
Roller	1.339
Pitch	0.1763
Gripper	0.0316

2. Все рычаги оси с вращающимися (револьверными) суставами.

3. Учтён эффект гравитации.

4. Учтён эффект трения между каждыми двумя движущимися частями (звеньями), – эффект сухого контакта алюминия со статическим коэффициентом трения = 0,25 и динамическим коэффициентом трения = 0,2.

5. Добавлена равномерная скорость вращения двигателя = 60 градусов в секунду (10 об / мин).

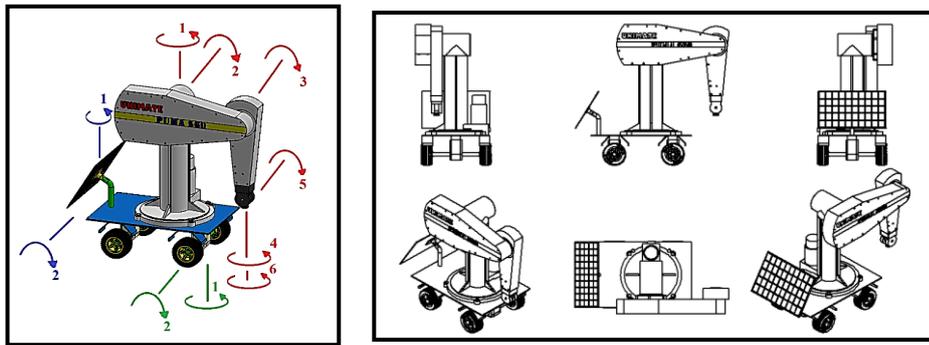


Рисунок 12. Разработка роботов-роботов PUMA 560 степеней свободы (10-оси вращения) и с их видами.

Из управляющей программы с динамическим движением мы получили все диаграммы крутящих моментов для всех роторных двигателей. Затем выбрали максимальный крутящий момент в каждом соединении динамического манипулятора и рассчитали требуемую мощность двигателя.

По результату моделирования получено, что общая мощность, необходимая для работы двигателей манипулятора равна 170 Вт.

Четвёртая глава посвящена созданию, экспериментальному изучению системы технического зрения и интеграции её с разработанной системой управления.

В этой главе представлена экспериментальная система компьютерного зрения для надежного отслеживания движущихся объектов.

Использование системы видения для отслеживания обнаружения включает в себя: сбора данных, преобразование координат, инвариантное распознавание объектов. Разработанная программа LabVIEW с модулем технического зрения отслеживает положение динамического движущегося цветного объекта путем измерения его координаты x , y в пикселях от контрольной точки. Камеру предлагается разместить на манипуляторе, что требует учёта в системе технического зрения движения манипулятора, т.е. совместной работы системы управления и системы технического зрения.

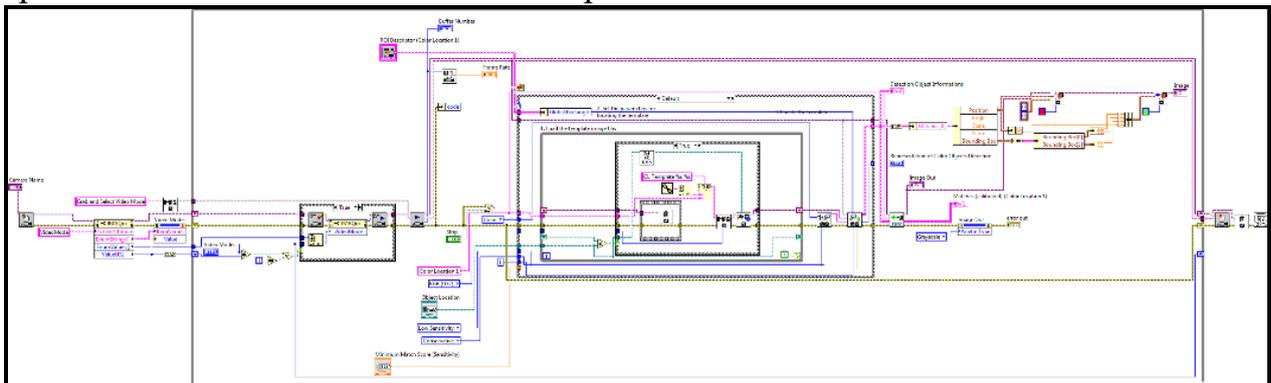


Рис.13 Фрагмент программного кода системы технического зрения в среде LabVIEW.

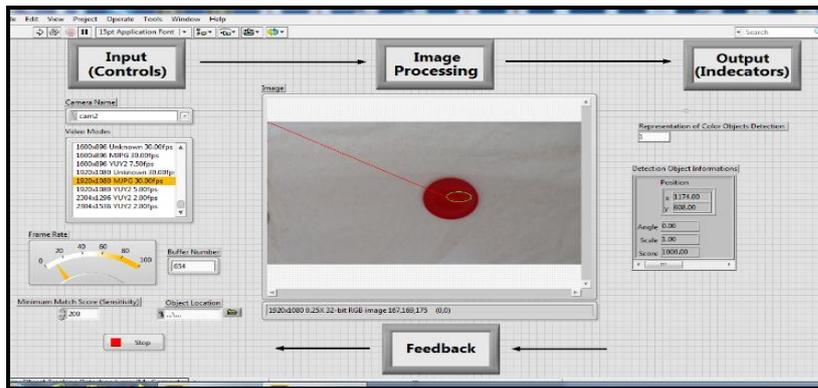


Рисунок 14 Интерфейс подпрограммы отслеживания объекта (диск, например, крышка, красного цвета).

Общая структура разработанной системы управления манипуляторами для технологических процессов пищевых производств представлена на рисунке 15.

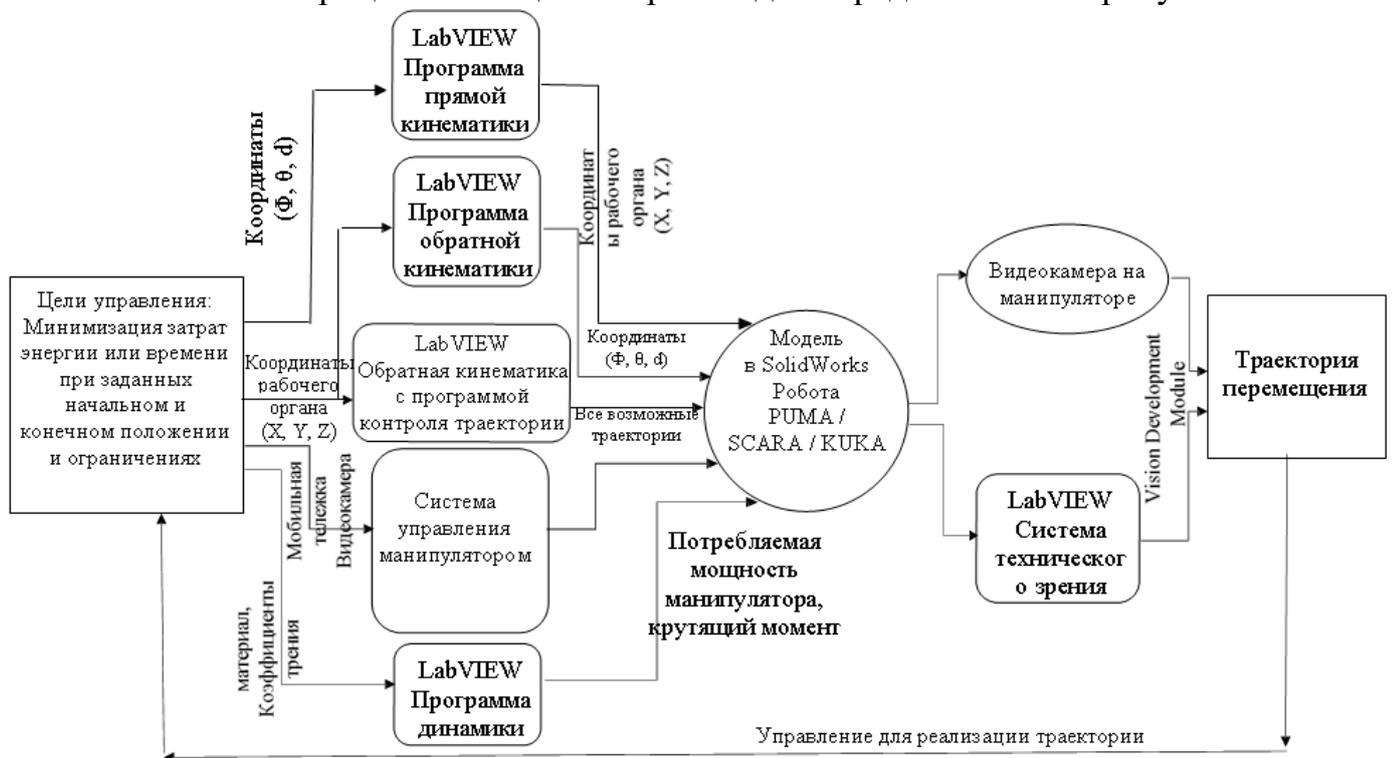
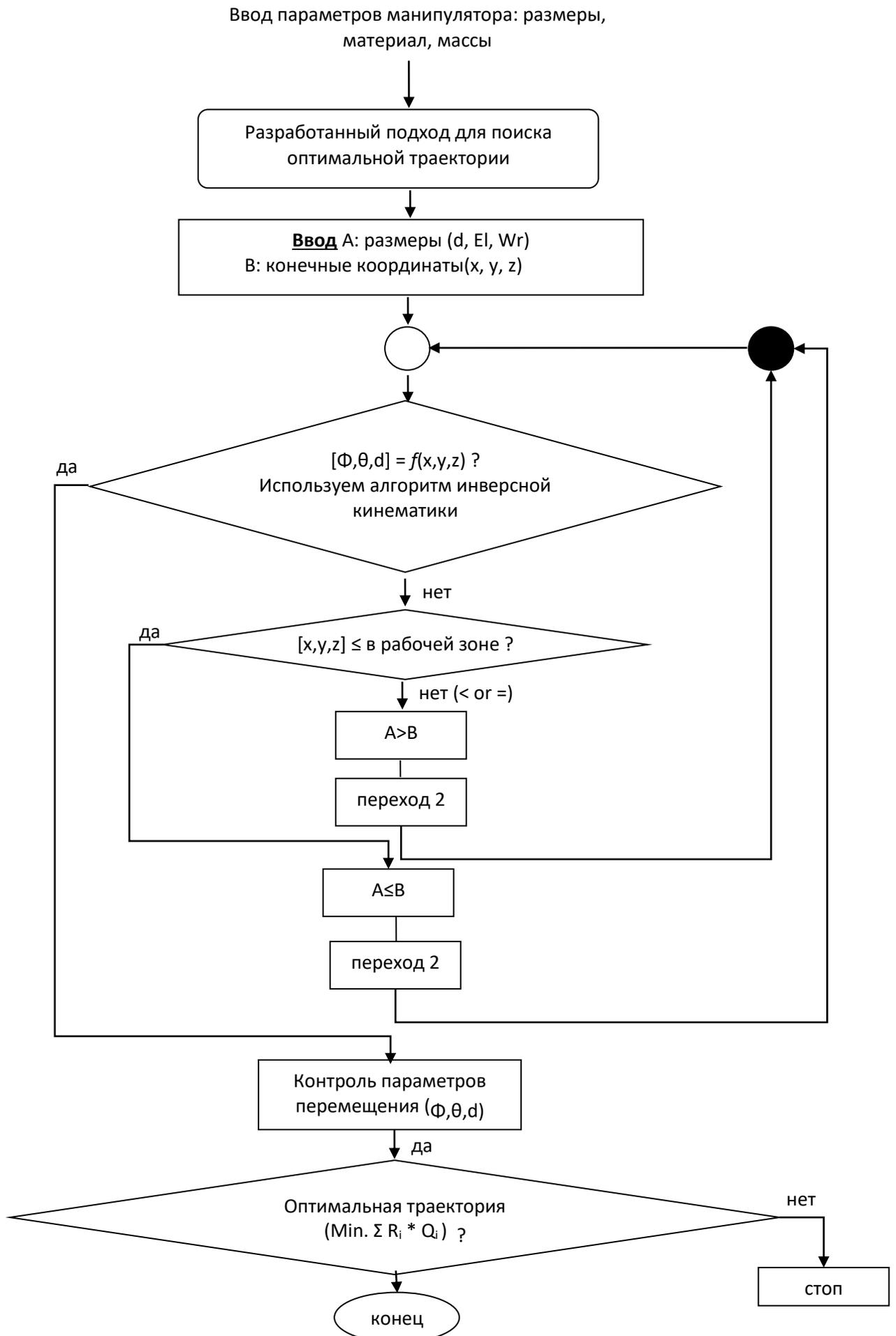


Рисунок 15. Общая структура разработанной системы управления манипуляторами для технологических процессов пищевых производств.

Разработан алгоритм структурного синтеза манипулятора для поступательных и вращательных движений, предназначенный для системы маркировки продукции предприятия, представленный на блок-схеме 2.



Блок-схема 2. Алгоритм структурного синтеза манипулятора для поступательных и вращательных движений, предназначенный для системы маркировки продукции предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математические модели многозвенных технологических манипуляторов типов PUMA, SCARA, KUKA, обеспечивающие заданную точность позиционирования во всём пространстве рабочей зоны.

2. Разработан алгоритм управления технологическим манипулятором роботов типов PUMA, SCARA, KUKA, обеспечивающим оптимизацию заданного критерия в условиях ограничений; алгоритм применён для управления манипулятором PUMA 560 и доказал свою достоверность и работоспособность.

3. Разработана структура системы управления технологическим манипулятором, обеспечивающий оптимальную траекторию движения манипулятора во всём пространстве рабочей зоны за счёт моделирования с учётом физических свойств манипулятора и используемых объектов.

4. Разработана система компьютерного зрения, работающая совместно с созданной системой управления манипулятором.

5. Разработан динамический виртуальный интерфейс для роботов манипуляторов SCARA и PUMA 560, на основе программного обеспечения SolidWorks, LabVIEW, для управления вращательными и линейными двигателями модели.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1. **Эраки, М.Т.Х.** Программный комплекс для решения обратной кинематической задачи робота с тремя вращательными степенями свободы манипулятора / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // Естественные и технические науки. — 2018. — № 6. — С. 107–120.

2. **Эраки, М.Т.Х.** Разработка системы управления манипуляторами роботом манипулятором PUMA 560, работающим на солнечных батареях / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // Естественные и технические науки. — 2018. — № 3. — С. 102–108.

3. **Эраки, М.Т.Х.** Управление и исследование динамики робота-манипулятора с использованием программных пакетов LabVIEW и SolidWorks / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // Естественные и технические науки — 2018. — № 4. — С. 177–183.

4. **Эраки, М.Т.Х.** Экспериментальное исследование системы отслеживания цветных объектов с использованием технического зрения / М.Т.Х. Эраки, Д.В. Зубов // Естественные и технические науки. — 2018. — № 5. — С. 196–203.

Публикации в изданиях, входящих в Международную реферативную базу Scopus.

5. **Mohamed T. Eraky.** Inverse Kinematics Software Design and Trajectory Control Programming of SCARA Manipulator robot / Eraky Mohamed T., Zubov Dmitry V. // International Journal of Engineering Research and Technology. — ISSN 0974-3154 — Scopus. — 2018. — Vol. 11 — № 11 — С. 1759-1779.

6. **Mohamed T. Eraky.** Investigation of inverse kinematics software program of KUKA manipulator robot and creation of optimal trajectory control for quality evaluation within chemical production lines / Eraky Mohamed T., Zubov Dmitry V., Krysanov Konstantin S. // International Journal of Engineering Research and Technology. — ISSN 0974-3154 — Scopus. — 2018. — Vol. 11 — № 12— С. 2135-2158.

7. **Mohamed T. Eraky.** Investigation of Forward Kinematics Software Program and Control of 3-DOF Manipulator Robot Using a New Developed Geometrical Approach Method for Improvement of Quality Food and Chemical Industries / Eraky Mohamed T., Zubov Dmitry V., Krysanov Konstantin S. // International Journal of Engineering Research and Technology. — ISSN 0974-3154 — Scopus. — 2019. — Vol. 12 — № 9— С. 1423-1430.

Публикации в других изданиях

8. Зубов, Д.В. Программный комплекс для моделирования мехатронного манипулятора / Д.В. Зубов, **М.Т.Х. Эраки** // Национальный Суперкомпьютерный Форум «НСКФ-2017» — (28.11–1.12.2017).

9. Зубов, Д.В. Современные проблемы управления технологическими манипуляторами в промышленности / Д.В. Зубов, **М.Т.Х. Эраки** // «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-29 — Сборник трудов XXIX Международной научной конференции — 2016. — Том 3. — С. 233–236.

10. Скопинцев, И.В. Проектирование системы управления технологическим манипулятором с помощью пакетов LabVIEW и Solid Work / И.В. Скопинцев, Д.В. Зубов, **М.Т.Х. Эраки** // IX-й Международный Симпозиум «Полимерная индустрия: Инновации. Эффективность. Ресурсосбережение» — (7–8.12.2016).