

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Волгоградский государственный аграрный университет"

На правах рукописи



Захаров Евгений Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЭРГАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЗОЧНЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ-ТРИПОДОМ**

Специальность: 05.02.05 – Роботы, мехатроника и
робототехнические системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Несмиянов Иван Алексеевич

д. т. н., доцент

Волгоград – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ПОГРУЗОЧНЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ, МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ РОБОТЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ.....	13
1.1. Манипуляторы и манипуляционные роботы в технологических процессах грузопереработки.....	13
1.2. Приводы погрузочных манипуляторов.....	18
1.3. Системы управления погрузочными манипуляторами.....	21
1.3.1. Системы управления погрузочными манипуляторами с ангулярной зоной обслуживания	27
1.3.2. Системы управления манипуляторами параллельной структуры...	29
1.4. Управление погрузчиками и манипуляторами как человеко- машинными системами.....	37
1.4.1. Основные структуры систем управления погрузочными манипуляторами.....	38
1.4.2. Особенности разработки и исследования человеко-машинных систем управления.....	40
Выводы по главе.....	47
2. ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ И РЕАЛИЗАЦИЯ КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ.....	48
2.1. Формализация технологических процессов и планирование траекторий перемещения груза.....	52
2.1.1. Задачи планирования траекторий.....	53
2.1.2. Перемещение груза манипулятором-триподом по заданным траекториям.....	57
2.2. Моделирование управления погрузочным манипулятором-триподом...	60

2.3. Метод и алгоритм реализации копирующего управления манипулятором-триподом	61
2.4. Структурная схема системы ручного управления погрузочным манипулятором	64
Выводы по главе.....	68
3. МЕТОД И СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЗОЧНОГО МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА.....	69
3.1. Обеспечение перемещения груза по заданному закону движения по траектории.....	69
3.1.1. Динамический синтез оптимальных законов управления степенями подвижности погрузочного манипулятора.....	70
3.2. Задача управления погрузочным манипулятором по критерию минимизации затрачиваемой работы	81
3.3. Динамика груза на подвесе при различных законах программных движений	86
3.4. Моделирование парциальных движений манипулятора	89
Выводы по главе.....	92
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЗОЧНЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ.....	93
4.1. Экспериментальные образцы систем управления и стендовое оборудование.....	93
4.1.1. Стендовое оборудование и практическая реализация системы позиционного управления манипулятором-триподом.....	95
4.2. Методика проведения экспериментальных исследований.....	102
4.3. Оценка точности позиционирования и воспроизведения траекторий по парциальным движениям манипулятора.....	103
4.4. Оценка ошибок позиционирования от опытности оператора.....	109

4.5. Сравнение теоретических и экспериментальных данных.....	110
4.6. Оценка эффективности управления и повышения производительности манипулятора-трипода с позиционной системой управления.....	111
4.7. Кинематический показатель удобства управления манипулятором-триподом.....	115
Выводы по главе.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В различных отраслях экономики большой объем работ связан с погрузкой, разгрузкой и перемещением различных видов штучных грузов. Например, в сельскохозяйственном производстве к штучным грузам относятся рулоны сена, контейнеры с плодами и овощами, мешки, пакеты, ящики, емкости с жидкостью, крупногабаритные детали и узлы машин и т.п. Работа со штучными грузами подразумевается не только непосредственно при производственных процессах, но и на вспомогательных работах (строительных, ремонтных и др.)

Разнообразие погрузочно-разгрузочных работ обуславливает использование универсальных погрузчиков и погрузочных манипуляторов, а требования к сохранности грузов накладывают ограничения на скорости и ускорения исполнительных приводов погрузочных манипуляторов.

В сравнении с фронтальными погрузчиками, манипуляторы параллельно-последовательной структуры с пространственным исполнительным механизмом в виде треугольной пирамиды – трипода обладают рядом преимуществ: повышенная жесткость исполнительного механизма, низкая материалоемкость, достаточная зона обслуживания и маневренность в базовой плоскости, но они имеют один существенный недостаток – трудность ручного управления, связанную с особенностью конструкции. Парциальными движениями каждой степени подвижности невозможно задать движение по траектории строго в заданной плоскости, как минимум требуется одновременная работа двух исполнительных цилиндров.

Это обстоятельство, по данным испытаний на Северо-Кавказской машино-испытательной станции еще в 1982 году, стало основным препятствием для серийного производства погрузочных манипуляторов с исполнительным механизмом в виде трипода.

Следует также отметить, что управление одновременно несколькими степенями подвижности манипулятора усложняет систему управления и приводит к быстрой утомляемости оператора. Одним из путей решения этой проблемы является автоматизация механических процессов погрузки-разгрузки штучных грузов на одноподобных и часто повторяющихся траекториях. И здесь большие возможности управления и автоматизации процессов грузопереработки открываются при замене гидропривода электроприводом.

Современные электроцилиндры (актуаторы) становятся все доступнее на российском рынке, и по своим некоторым параметрам имеют ряд преимуществ перед гидроцилиндрами. Учитывая низкое энергопотребление электроцилиндров (питание 24В), экологичность, диапазон рабочих температур от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$, удобство обслуживания и широкие возможности управления, электроцилиндры являются альтернативой гидроцилиндрам [131].

Погрузочно-разгрузочные процессы на производстве имеют ряд особенностей, проявляющихся в виде неопределенностей. Например, начальная и конечная точки перемещения груза не всегда являются постоянными и стационарными. Но любой технологический процесс перемещения груза можно представить в виде типовых участков траекторий: линейных, криволинейных, кусочно-линейных и т. д. Производительность погрузочного агрегата на грузопереработке грузов напрямую зависит от выбранных траекторий. Естественно, что оптимальной по расстоянию и в большинстве случаев по времени будет прямая, но не всегда имеется возможность перемещения груза только по прямой из-за преград на пути перемещения груза, конструктивных особенностей исполнительного механизма погрузочного средства и других причин. Следует отметить, что перемещение по прямой не всегда является энергетически выгодным, такие случаи возникают при перемещении грузов в областях зоны обслуживания, близких к крайним положениям и при перемене направления движения исполнительных приводов. Поэтому выбор траекторий перемещения грузов необходимо планировать с учетом минимизации

энергозатрат [148]. Перемещение контейнеров, а также хрупких и легкотравмируемых грузов должно осуществляться с минимально возможными инерционными нагрузками.

Переход от ручного управления манипуляторами к полуавтоматическому, подразумевает управление исполнительными цилиндрами по определенным задаваемым законам – программным движениям. Чаще всего используют так называемые законы «мягкого» касания и трогания, которые обеспечивают в начальный и конечный момент движения по траектории нулевые значения скоростей и ускорений рабочего органа (крюка, захвата). Такие «стандартные» законы широко применяются в манипуляторах роботов с разомкнутой кинематической цепью и рассмотрены в работах М.З. Коловского, А.С. Ющенко, С.Л. Зенкевича, В.В. Жоги, В.М. Герасуна и других ученых [8, 17, 34, 40, 48, 51, 110, 152, 153, 156, 160].

Для манипуляторов пространственной структуры необходим комплексный и обоснованный подход к выбору законов программных движений, с учетом конструкции конкретного манипулятора.

Поэтапное решение комплекса обозначенных задач позволит вывести управление погрузочными манипуляторами параллельно-последовательной структуры на более качественный уровень. А это повлечет за собой повышение производительности погрузочно-разгрузочных работ, повысит удобство управления, снизит утомляемость оператора и вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Степень разработанности темы исследования

Одной из разновидностей пространственных конструкций погрузочных манипуляторов являются исполнительные механизмы в виде трипода, представляющего механизм параллельной структуры. Причем возможны различные конструктивные исполнения механизмов: полнопараллельные, неполнопараллельные, параллельно-последовательные и т.д. Большой вклад в проектирование и исследование погрузочных манипуляторов с исполнительным

механизмом в виде треугольной пирамиды – трипода внесли ученые: В.И. Пындак, В.М. Герасун, А.Ф. Рогачев, В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев, С.В. Хейло, Г.В. Рашоян, J. Merlet, V. Arakelian и др. [23, 25, 26, 28, 113, 114, 116, 146, 150]. Разработке систем ручного управления погрузочных манипуляторов на основе неполнопараллельного трипода посвящены работы В.М. Герасуна, В.А. Гайворонского, А.Н. Макаренко, А.С. Горобцова, С.Г. Капустяна, А.П. Карпенко, В.В. Жоги, Л.А. Рыбак, В.В. Дяшкина-Титова, Ю.Г. Лапынина и других [20, 22, 34, 36, 38, 43, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 95, 88, 119].

Большинство систем управления манипуляторами, разработанных А.Е. Кобринским, М.З. Коловским, Е.И. Юревичем, А.С. Ющенко, А.И. Корендясевым, А.Ф. Крайневым и др., являются системами программного управления различного уровня и реализуют заданные программные движения захвата манипуляторов промышленных роботов. Однако разработка методов копирующего и позиционного полуавтоматического управления погрузочными манипуляторами в виде трипода по заданным законам и траекториям рассматривается впервые.

Целью работы является установление закономерностей эргатического управления манипулятором - триподом с поворотным основанием и разработка методов их учета для обеспечения задаваемых показателей качества перемещения грузов.

Для достижения поставленной цели в процессе работы решались следующие **задачи**:

1. Анализ приводов, систем управления и режимов работы погрузочных манипуляторов с ручным управлением.
2. Разработка динамической модели погрузочного манипулятора и оценки энергозатрат его исполнительных приводов при перемещении груза по разным траекториям.
3. Формирование оптимальных законов программных движений исполнительного органа погрузочного манипулятора-трипода по критерию минимизации инерционных нагрузок в процессе перемещения штучных грузов.

4. Разработка метода и алгоритма копирующего управления исполнительными звеньями манипулятора-трипода для обеспечения перемещения груза по заданной траектории.

5. Разработка эргатической системы ручного полуавтоматического управления погрузочным манипулятором для реализации перемещения груза по заданным законам и траекториям.

6. Оценка точности воспроизведения рабочим органом манипулятора задаваемой оператором траектории перемещения груза. Оценка эффективности эргатической системы управления погрузочным манипулятором-триподом.

Научная новизна работы заключается в установленных закономерностях влияния характера и вида движения перемещаемого груза на энергозатраты исполнительных приводов и динамические нагрузки, действующие на элементы конструкции манипулятора-трипода, а также в разработке эргатической системы управления, позволяющей реализовать перемещение грузов с минимальными инерционными нагрузками по заданным траекториям и программным законам движения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость состоит в возможности распространения установленных закономерностей на манипуляторы, имеющие другие схемы структурного строения и массово-геометрические параметры.

Практическая значимость результатов заключается в том, что предложенные методы и алгоритмы позволяют реализовать ручное управление грузозахватным органом погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом в виде треугольной пирамиды – трипода и повысить производительность труда за счет реализации полуавтоматического управления при перемещении грузов по заданным, часто повторяющимся траекториям с минимальными энергозатратами.

Методология и методы исследования основывались на основных положениях теоретической механики, теории механизмов и машин, теории

оптимального управления, методах математического, компьютерного и физического моделирования управляемых движений приводных электромеханических систем манипулятора-трипода.

При решении задач на ЭВМ использовались пакет математических вычислений «*Mathcad*», программный комплекс *SimulationX*, прикладные программы, созданные на C#. Для обработки результатов исследований использовался табличный процессор *MS Excel*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель погрузочного манипулятора, позволяющая определять энергозатраты исполнительных приводов погрузочного манипулятора-трипода при перемещении груза по различным траекториям.

2. Решение задачи динамического синтеза программных движений исполнительного органа погрузочного манипулятора-трипода из условия минимума ускорений в процессе перемещения грузов.

3. Метод и алгоритм копирующего управления исполнительными звеньями погрузочного манипулятора с пространственным механизмом в виде трипода.

4. Эргатическая система ручного управления погрузочного манипулятора, реализующая перемещение груза по заданным траекториям и законам движения.

5. Зависимости ошибок позиционирования и скорости исполнительного органа от скорости управляющих воздействий на задающее устройство в зависимости от задаваемого допустимого отклонения от траектории.

6. Оценка условной производительности погрузочного манипулятора на участке траектории при перемещении штучных грузов и метод определения показателя удобства ручного управления триподом.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась использованием классических методов исследования, обоснованными допущениями и

достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы, результаты исследований обсуждались и получили одобрение на следующих научных конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях», г. Мичуринск-Наукоград РФ, 10-12 ноября 2014 г.;
- 7-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2014», Р. Беларусь, г. Минск. 19-21 ноября 2014 г.;
- XIX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 11-14 ноября 2014 г.;
- Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса России», г. Пенза, 13-14 марта 2014 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Научные основы стратегии развития АПК и сельских территорий в условиях ВТО», г. Волгоград, 28-30 января 2014 г.;
- XVII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, г. Волгоград, 2015 г.;
- XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами (УБС-2015)», г. Волгоград, 7-11 сентября 2015 г.;
- Международная научно-практическая конференция "Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях", посвященная 70-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг., г. Волгоград, ВолГАУ, 3-5 февраля 2015 г.;
- Всероссийская научно-методическая конференция с международным участием «Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК». г. Иваново, 4-8 апреля 2016 г.;
- Международная научно-практическая конференция "Стратегические ориентиры инновационного развития АПК в современных экономических условиях", г. Волгоград, 26-28 января 2016 г.;

- Международная научно-практическая конференция "Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях". Волгоград, ВолГАУ, 3-5 февраля 2016 г.;
- Студенческая конференция «Прикладная механика в теории и практике», г. Волгоград, ВолГАУ, 17 мая 2017 г.;
- Всероссийская научно-методическая конференция с международным участием, посвященная 100-летию академика Д.К. Беляева «Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России», г. Иваново, 2 марта 2017 г.;
- IV Международная школа-конференция молодых ученых «Нелинейная динамика машин» School-NDM, г. Москва, 18-21 апреля 2017 г.
- Международная научно-практическая конференция ПТСС-2018, г. Волгоград, ВолГГТУ, 9-11 октября 2018 г.;
- Юбилейная XXX Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения, г.Москва, ИМАШ РАН, 20-23 ноября 2018 г.
- X Всероссийская научно-технической конференции с международным участием, г. Железногорск, СФУ, 8 декабря 2018 г.

Публикации

Основные положения диссертации отражены в 17 публикациях, в том числе в 5 изданиях по перечню ВАК и одна статья в журнале из списка Scopus. Получено два патента на полезную модель.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 167 страниц, в тексте имеется 5 таблиц и 76 рисунков, 8 приложений. Список литературы включает 163 наименования.

1. ПОГРУЗОЧНЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ, МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ РОБОТЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

1.1. Манипуляторы и манипуляционные роботы в технологических процессах грузопереработки

Объем производства в различных отраслях экономики требует ускорения технического прогресса, увеличения мощности всех технических средств, обновления основных фондов, улучшения их использования. Развитие производства во многом формируется техническим прогрессом.

Разработка и внедрение новейших конструкций и механизмов, соответствующих требуемому современному уровню развития науки и техники, ведёт к увеличению эффективности производства и обеспечивает механизацию производства. Статистика свидетельствует, что из всего времени нахождения готовой продукции на предприятии – большая часть идёт на выполнение транспортно-складских и погрузочно-разгрузочных работ. Этим объясняется их высокая доля в цене выпускаемой продукции.

Современная стратегия развития транспортного комплекса предполагает создание новых машин и механизмов, повышение уровня механизации производства для обеспечения продукцией необходимого качества с минимальными затратами.

Сокращение тяжелого физического труда на любом производстве связано в первую очередь с механизацией и роботизацией погрузочно-разгрузочных работ. В настоящее время проблема автоматизации подъемно-транспортных, погрузочно-разгрузочных, транспортно-складских работ и комплексной механизации остается актуальной в строительстве, перерабатывающей промышленности, сельском хозяйстве и в других областях [4, 56, 57, 58, 77, 80, 102]. Перемещение и позиционирование тяжёлых крупногабаритных грузов необходимо в различных отраслях при строительстве, замене и монтаже агрегатов и энергетических установок как стационарных, так и на транспорте. Уровень

эффективности производства продукции напрямую зависит от времени, затрачиваемого на погрузочно-разгрузочные работы [152].

Погрузочно-разгрузочные операции считаются низкопроизводительными, так как здесь все внимание сосредоточено на сохранении перемещаемых грузов. Так же погрузочно-разгрузочные работы характеризуются тяжелыми условиями. По своей тяжести эти работы относятся к третьей категории тяжести труда, сопровождающиеся высоким травматизмом. Поэтому, до настоящего времени, производительность труда на погрузочно-разгрузочных операциях остается крайне низкой.

Некоторые грузы отличаются невысоким сопротивлением механическому воздействию, поэтому одним из путей снижения потерь качества продукции в процессе ее погрузки является применение контейнеров [14, 125].

Сильные удары являются причинами повреждений, но меры предосторожности должны быть применены и для предотвращения ударов малой силы. Если это не будет сделано, то последствия от ударов малой силы будут суммироваться и наносить не меньший вред перегружаемой продукции.

Потери от повреждений плодовоовощной продукции при погрузочно-разгрузочных работах составляют в среднем 20-30%. Чаще всего эти проблемы решаются за счет укрупнения грузовых единиц (пакеты, контейнеры), а также рационального выбора режимов работы погрузочно-разгрузочных средств, применения различных демпферов, остановов и т.п.

Контейнерная грузопереработка необходима во многих технологических процессах производства продукции. Для небольших предприятий годовая загрузка погрузочно-разгрузочной техники невелика, особенно для работы со штучными грузами и достигает нескольких десятков часов [15]. Вследствие чего, в таких случаях рационально использовать универсальные и роботизированные погрузчики [1, 9, 43, 99, 105, 109, 110, 111, 112, 114, 115, 162, 163].

Повреждения груза при погрузочно-разгрузочных работах обусловлены несколькими факторами, основным из которых является ускорение, испытываемое им при перемещении, поэтому одним из главных

эксплуатационных требований, предъявляемых к погрузчикам, является повышение плавности перемещения.

Плавность хода исполнительных звеньев погрузочных манипуляторов является важным качественным показателем его работы, характеризующим способность перемещения в интервале эксплуатационных скоростей без быстрой утомляемости оператора или повреждений перевозимого груза, обусловленных его колебаниями.

Выбором рациональной траектории, можно существенно сократить время холостого перемещения рабочего органа на монотонных операциях погрузки – разгрузки. Технологический процесс перемещения груза по оптимальным траекториям в совокупности с модернизированными системами управления будет весьма эффективен на разгрузке штучных грузов в складских помещениях, когда требуется перемещать грузы на расстояния в пределах зоны действия погрузчика. Причем, он очень легко может быть автоматизирован для повторяющихся траекторий, что повысит эффективность применения погрузочного средства и исключит ошибки оператора.

Погрузочные манипуляторы относятся к подъемно-транспортным машинам прерывного или периодического действия и могут выполнять такие операции, как захват груза, его подъем и транспортирование, опускание и освобождение [44]. Некоторые из этих операций обычно совмещаются полностью или частично. Важный фактор повышения производительности труда, который зависит от маневренности машины и квалификации оператора - это совмещение операций.

Манипуляторы, снабженные позиционными следящими приводами звеньев и управляемые оператором, позволяют механизировать разнообразные трудоемкие погрузочно-разгрузочные операции. Но даже при работе с однотипными грузами рабочая операция меняется от цикла к циклу, что вызвано изменением координат начальной и конечной точек траектории, т.е. рабочая операция не вполне ясна заранее, а варьируется в широких пределах [77, 78].

Очевидно, эти задачи можно выполнить, развивая и совершенствуя погрузчики, имеющие широкие возможности для механизации различных

технологических процессов [6, 97, 107]. Этим требованиям соответствуют погрузочные манипуляторы, в кинематических цепях которых присутствуют пространственные исполнительные механизмы, позволяющие осуществить перемещение грузозахватного органа по сложным траекториям при сравнительно простом конструктивном исполнении [16, 133].

На данный момент существует множество разновидностей пространственных грузоподъемных устройств, среди них и разработки кафедры «Механика» (рисунок 1.1).



а)



б)



в)



г)

а) навесной погрузочный манипулятор НПМ-0,6; б) навесной погрузочный манипулятор НПМ-0,8; в) бесстреловой погрузочный манипулятор БПМ-0,5; г) стреловой погрузочный манипулятор СПМ-0,6

Рисунок 1.1 – Погрузчики и манипуляторы

Погрузочные манипуляторы НПМ-0,6, НПМ-0,8, БПМ-0,5, разработанные на кафедре «Механика» Волгоградского ГАУ [23, 123] имеют исполнительный механизм в виде пространственной конструкции параллельной (триподом) (БПМ-0,5) и неполно-параллельной (НПМ-0,6; НПМ-0,8; СПМ-0,6) кинематических структур. Такое структурное строение обуславливает особенности управления исполнительным механизмом.

Одним из достоинств манипулятора-трипода является значительное усилие, развиваемое совокупным действием линейных приводов.

Погрузчики и манипуляторы, по видам систем координат зоны обслуживания, классифицируются на пространственную ангулярную, плоскую ангулярную и плоскую прямоугольную. Соотношение распределения сельскохозяйственных погрузчиков от вида системы координат исполнительного органа представлено на рисунке 1.2.

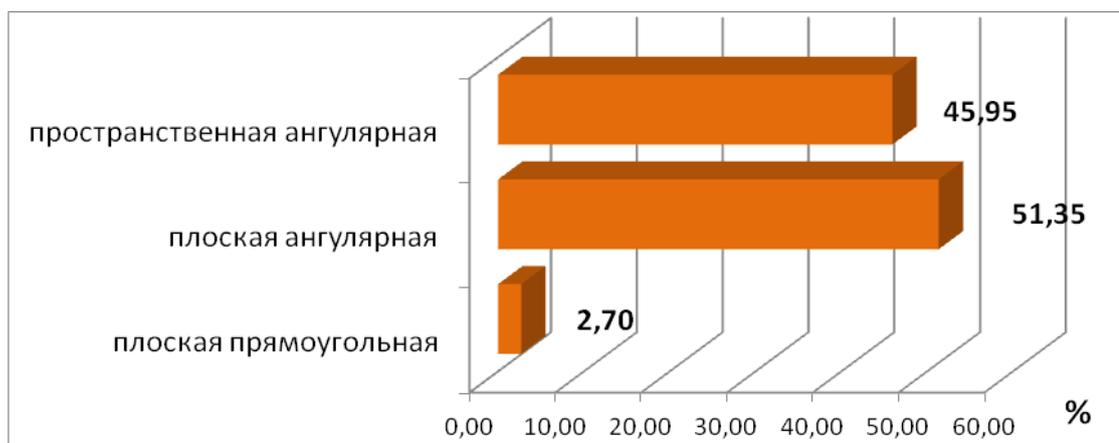


Рисунок 1.2 – Распределение погрузчиков и погрузочных манипуляторов от вида системы координат исполнительного органа

Фронтальные погрузчики, как правило, имеют плоскую ангулярную систему координат, электропогрузчики контейнеров – подъемники работают в плоской прямоугольной системе координат. Пространственной ангулярной зоной обслуживания обладают консольно-поворотные и пространственные манипуляторы.

Интегрированные технологические комплексы грузопереработки штучных грузов должны развиваться в соответствии с принципом «технология – управляемая механическая система – погрузочный агрегат» [145]. Решение этих задач требует создания широкой гаммы подъемно-транспортных средств, охватывающей все отрасли производства. Следует также учитывать, что основными требованиями, предъявляемыми к погрузочным манипуляторам, являются простота конструкции, малая металлоемкость, унификация узлов и деталей и, что очень важно, удобная система управления с высокой степенью точности [70]. Оптимально - обслуживание должно осуществляться одним рабочим с дистанционного пульта управления.

1.2. Приводы погрузочных манипуляторов

По типу привода наиболее распространенными являются гидравлические погрузчики. Однако, в последнее время широко начинает внедряться электромеханический привод (приложение 1).

Исполнительные линейные приводы – электроцилиндры (актуаторы) могут эффективно заменить гидравлический или пневматический привод во многих мобильных технологических машинах [154]. Преимущества электроцилиндров – безопасность и экологичность, способность работать в широком температурном диапазоне от -40° до $+80^{\circ}$ С, что несомненно важный фактор для использования на производстве. Неоспоримыми достоинствами электроцилиндров являются простота обслуживания, стабильность усилия, быстродействие не ниже (а иногда и выше) чем у гидроцилиндров и высокая точность позиционирования. К тому же автоматизация однотипных операций при использовании электропривода реализуется проще по сравнению с гидроприводом [46, 73].

Анализ электроцилиндров доступных на российском рынке и сравнение их характеристик с гидроцилиндрами показал, что электроцилиндры уступают гидроцилиндрам только по характеру воспринимаемых нагрузок, актуаторы чувствительны к радиальным нагрузкам, и при одинаковых развиваемых усилиях

гидроцилиндры могут развивать большую скорость перемещения по сравнению с электроцилиндрами (приложение 2, приложение 3).

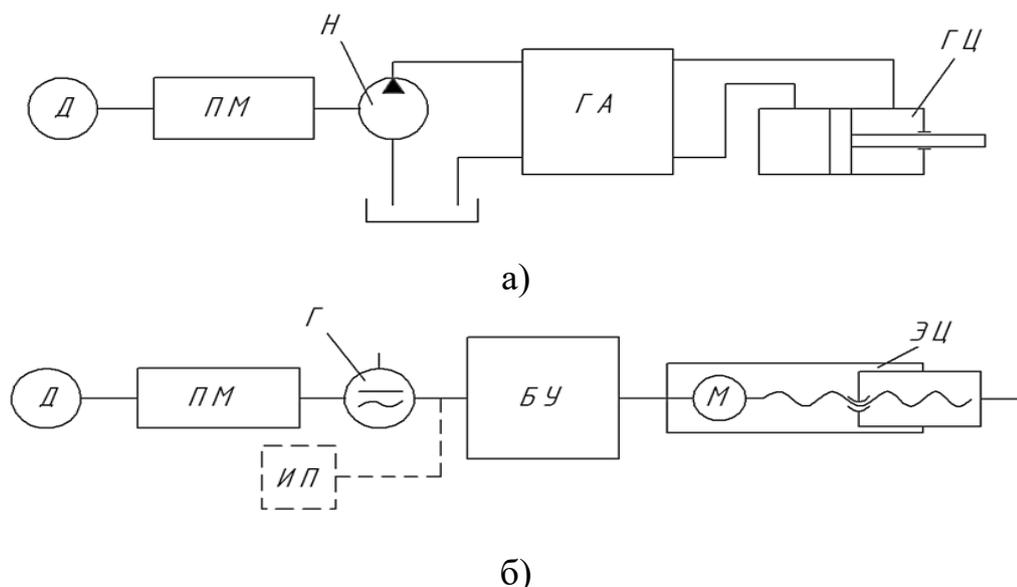
С точки зрения энергоэффективности проведена сравнительная оценка коэффициента полезного действия (КПД) электро- ($\eta_{ЭП}$) и гидроприводов ($\eta_{ГП}$)

$$\eta_{ГП} = \eta_{ПМ} \cdot \eta_{Н} \cdot \eta_{ГА} \cdot \eta_{ГЦ}, \quad (1.1)$$

$$\eta_{ЭП} = \eta_{ПМ} \cdot \eta_{Г} \cdot \eta_{СУ} \cdot \eta_{ЭЦ}, \quad (1.2)$$

где $\eta_{ПМ}$ - КПД передаточного механизма; $\eta_{Н}$ - КПД гидронасоса; $\eta_{ГА}$ - КПД гидрораспределителя, клапанов и других гидроагрегатов; $\eta_{ГЦ}$ - КПД гидроцилиндра; $\eta_{Г}$ - КПД генератора; $\eta_{СУ}$ - КПД системы управления, контроллеров и преобразователей; $\eta_{ЭЦ}$ - КПД электроцилиндра.

Наиболее высоким КПД среди двух рассматриваемых типов приводов обладает электропривод (рисунок 1.3).



Д – двигатель, ПМ – передаточный механизм, Н - насос, ГА – гидроагрегаты, ГЦ – гидроцилиндр, Г- генератор, БУ – блок управления электроцилиндром, ЭЦ – электроцилиндр, ИП – источник питания

Рисунок 1.3 - Схемы гидро- (а) и электромеханического привода (б)

Коэффициент полезного действия электропривода - это отношение полезной мощности силового агрегата к мощности потребляемой. Этот показатель у двигателей, мощностью до 100 кВт находится в пределах от 0,75 до

0,9, для более мощных силовых агрегатов КПД существенно выше: 0,9-0,97. КПД электропривода не является величиной постоянной, своего максимума он достигает при нагрузках около 80% мощности. Достигает он пикового значения быстро, но после своего максимума начинает медленно уменьшаться. Это связано с возрастанием электрических потерь при нагрузках, более 80% от номинальной мощности (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Удельная мощность (отнесенная к весу) различных систем приводов в зависимости от абсолютной мощности

Падение коэффициента полезного действия не велико, что позволяет говорить о высоких показателях эффективности электропривода в широком диапазоне мощностей. Гидропривод же в свою очередь имеет сравнительно низкий коэффициент полезного действия, зависящий от потерь мощности на механическое трение в насосе и гидродвигателе, на утечки жидкости и на потери давления в гидросистеме.

Как показали расчеты для электроцилиндров с шариковинтовой передачей (актуаторы *SFK*) КПД привода составляет 68...75%, при том как КПД гидропривода всего 52...63%. Более дорогостоящие актуаторы с роликовинтовой передачей, например, фирмы *Exlar* позволяют достичь КПД до 78...82%.

Большинство актуаторов хорошо защищены от попадания воды и пыли внутрь корпуса (характеризуется классом защиты *IP*), с другой стороны, они не выделяют в рабочую среду газы, жидкие и твердые частицы. Безопасность электроприводов дополняется тем, что при отключении питания они неподвижно

блокируются (самотормозящиеся приводы) [48]. Электромеханические и электромагнитные актуаторы являются наиболее удобными и универсальными приводами. Их легко подключить благодаря широкой распространенности и доступности сетевых и автономных источников электричества. Установка систем электропитания, в том числе разводка силовых и управляющих цепей – проще, чем прокладка гидравлических и пневматических линий. Система электропривода в целом и отдельные ее элементы компактны. Электромеханические приводы обладают наибольшей энергоэффективностью по сравнению с конкурирующими решениями, так как в них происходит прямое преобразование энергии из электрической в механическую, а их энергопотребление в режиме ожидания крайне мало. При модернизации оборудования не составляет сложностей замена пневматических и гидравлических цилиндров электроцилиндрами, так как можно обеспечить совместимость по габаритам и креплениям.

Но главные преимущества электрических сервоприводов – отличные управляемость и широкие возможности контроля параметров. Позиционирование обеспечивается с высочайшей точностью и повторяемостью, а скорость регулируется в широких пределах. Серводвигатели за счет реализации обратной связи позволяют отслеживать текущие параметры движения и положения и осуществлять управление или с учетом этой информации. При необходимости электропривод легко перенастраивается под новые задачи. Поэтому при применении на современных производствах, автоматических линиях и в роботах альтернативы электроприводам практически нет.

1.3. Системы управления погрузочными манипуляторами

Общий обзор показывает, что для механизации погрузочно-разгрузочных работ в промышленности, строительстве, коммунальном и сельском хозяйстве используются различные типы погрузочных манипуляторов: фронтальные и с поворотной стрелой. Каждый тип погрузочного манипулятора обуславливает свою структуру системы управления.

Помимо этих двух разновидностей погрузчиков, существуют погрузчики на основе пространственного исполнительного механизма или, как их еще называют, погрузочные манипуляторы параллельной структуры. Особенностью кинематических схем этих манипуляторных погрузчиков является то, что функции ведущих звеньев выполняют силовые гидро- или электроцилиндры.

Проанализировав типы систем управления, применяемых в погрузочных манипуляторах видно, что чаще всего используется ручное управление гидрофицированными погрузчиками (рисунок 1.5). Управлять гидравлическим приводом вручную несложно. Но если требуется работа в автоматизированном или полностью автоматическом режиме с перемещением по заданной программе с высокой точностью и повторяемостью, возникают определенные сложности. Такие же проблемы возникают и при одновременном управлении гидроцилиндрами манипуляторов с пространственным исполнительным механизмом.

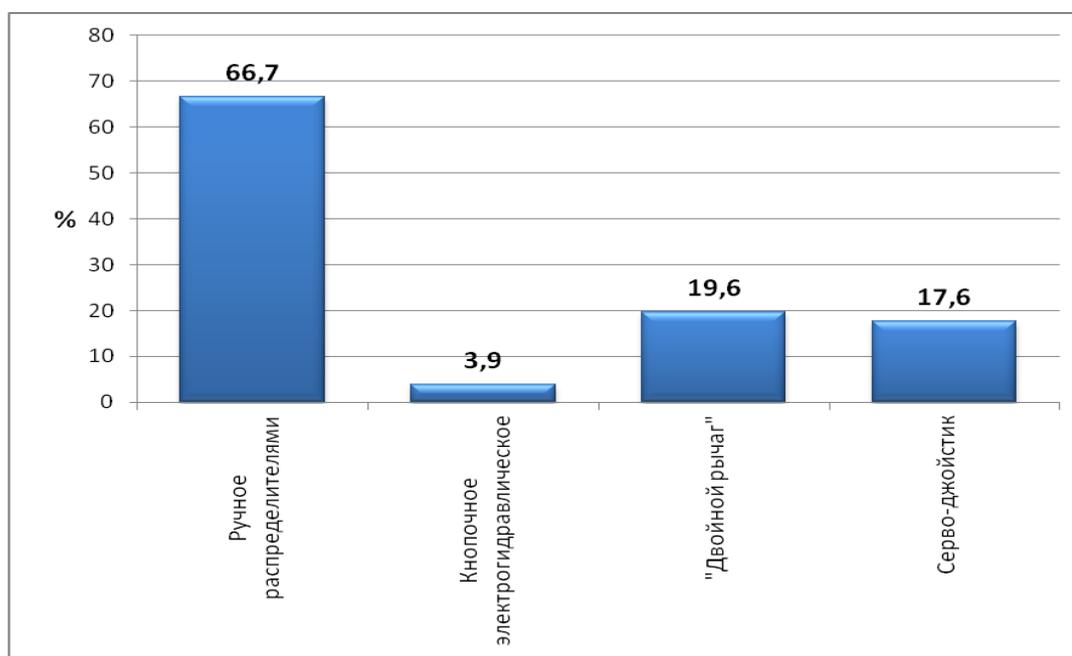


Рисунок 1.5 - Распределение погрузчиков по типу системы управления погрузочным манипулятором

Число рукояток управления в некоторых конструкциях достигает десяти, что требует от оператора высокой профессиональной подготовки и становится тормозом при интенсивном и непрерывном технологическом процессе.

Погрузочно-разгрузочные работы на открытом пространстве, как правило, не накладывают жестких ограничений на положения звеньев манипулятора. Однако, сложность управления манипуляторами значительно увеличивается при работе в ограниченных объемах (помещениях, складах, ангарах), скорости звеньев манипулятора при этом ограничиваются в целях обеспечения безопасности.

Практикой установлено, что мысленная координация трех одновременно производимых движений является верхним пределом возможности человека [47].

Погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые манипулятором, которым управляет оператор, часто бывают однообразными и монотонными, несмотря на их трудоёмкость. Часто повторяющиеся операции снижают производительность труда, так как при ручном управлении оператор является звеном цепи управления, снижающим быстродействие всей системы вследствие запаздывания реакции.

Переход от ручного управления манипуляторами к дистанционному и автоматическому начался ещё в конце 50-х годов прошлого столетия, а в 60-х годах в ряде стран уже использовались грузоподъёмные средства, управляемые дистанционно [73, 103, 140].

В погрузчиках фирмы *Liebherr* (Германия) уже в конце 80-х годов XX века управление рабочим оборудованием осуществлялось от одного многофункционального рычага, уменьшить усилия на нём позволяют сервосистемы.

В 80-х годах XX века фирмы «Коматсу» и «Хитачи» разработали и начали выпускать экскаваторы с системой дистанционного управления по радиоканалу, однако на настоящее время применение автоматизированных систем управления на экскаваторах носит единичный характер, в настоящее время широко используются только автоматические краны-штабелёры, управляемые заданной программой. В этот период времени активно разрабатываются системы позиционно-силового управления землеройными и погрузочными машинами.

Дистанционное электрогидравлическое управление погрузочными манипуляторами широко распространено за рубежом. К примеру, фирма *Hiab* (Швеция) поставляет до 40 % манипуляторов с дистанционным управлением, а фирма *Fiskars* (Финляндия) поставляет такие машины уже с 1975 года.

Широкое распространение дистанционного управления манипуляторами объясняется возросшими требованиями к мобильным машинам, но всех меньше оно коснулось отечественных погрузчиков и погрузочных манипуляторов для коммунального, сельского хозяйства и строительства.

В погрузочных манипуляторах чаще всего применяют следующие виды управления:

- 1) Командное управление – управление каждым приводом по отдельности;
- 2) Копирующее – координатное управление по заданому положению рабочего органа с помощью задающего устройства – джойстика;
- 3) Полуавтоматическое – управление посредством микропроцессорной техники, в свою очередь оно может быть: а) скоростное – оператор задает вектор скорости; б) позиционное – задается положение рабочего органа; в) силовое – задается усилие.

Позиционно-силовое управление манипулятором эффективно там, где необходимо регулировать силовое воздействие схвата на объекты, например, в промышленных манипуляторах и роботах, работающих с хрупкими и опасными грузами [32, 37, 42, 61, 79, 95, 148, 144].

Манипуляторы погрузочных машин имеют несколько степеней свободы (подвижности) выходного звена (точки крепления рабочего органа, схвата). От степени подвижности выходного звена зависит сложность системы управления.

От количества внутренних входов и степени подвижности зависит максимальное число одновременных управляющих воздействий на манипулятор [5, 64, 67, 76, 133, 149].

От степени подвижности W манипулятора зависит его маневренность – подвижность манипулятора при зафиксированном (неподвижном) рабочем органе. Для пространственных механизмов $M=W-6$, для плоских механизмов

$M=W-3$. Следовательно, чем больше W , тем меньше глобальных перемещений шасси, и, соответственно, меньше энергопотребления. С другой стороны, увеличение степеней подвижности манипулятора ведет к усложнению системы управления им.

В результате анализа погрузчиков, выпущенных в период конца XX века по настоящее время разными странами (приложение 4), видно, что чаще всего в строительстве, агропромышленном комплексе, коммунальном хозяйстве применяются погрузочные манипуляторы со степенью подвижности $W=2$ и более (рисунок 1.6).

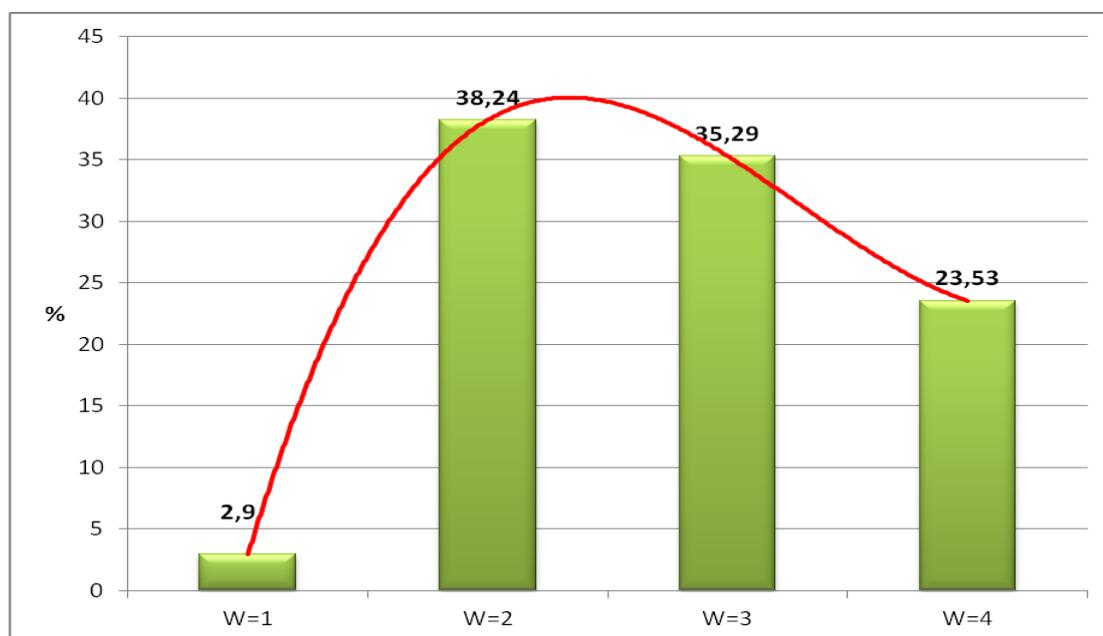


Рисунок 1.6 - Распределение моделей погрузчиков по степени подвижности W (без учёта глобальных перемещений шасси и дополнительных подвижностей рабочего органа)

Погрузочные манипуляторы с $W=2$ – это как правило фронтальные, работающие в плоской системе координат. Для реализации пространственной зоны обслуживания и необходимой маневренности рабочего органа степень подвижности должна равняться трем и выше, однако управление манипуляторами с тремя и более степенями подвижности становится затруднительным для

оператора. Степень подвижности четыре и более имеют, как правило, бортовые манипуляторы, устанавливаемые на автотранспортные средства.

При традиционном управлении каждой степенью подвижности манипулятора такие операции осуществляются путем поочередного подъема и опускания стрелы и рукояти манипулятора, при котором груз совершает сложное движение. Основная трудность управления погрузочным манипулятором заключается в сложности координации перемещения органов управления, согласования движений оператора с пространственным положением рабочего органа машины, при одновременном выполнении условий точности и быстродействия. Недостаточная скоординированность управляющих воздействий увеличивает суммарное время цикла и длину траектории перемещения рабочего органа [38]. Улучшить показатели эффективности управления погрузчиком можно, если оператор будет управлять не каждым звеном в отдельности, а задавать направления и скорость перемещения собственно рабочего органа.

Применение координатного управления с использованием электрогидрораспределителей, дает увеличение эксплуатационной производительности за счет сокращения времени цикла погрузочно-разгрузочных работ [72, 83].

Хорошо известно, что по мере увеличения расстояния между управляющей станцией и исполнительным органом задача ручного управления манипулятором существенно усложняется. При расстоянии, измеряемом метрами, эти усложнения отражаются главным образом на точности и производительности работы оператора. При использовании дистанционного управления человеку-оператору создается «эффект присутствия» на месте выполнения работ исполнительным органом погрузочного манипулятора. Это означает, что зрительная и другого рода информация передается с максимальной точностью без помех и в форме, обеспечивающей максимальную скорость восприятия и переработки информации.

После того как многие производители стали широко использовать электронику при оснащении своего модельного ряда, многие погрузчики стали

оснащаться электрическим сервоуправлением с применением джойстиков (рисунок 1.7).

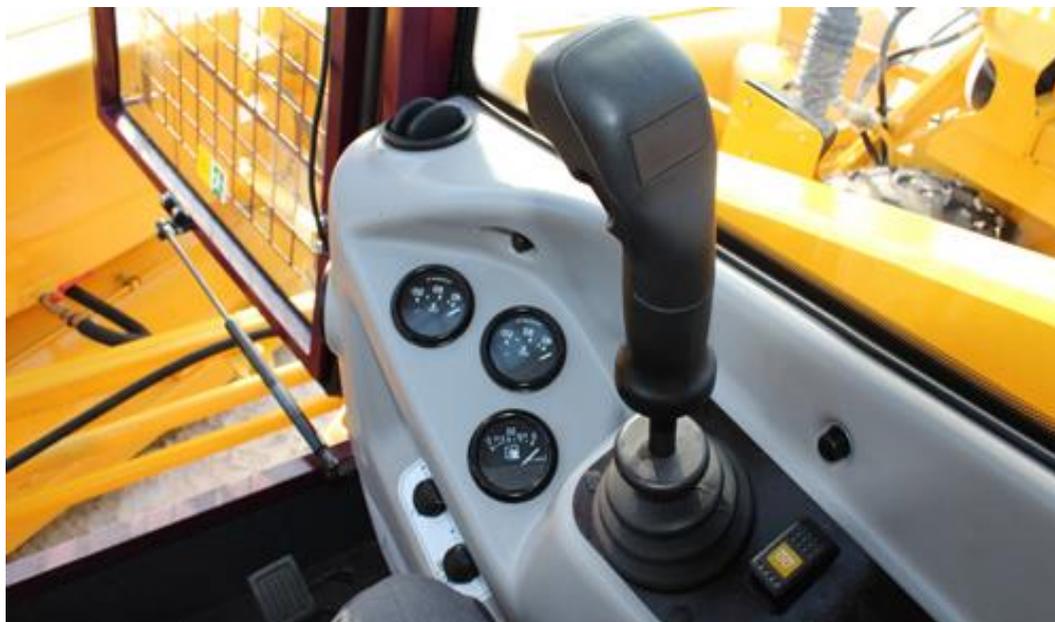


Рисунок 1.7 – Сервоуправление с применением джойстика

Проанализировав предложения на рынке, видно, что в некоторых случаях джойстиковое управление — пока еще опция, а в других — элемент базовой комплектации. Если сравнивать его с рычагами, то первое достоинство — меньшее количество усилий, которое необходимо прилагать в процессе выполнения производственного задания. Это очень удобно и отлично выражается в виде повышения производительности.

1.3.1. Системы управления погрузочными манипуляторами с ангулярной зоной обслуживания

Применение погрузочных манипуляторов тем эффективнее, чем большими возможностями он обладает. Современные погрузочные манипуляторы имеют несколько исполнительных цилиндров от 2 до 5 [27, 94], каждый из которых, как правило, управляется отдельной рукояткой.

Ручная система управления может быть параллельной либо перекрестной. Может размещаться на платформе, что добавляет удобства в работу оператора, так как ему отлично будет видно рабочее пространство. Однако наиболее эффективную работу обеспечивает дистанционное управление.

У нас в стране пульты используют только при выполнении простых действий: разгрузки и погрузки. Россиянами больше востребованы электрогидравлические системы. Электронное управление погрузочным манипулятором в основном устанавливают на сложных конструкциях, которые оснащены длинной стрелой и другим дополнительным оборудованием.

Есть разработки электрогидравлических устройств управления гидравлическими манипуляторами, применяемыми, например, для перегрузочно-технологических работ и работ со штучными и затаренными грузами [104, 106].

Для манипуляторов в виде последовательных кинематических цепей ведутся разработки антропоморфных систем управления.

Система управления (рисунок 1.8) состоит из пульта управления и органа управления. На платформе расположены мотор-редуктор, манипулятор и микроконтроллеры на основе однокристалльной микро-ЭВМ АТМega 8. Манипулятор состоит из 5 сервоприводов и оснащен захватом.

Контроллер пульта управления имеет 6 каналов АЦП. АЦП измеряют сигналы от датчиков и контроллер пульта управления, посылает команду по интерфейсу RS232 контроллеру робота. Одна команда – 2 байта: номер сервопривода и угол поворота (определяет ширину импульса).

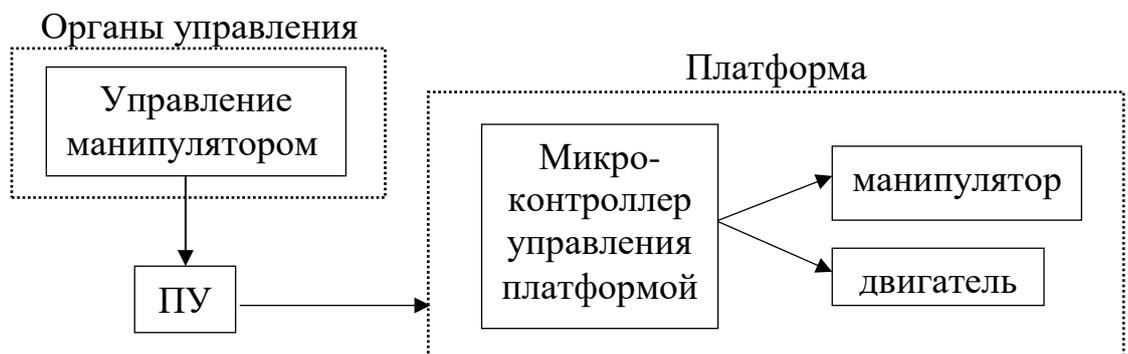


Рисунок 1.8 – Общая схема управления

Орган управления имеет датчики положения руки. Датчики положения – это резисторы и тяги (рисунок 1.9). Когда рука сгибается в локте или в кисти, срабатывают тяги и через резисторы идет сигнал на пульт управления (ПУ), от ПУ – на контроллер робота, а он посылает на нужный сервопривод манипулятора.

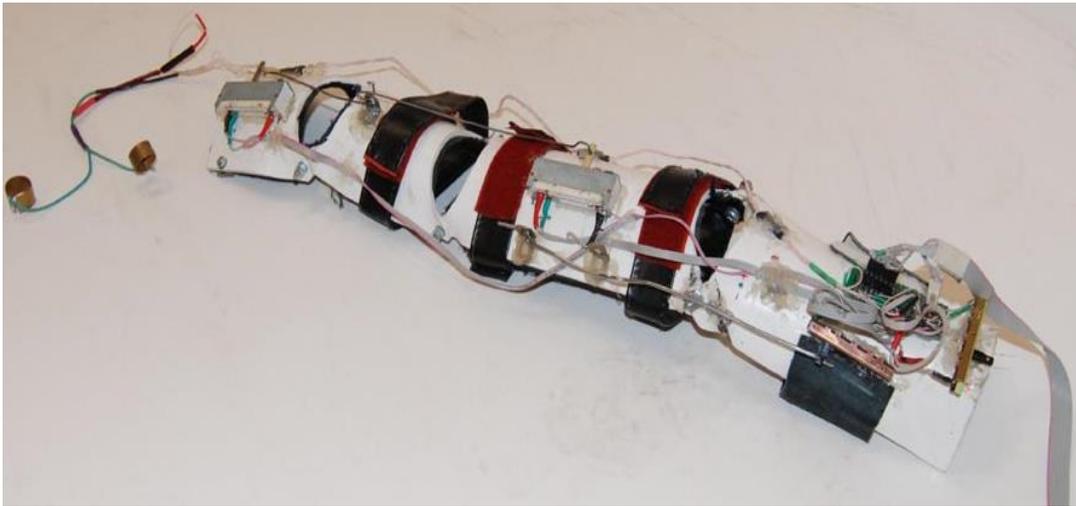


Рисунок 1.9 – Вариант исполнения антропоморфного органа управления

1.3.2. Системы управления манипуляторами параллельной структуры

Особое место в разнообразии погрузочных манипуляторов занимают манипуляторы с пространственными l -координатными исполнительными механизмами, которые в силу своих особенностей ещё называют механизмами параллельной структуры.

Пространственные l -координатные механизмы известны достаточно давно, однако из-за малого использования в технике исследования в области геометрического и кинематического синтеза, синтеза систем управления механизмами параллельной структуры интенсивно начались в конце XX – начале XXI веков.

Манипуляторы параллельной структуры являются альтернативой традиционным манипуляторам с незамкнутыми кинематическими цепями, хотя

первые имеют меньший размер зоны действия и требуют более сложных систем управления. Они имеют высокую точность позиционирования рабочего органа и выдерживают высокие нагрузки наряду с высокой маневренностью [59, 120, 167]. Но место манипуляторов и механизмов параллельной структуры в общей номенклатуре погрузчиков пока довольно незначительно и это объясняется неоправданно кажущейся сложностью расчетов и изготовления. Доля таких манипуляторов в промышленности низка, а существующие – это, как правило, экспериментальные образцы. Особенно такие механизмы хорошо зарекомендовали себя в станкостроении, в робототехнических комплексах автоматизированных производств и при работе в агрессивных средах [62, 158].

Манипуляторы с открытой структурой часто не удовлетворяют кинематической и динамической точности позиционирования, особенно при высоких скоростях перемещения груза вследствие остаточных колебаний конструкции, манипуляторы с замкнутой кинематической структурой этими недостатками не обладают.

В Волгоградском государственном аграрном университете в сотрудничестве с промышленными предприятиями разработана серия грузоподъемных устройств, отличающиеся повышенной степенью унификации деталей и узлов, невысокой металлоемкостью, возможностью быстрого навешивания на штатную навеску сельскохозяйственных тракторов (рисунок 1.1).

Основу конструкции таких грузоподъемных устройств составляют механизмы параллельной структуры [30] - подвижные трехстержневые пространственные механизмы, имеющие форму тетраэдра (треугольной пирамиды или трипода). Изменение длин цилиндров, соединенных посредством шарнира специальной конструкции, позволяет осуществлять перемещение точки их сочленения в различных направлениях, обеспечивая высокую жесткость конструкции. Цилиндры являются опорой и единственным средством для подъема (опускания) стрелы в вертикальной плоскости - изменения вылета стрелы и ее разворота на угол до $\pm 80^\circ$ в горизонтальной плоскости.

Авторами разработок являются: Пындак В.И., Герасун В.М., Строков В.Л., Рогачев А.Ф., Тепляков Ю.П., Худяков Л.Н., Удовкин А.И., Лапынин Ю.Г. и др. [8, 34, 24, 105, 113, 128, 137].

Для навесных погрузочных манипуляторов на основе треугольной пирамиды известны системы командно-копирующего управления, разработанные Гайворонским В.А. (рисунок 1.10), Герасуном В.М., Глазуновым В.А., Несмияновым И.А. (рисунок 1.11 и 1.12) и другими учеными, но они существуют в качестве опытных образцов [10, 27, 45, 47, 90, 91, 93, 94, 96, 106, 151, 157].

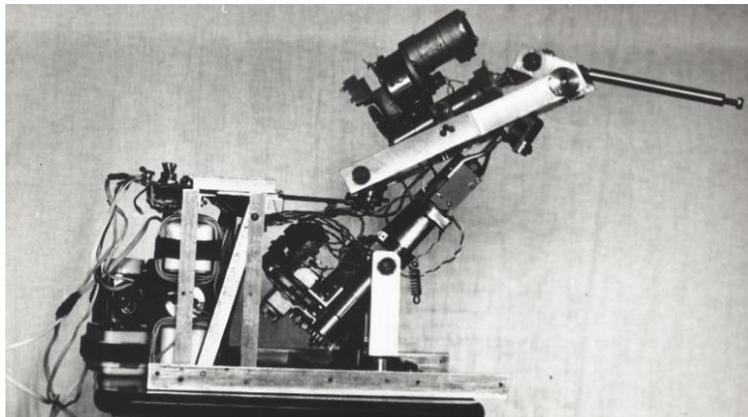


Рисунок 1.10 – Пульт управления манипулятором неполнопараллельной структуры

Как известно, управление механизмами параллельной структуры (гексаподами, триподами и т.п.) представляет сложную задачу, заключающуюся не только в обеспечении управления каждой отдельной секцией, но и всей конструкцией, обеспечивая ее заданную конфигурацию в пространстве. В работе [54] предлагается использовать мультиагентный подход к управлению такими механизмами.

Традиционное управление каждой степенью подвижности (звеном манипулятора) осуществляется при помощи самостоятельной рукоятки гидрораспределителя. Основная трудность управления погрузочными манипуляторами с пространственным исполнительным механизмом параллельно-последовательной структуры, как например манипуляторами НПМ-0,6 и НПМ-

0,8, заключается в сложности координации перемещения органов управления, согласования движений оператора с пространственным положением рабочего органа машины при одновременном выполнении условий точности и быстродействия. Недостаточная скоординированность управляющих воздействий увеличивает суммарное время цикла и длину траектории перемещения рабочего органа. Улучшить эти показатели эффективности управления манипулятором можно, если оператор будет управлять не каждым звеном в отдельности, а задавать направления перемещения собственно рабочего органа [137]. Одним из вариантов решения этой проблемы является управление гидроцилиндрами от одной рукоятки.

Другая система дистанционного электрогидравлического командного управления погрузочным манипулятором от одной рукоятки, разработанная в ВолГАУ, представлена на рисунке 1.11. Она состоит из электрогидрораспределителей 1, 2 управления силовыми цилиндрами стрелы 4, 5 и электрораспределителем 3 управления цилиндром рукоятки 6. Рабочая жидкость подается к распределителям от насосной станции 7.

Пульт управления 8 электрогидрораспределителями представляет рукоятку 9, шарнирно укрепленную на основании, и кнопок 10, 11, 12, 13, расположенных симметрично относительно рукоятки и кинематически связанных с ней. В рукоятку 9 встроены две кнопки 14 и 15 управления электрогидрораспределителем 3. Кнопки 10, 11, 12, 13 расположены относительно рукоятки таким образом, что возможно замыкание их контактов поочередно или одновременно два соседних. Это позволяет производить перемещение стрелы в направлениях «подъем» (движение рукоятки на себя), «опускание» (рукоятку – от себя), «подъем-поворот» и «опускание-поворот» (рукоятку – от себя по диагоналям), причем совмещение операций подъема или опускания с поворотом возможно влево и вправо (таблица 1.1). При этом независимо от направления движения стрелы или нахождения ее в покое встроенными в рукоятку 9 кнопками 14 и 15 можно управлять рукоятью манипулятора. Питание электромагнитов распределителей осуществляется от аккумуляторной батареи.

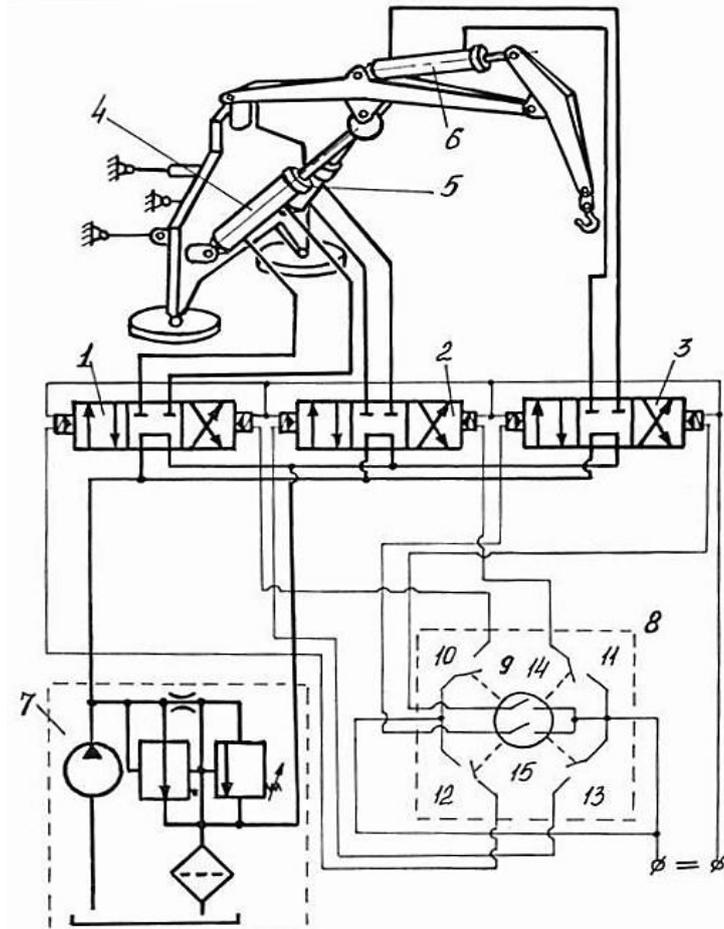


Рисунок 1.11 – Вариант системы дистанционного электрогидравлического управления манипулятором

Таблица 1.1

Матрица возможных управляющих воздействий на манипулятор посредством пульта управления типа «джойстик»

Действие	Положение контактов (1–замкнут, 0–разомкнут)			
	10	11	12	13
Подъем	1	0	1	0
Опускание	0	1	0	1
Поворот влево	1	1	0	0
Поворот вправо	0	0	1	1
Подъем с поворотом вправо	0	0	1	0
Подъем с поворотом влево	1	0	0	0
Опускание с поворотом вправо	0	0	0	1
Опускание с поворотом влево	0	1	0	0
Стоп	0	0	0	0

Описанная система управления погрузочными манипуляторами и подобными им машинами повышает удобство управления и снижает утомляемость оператора [93]. Пульт управления (рисунок 1.12), выполненный в виде джойстика, уместается в руках, и оператор может находиться в удалении от рабочего органа или в непосредственной близости к нему.

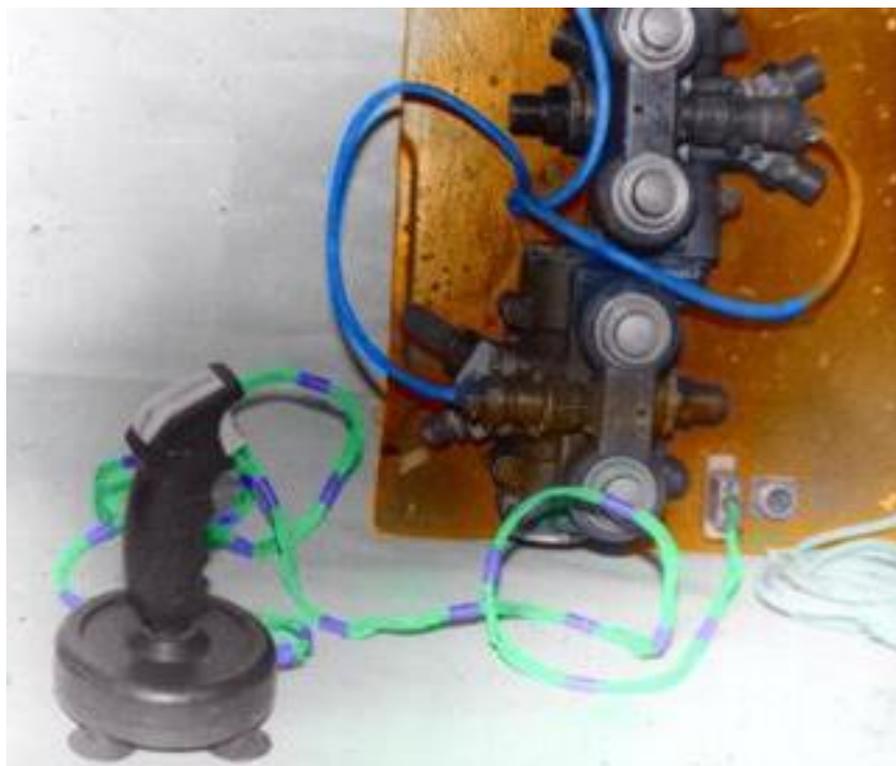
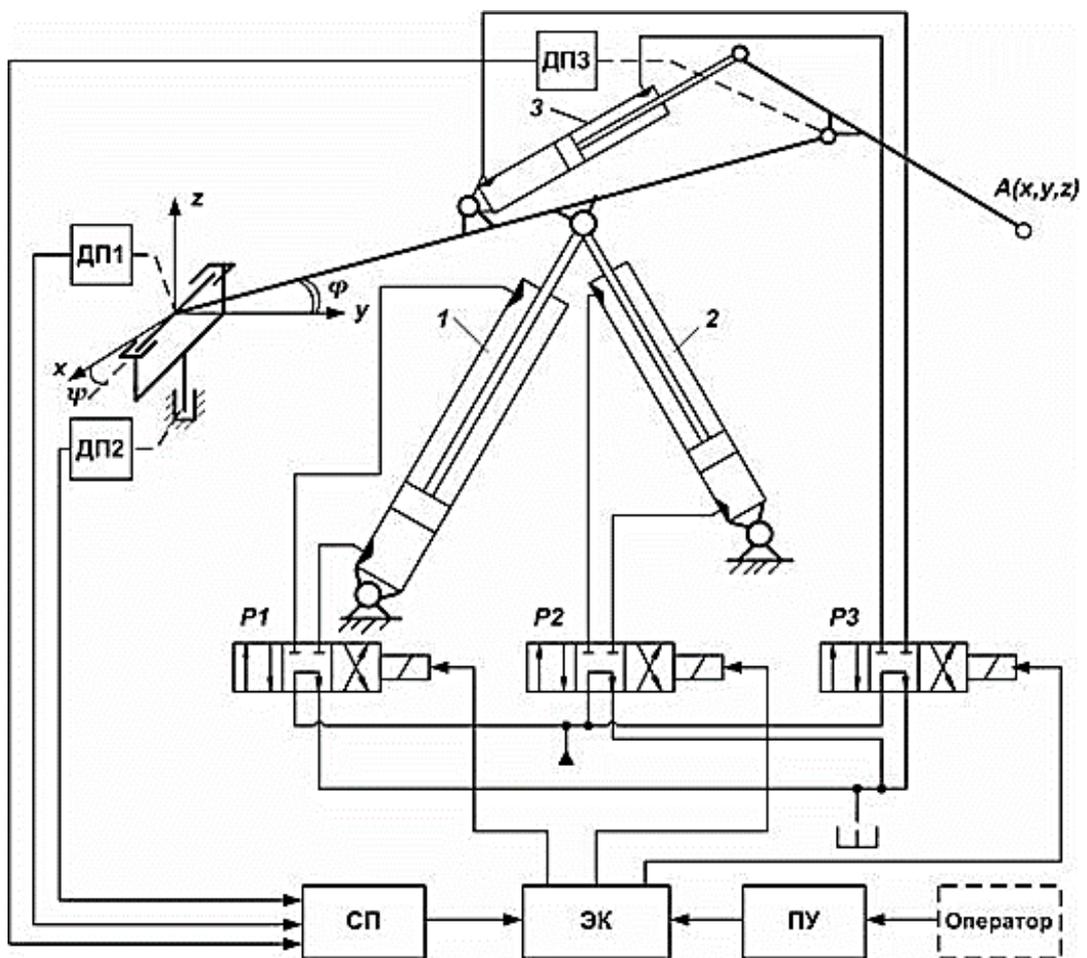


Рисунок 1.12 – Пульт управления манипулятором типа «джойстик» и блок электрогидрораспределителей

Представленная система управления является системой прямого управления. Проведенные ранее эксперименты показали, что эффективным средством для существенного повышения производительности манипулятора является оснащение специальными системами управления, которые позволяют совместить рабочие операции, облегчить сам процесс управления [29, 49, 89, 92, 93, 94].

На рисунке 1.13 представлена система управления рабочим оборудованием манипулятора параллельно-последовательной структуры с системой позиционирования. Перемещение грузонесущей стрелы по координатам φ и ψ

обеспечивают звенья переменной длины 1 и 2, которые расположены под углом друг к другу и образуют пространственную структуру в виде трехгранной пирамиды непараллельного механизма. Как отмечалось выше, управление перемещением т. A создаёт определенные трудности так, как у оператора в этом случае отсутствует характерное для управления плоскими механизмами, представление о взаимном соответствии координат груза (места захвата и выгрузки) и координат, определяющих положение т. A , а также направление ее движения при включении приводов.



ПУ – пульт управления; ЭК – блок электронных ключей; СП – система позиционирования; P_1, P_2, P_3 – электрогидрораспределители; 1, 2, 3 – исполнительные цилиндры; ДП1, ДП2, ДП3 – датчики положений

Рисунок 1.13 – Система прямого управления манипулятором

Система прямого управления манипулятором в данном случае состоит из пульта управления (ПУ), блока электронных ключей (ЭК), системы позиционирования (СП), электрораспределителей $P_1, P_2 \dots P_N$ и соответствующих исполнительных цилиндров $1, 2, 3 \dots N$, а также датчиков положений $ДП_1, ДП_2 \dots ДП_N$.

Для перемещения грузозахватного устройства манипулятора сигнал от пульта управления поступает на электронные ключи (ЭК), управляющие электромагнитами распределителей $P_1, P_2 \dots P_N$. Управление возможно как всеми цилиндрами одновременно, так и дискретно, каждым цилиндром в отдельности.

При достижении манипулятором крайнего положения, либо положения заранее заданного оператором, сигнал от датчика $ДП_i$ с логическим состоянием «1» поступает в систему позиционирования (СП), которая переводит соответствующий электронный ключ, управляющий распределителем P_i , в логическом состоянии «0» и движение манипулятора в данном направлении прекращается.

Для ограничения зоны манипулятора, при выполнении конкретных технологических процессов, датчики положений настраиваются соответствующим образом. Ограничение зоны действия т. А манипулятора необходимо при работе в складских помещениях, ангарах во избежание повреждаемости окружающих предметов при ошибке оператора. Датчики положений звеньев (ДП) и систем позиционирования (СП) может быть настроены для автоматического возврата грузозахватного устройства манипулятора в заданное положение по окончании технологической операции.

Эффективным средством для существенного повышения производительности манипулятора является оснащение автоматизированными системами управления, которые позволяют выполнять повторяющиеся однообразные рабочие операции без участия оператора (например, автоматический возврат грузозахватного устройства манипулятора в заданное положение по окончании технологической операции, перевод рабочего

оборудования в транспортное положение), облегчить сам процесс управления и как результат – уменьшить утомляемость оператора.

1.4. Управление погрузчиками и манипуляторами как человеко-машинными системами

В любом производстве большая доля погрузочно-разгрузочных работ приходится на затаренные и штучные грузы посредством погрузочных манипуляторов, которые управляются человеком-оператором. В последнее время все чаще оптимальным решением становится комбинация ручного и автоматизированного управления погрузчиком. Система управления должна включать в себя в качестве элементов как технические системы, так и людей, взаимодействующих с этими системами.

Эргатические системы управления рассматривают работу человека-оператора вместе с управляемым приводом манипулятора в качестве единой биотехнической системы. Такие системы непосредственно включают человека в управление техническим объектом [121] и ориентированы на его психофизические особенности.

Большинство погрузочных манипуляторов и погрузчиков не оснащаются эргатическими системами управления. Причин здесь несколько: 1) большинство погрузчиков – фронтальные, со степенью подвижности не более трёх, а оснащать такие погрузчики современными средствами управления нет смысла, управление логически понятно даже малоопытному оператору; 2) погрузочные манипуляторы, производимые в России и странах СНГ со степенью подвижности 3 и более не оснащаются серво-двойстиком из-за недостаточно разработанной научно-практической базы в этой области, покупка же зарубежных патентов обходится довольно дорого.

Из всех рассмотренных погрузчиков и манипуляторов, применяемых в промышленности, только около 18% оснащены электронными датчиками грузоподъемности и системами безопасной эксплуатации – в подавляющем

большинстве это зарубежные погрузчики и манипуляторы [66]. Причем, даже если модель погрузчика может оснащаться системами оповещения нестандартных и предаварийных ситуаций, дополнительными опциональными средствами мониторинга технологического процесса и другими приспособлениями, то российский покупатель, чаще всего, не желает переплачивать за эти системы.

1.4.1. Основные структуры систем управления погрузочными манипуляторами

Погрузочные манипуляторы можно рассматривать как динамическую систему, которая представлена совокупностью более простых динамических звеньев, соединенных между собой определенным образом. Схему соединения динамических звеньев, входящих в систему, называют структурной схемой. При построении математической модели системы, разделение ее на звенья обычно обусловлено разнородным характером элементов, которые входят в состав реальных сложных систем. Методика нахождения дифференциального (или разностного) уравнения для каждого из этих элементов может быть весьма специфичной. Поэтому сперва делают математические модели отдельных элементов и потом используют их при составлении общей модели всей системы, учитывая способы соединения звеньев между собой [65].

Наиболее совершенным и широко известным принципом управления манипуляторами с участием человека-оператора, является копирование. Этот метод управления заключается в том, что управление манипулятором производится с помощью рукоятки управления, геометрически подобной рабочему оборудованию манипулятора. Перемещение конца рукоятки под воздействием оператора с определенной степенью точности воспроизводится в заданном масштабе грузозахватным устройством [29].

Например, при использовании копирующей системы с силовой обратной связью Kraft для управления машиной Brokk 180 (рисунок 1.17), оператор получает возможность дистанционно контролировать одновременно восемь

гидравлических клапанов машины одной рукой. При использовании копирующего управления машина откликается на движения руки оператора, позволяя даже при отсутствии опыта и навыков управления выполнять самые сложные задания легко и уверенно.



Рисунок 1.17 – Копирующая система управления Kraft

На рисунке 1.18 представлена функциональная схема системы позиционно-силового управления погрузочным манипулятором с помощью задающей рукоятки (ЗР) - джойстика.

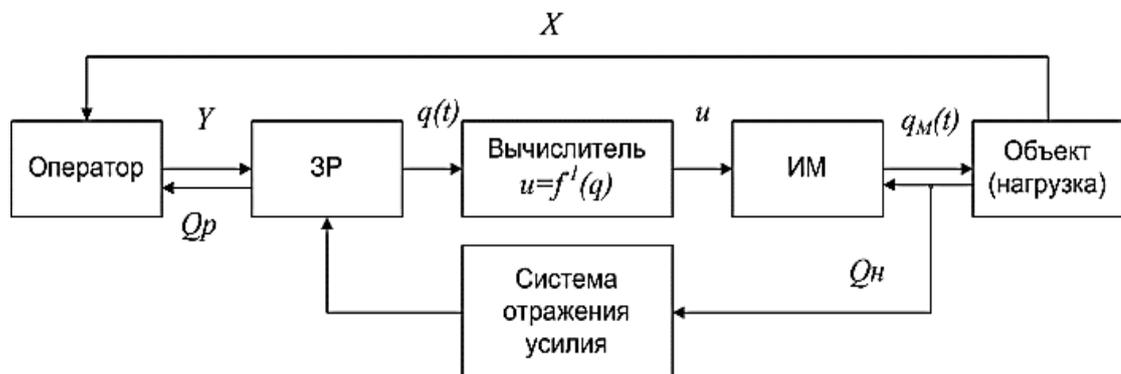


Рисунок 1.18 – Функциональная схема системы позиционно-силового управления (ЗР - задающая рукоятка, ИМ - исполнительный механизм)

Перемещение рукоятки ЗР задаёт обобщённые координаты $q(t)$, по которым вычислитель определяет задания приводам $u=f^1(q)$, обработку которых выполняет исполнительный механизм (ИМ), в данном случае манипулятор, перемещая груз по заданной траектории или в заданное положение по координатам $q_M(t)$. Система отражения усилия формирует силу сопротивления перемещению $Q_P = J^T(Q_H)$ задающей рукоятки ЗР пропорционально нагрузке Q_H на звенья манипулятора (J – матрица Якоби) [84].

Немного другая ситуация возникает при синтезе системы в соответствии с каким-либо критерием, позволяющим выяснить, при какой передаточной функции системы ее функционирование происходит наиболее успешно. Решение задачи синтеза имеет практический смысл по отношению к тем системам, передаточную функцию которых можно разумно изменять [53]. Такое изменение обычно обеспечивается включением в состав системы динамических звеньев со специально подобранными свойствами в дополнение к уже имеющимся звеньям, которые соответствуют так называемой постоянной части системы. При выполнении коррекции системы существенны не только ее желаемая передаточная функция $H(p)$, найденная в результате синтеза, но и внутренняя структура. В зависимости от структурной схемы системы и от места включения корректирующего звена изменяются его требуемые динамические свойства [134].

1.4.2. Особенности разработки и исследования человеко-машинных систем управления

Для эффективного функционирования человеко-машинных (эргатических) систем необходимо выбирать рациональные способы взаимодействия людей с техникой на основании выводов эргономики [87].

Особенности управления человеко-машинной системой состоят в том, что психофизиологические свойства человека-оператора должны быть включены в параметры (свойства) управляющей системы.

Закон управления для таких систем также может быть спроектирован заранее с гарантией качества управления, как и в технических системах. Если функционирование системы управления происходит в условиях неопределенности, то качество управления обеспечивается качеством работы человека-оператора.

Разработка человеко-машинной системы подразделяется на четыре этапа:

- 1) Планирование технической составляющей системы;
- 2) Планирование «человеческой составляющей»;
- 3) Планирование внутрисистемного интерфейса;
- 4) Определение свойств системы управления в процессе её работы.

По мере усложнения систем управления все ощутимее становятся потери от несоответствия характеристик технических средств возможностям человека. Основные трудности связаны не только с улучшением технических и программных средств, но и с недостаточным развитием методов учета человеческого фактора при создании и эксплуатации сложных человеко-машинных систем.

Нужно обратить внимание на следующие инженерно-психологические проблемы, которые требуют решения в процессе создания и эксплуатации сложных систем управления.

Первая проблема - компенсация ошибочных (в первую очередь непреднамеренных, но также и преднамеренных) действий человека, которые могут полечь за собой негативные последствия для функционирования системы управления. Здесь должны быть учтены: забывчивость оператора, возможность его ошибки, непостоянство внимания и другие факторы.

Если решение, принятое человеком, может привести систему в аварийный режим (контроль при этом осуществляет сама система), то это решение оператора не должно восприниматься и об этом система должна сигнализировать оператору.

Подобные действия в состоянии выполнять лишь сложная система с хорошо развитыми средствами интеллектуальной поддержки операторов.

Вторая проблема - формализация психологических аспектов мыслительной деятельности человека в процессе выработки решений по реализации какой-либо задачи и учет их в системах искусственного интеллекта (ИИ), формирующих соответствующие решения.

Проблема формализации основных схем поведения и психологических характеристик человека-оператора связана с попытками создания математических моделей деятельности человека. Это обусловлено прежде всего необходимостью создания единого языка описания функционирования системы в целом, причем принято считать, что разработка математических моделей деятельности является одним из перспективных путей решения этой проблемы.

Вместе с тем в процессе проектирования деятельности подчас целесообразно автоматизировать те или иные функции человека-оператора, т.е. поручить выполнение их техническим средствам, носящим в себе черты модели, соответствующей деятельности человека.

Для всех систем, за исключением простейших, истинное явление можно описать с помощью уравнений лишь приближенно. Это обусловлено тем, что мы не знаем всех факторов, влияющих на систему, или получаем слишком громоздкие уравнения, которые современными средствами решать весьма сложно. Обычно рассматривается небольшое число аспектов поведения человеко-машинных систем управления.

Основной принцип построения моделей заключается в том, что результаты, получаемые с помощью моделей, должны соответствовать экспериментальным данным и, кроме того, модель должна давать возможность получать новую информацию о системе или объекте.

Третья проблема - определение "границ возможного" в деятельности человека и возможностей техники для оптимального распределения функций между ними.

Пределы функционирования сложных систем определяются условиями и воздействиями, приводящими к срыву деятельности. В этом смысле срыв операторской деятельности является одной из глобальных проблем, стоящих

перед проектировщиками сложных человеко-машинных систем управления. Цель проектирования, прежде всего, состоит в том, чтобы избежать, исключить возможность аварий (прекращения деятельности) современных систем, которые неотвратимы при срыве деятельности человека-оператора.

Степень согласованности характеристик технических средств с психофизическими характеристиками человека-оператора определяет эффективность деятельности. Срыв деятельности характеризуется нулевой и даже отрицательной эффективностью. Он может наступить, например, при повышении темпа поступления информации.

Четвертая проблема - формализация основной последовательности деятельности человека в зависимости от сложившейся ситуации и предложение человеку-оператору лучшей (по какому-то критерию) из них.

Пятая проблема - определение психологических характеристик человека и их диапазонов для обеспечения комфортного общения человека и техники, использование современных технологий и техники для уменьшения потребности адаптации людей к системе.

Современные средства взаимодействия человека и техники представляют собой сложный комплекс, включающий различные компоненты: планирование, информирование и управление общением; формализацию облика информации, интерпретацию сообщений; представление, обработку данных и принятие решения; обеспечение надежности и др.

Основной тенденцией перспективного развития и совершенствования средств взаимодействия является создание адаптивных интеллектуальных систем, учитывающих целесообразное распределение нагрузки между искусственным интеллектом ЭВМ и интеллектом человека.

При разработке сложных человеко-машинных систем управления наиболее ответственным этапом является процесс принятия решения о целесообразности того или иного нововведения и обоснованного выбора направлений и методов предпроектных исследований. Основной целью деятельности на этом этапе является снижение неопределенности и степени риска, связанных с внедрением

дорогостоящих нововведений, направленных на изменение человеко-машинных систем управления на всех стадиях ее жизненного цикла и приводящих при этом к разнообразным последствиям в различных видах окружения этой системы [72, 73, 146].

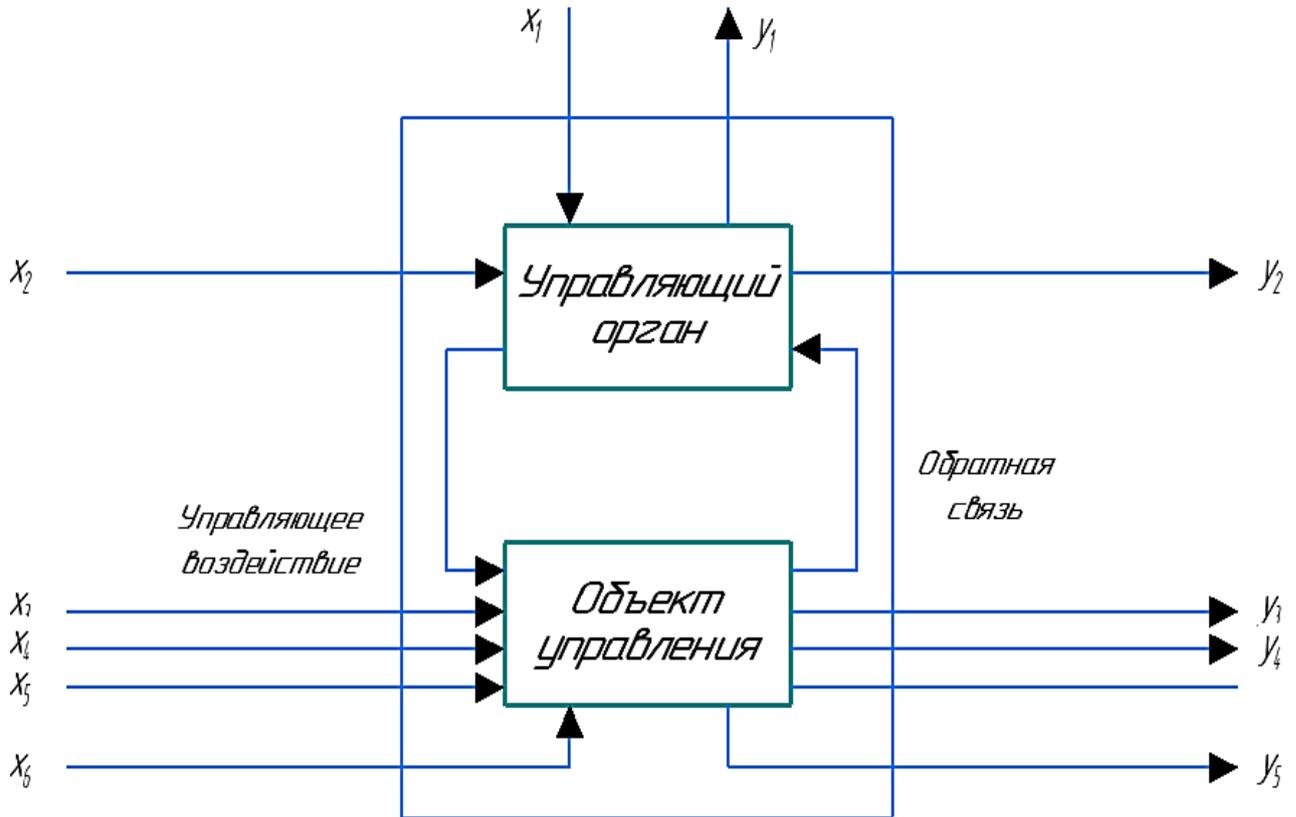
Технологические особенности производства накладывают существенные ограничения на внедрение средств робототехники, в том числе и манипуляторов [19, 50, 63, 81, 118, 135, 139, 147]. Например, производство сельскохозяйственной продукции, как растениеводческой, так и животноводческой происходит чаще всего в неопределённых временных режимах и при различных объёмах и качестве продукции. Полученный урожай овощей на разных полях одного хозяйства может отличаться в широких пределах. Автоматизация погрузки продукции одним и тем же робототехническим комплексом в этих условиях требует либо применения адаптивных систем управления и контроля, либо перенастройки роботизированного погрузочного агрегата [31, 52, 138]. В обоих случаях это приводит к удорожанию или конструкции, или обслуживания агрегата.

Следует также отметить, что тенденция к увеличению степеней подвижности погрузочного манипулятора ведёт к усложнению системы управления им. Поэтому для погрузочных манипуляторов со степенью подвижности рабочего органа более трёх необходимо использование эргатических систем управления.

В управлении погрузочными манипуляторами важная роль отводится оператору, используются его интеллектуальные возможности в системе управления. При эксплуатации машин возникает объективное противоречие, заключающееся в том, что человек-оператор не может полностью использовать технические возможности, заложенные в конструкции машины. Разрешить эти противоречия можно применением систем полуавтоматического управления, выполняющих функцию оператора по управлению рабочим процессом и оставляющих ему директивы функции [122].

В общем понятие «система управления» входит совокупность элементов, взаимосвязанные функции которых координированы для выполнения некоторой

общей задачи (рисунок 1.19). Эргатические системы (ЭС) чрезвычайно разнообразны и иерархичны.



X_i, Y_i – входы и выходы системы соответственно

Рисунок 1.19 – Обобщенная блок-схема эргатической системы управления

Важнейший вопрос проектирования таких систем представляет собой строго научное разделение функций между оператором и машиной в будущей системе. Это обязан сделать конструктор-разработчик, обладающий знаниями эргономики, знающий возможности оператора в системе, уровень современной автоматики и реализующий общие требования на систему.

При разработке человеко-машинных систем необходимо применять системный подход, а именно:

а) выяснять взаимосвязи и свойства совокупности объектов, входящих в систему, в том числе и оператора;

б) создавать и применять такие системы, которые давали компромиссы между «машиной» - оператором – средой для оптимизации основной целевой

функции всей системы («получить оптимальную систему из всех оптимальных звеньев невозможно»);

Несмотря на совместное выполнение функций оператором и «машиной», каждая из таких составляющих ЭС подчиняется в своей работе собственным, свойственным ей принципам и закономерностям;

Необходимо помнить, что оператор «не любит крайностей»: ему плохо работается как при дефиците, так и при избытке времени (информации), как при ярком освещении, так и в темноте и т. д.

Система должна быть сконструирована так, чтобы оператор мог непрерывно принимать участие в её функционировании на уровне, соответствующем его возможностям (низкий уровень интереса к работе и морального состояния оператора может быть связан с двумя причинами: когда аппаратура требует высокой квалификации от низкоквалифицированного оператора и, наоборот, низкой квалификации от высококвалифицированного оператора);

Максимальная автоматизация не всегда полезна; думающий оператор занимает центральное место в системе; поэтому задача состоит в том, чтобы показать, что система поддается высокой автоматизации, а в том, чтобы доказать, что она нуждается в ней; машина служит не для вытеснения и замены оператора, а для умножения его мощи и способностей.

Эффективным средством для существенного повышения производительности манипулятора является оснащение автоматизированными системами управления, которые позволяют выполнять повторяющиеся однообразные рабочие операции без участия оператора (например, автоматический возврат грузозахватного устройства манипулятора в заданное положение по окончании технологической операции), облегчить сам процесс управления и как результат – уменьшение утомляемости оператора.

Важную роль в проектировании эргатических систем играют методы виртуального моделирования и проектирования [74, 132].

Выводы по главе

Выполнен анализ приводов и систем управления погрузчиками, погрузочными манипуляторами с ангулярной зоной обслуживания и манипуляторами параллельной структуры. Электромеханический привод может стать альтернативой гидравлическому приводу в погрузочных манипуляторах, что позволит расширить возможности управления перемещением груза. Из проведенного анализа систем управления было выявлено, что наиболее совершенным и широко известным принципом управления манипуляторами с участием человека-оператора является копирование. Поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

2. ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ И РЕАЛИЗАЦИЯ КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Уровень совершенства погрузочных манипуляторов может быть оценен такими показателями как грузоподъемность, зона обслуживания, маневренность, точность позиционирования, удобство управления и т.д.

Простота и доступность выполнения движений манипулятора во многом зависит от выбранной системы управления, поэтому при разработке конструкции манипулятора серьезное внимание должно уделяться выбору системы управления. Учитывая специфику работ на погрузочно-разгрузочных операциях, в экспериментальных и недетерминированных условиях, связанных с опасным для здоровья человека факторами, для управления манипулятором-триподом предпочтительна дистанционная система с ручным управлением.

Интеллект человека, его способность быстро ориентироваться в обстановке с непредвиденными обстоятельствами делают метод дистанционного управления более предпочтительным в условиях погрузочно-разгрузочных работ [69, 155]. Поэтому считаем, что наличие человека-оператора в контуре предлагаемого манипулятора позволяет сделать его более универсальным, более гибким. В свою очередь наличие человека-оператора в системе управления предъявляет целый ряд специфических требований, одним из которых является удобство и естественность работы оператора в процессе управления. В связи с этим пульт управления предлагается поместить в кабине водителя возле подлокотника. С этой точки оператор может наблюдать за условиями рабочей зоны, непосредственно участвуя в погрузочно-разгрузочных работах.

Таким образом, в управлении манипулятором важная роль отводится оператору, используя его интеллектуальные возможности в системе управления.

Процесс погрузки и разгрузки грузов включает следующие основные операции:

- захват груза;

- подъем груза;
- перемещение груза в определенное место;
- опускание груза;
- освобождение захвата.

Выполнение этих операций зависит от условий, в которых они выполняются, удачного решения конструкции погрузочного средства и его системы управления.

Погрузочный манипулятор-трипод управляемый человеком-оператором более универсален и может использоваться на погрузочно-разгрузочных операциях с контейнерами, мешками, тюками и другим штучным грузом, для работы в стесненных условиях, ангарах, цехах, складских помещениях.

Особая потребность в таких манипуляторах возникает в связи с внедрением контейнерной перевозки промышленных и сельскохозяйственных грузов. Так, например, для контейнеров с сельскохозяйственными грузами желательно иметь устройство грузоподъемностью до 1 т. Последнее обусловлено тем, что по условиям сохранности грузов масса продукта в контейнере находится в пределах от 400 до 700 кг [35].

Высокая жесткость конструкции манипулятора-трипода позволяет исключать колебания и раскачку груза вследствие малой податливости всего пространственного механизма.

На рисунке 2.1 показана технология уборки продуктов с использованием контейнеров, выгрузку которых в кузов транспортного средства осуществляет погрузочный манипулятор-трипод.

Специализированное транспортное звено, в состав которого входит трактор-погрузочный манипулятор (рисунок 2.2), позволяет механизировать производственные процессы. Кроме того, имеется большое количество разовых погрузок, причем расстояние между пунктами погрузки-выгрузки бывает значительным. Сюда можно отнести погрузку запчастей, деталей узлов сельскохозяйственной техники в цехах, металлолома на складах, выполнение ремонтных (рисунок 2.3) и технологических работ на производстве и различных

отраслях хозяйства, погрузочно-разгрузочные работы для обслуживания техники, для стесненных условий работы и т.п.

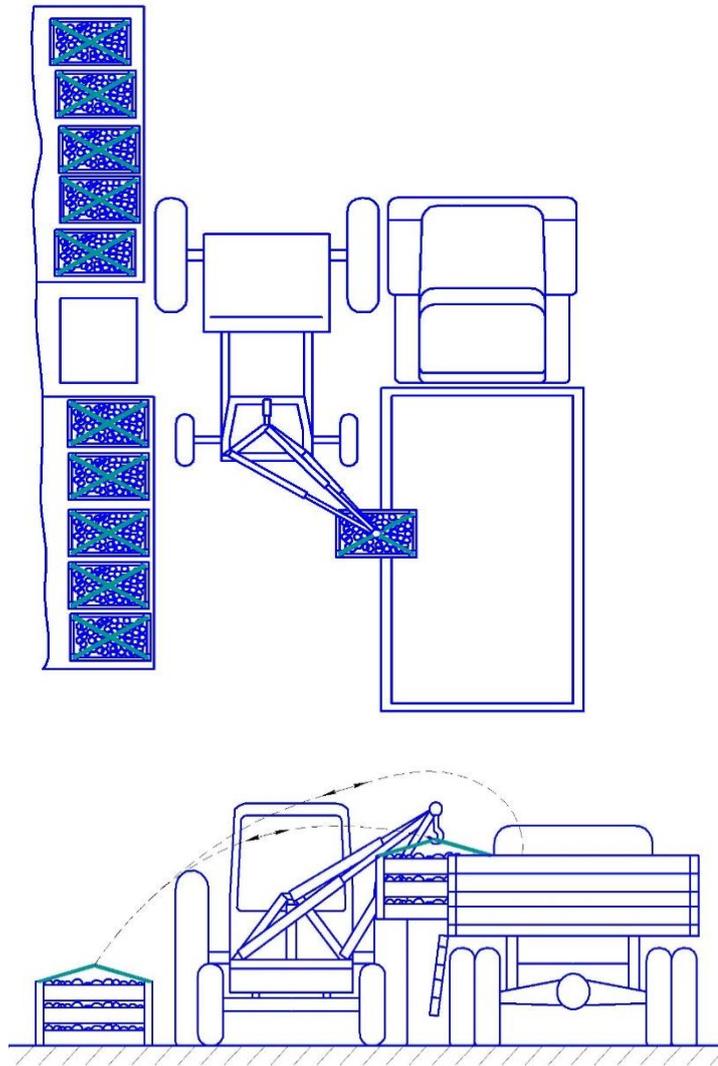


Рисунок 2.1 – Технологическая схема погрузки продуктов с использованием контейнеров

Также манипулятор может найти применение в строительстве, коммунальном хозяйстве. В условиях строительства многие изделия перемещаются с разгрузкой и последующей раскладкой их по трассе.

Использование тракторного транспортного агрегата (рисунок 2.4) позволяет заменить специализированное дорогостоящее подъемно-транспортное оборудование в таких технологических процессах, как многократная погрузка-выгрузка и укладка, например, асбестоцементных трубопроводов со стыковыми

соединениями, полиэтиленовых труб, гофрированных дренажных труб из полиэтилена и поливинилхлорида.

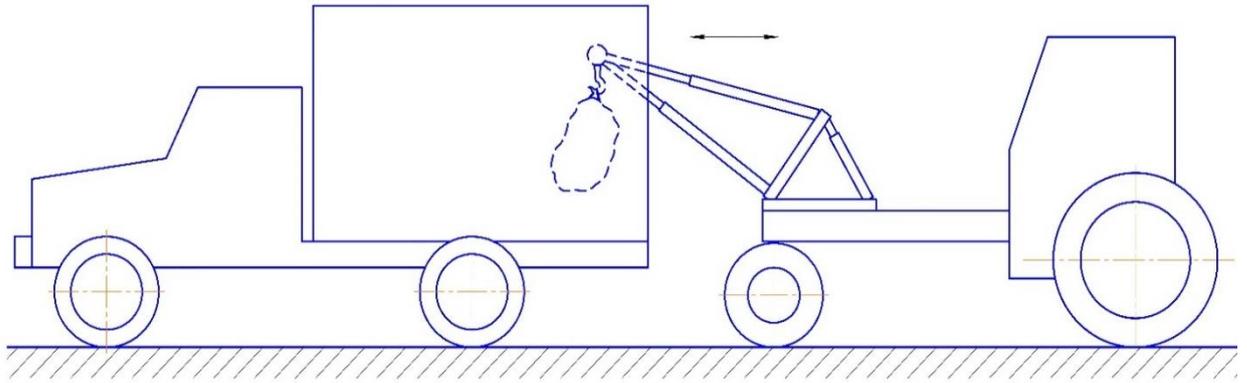


Рисунок 2.2 - Погрузочно-разгрузочные работы в стесненных условиях

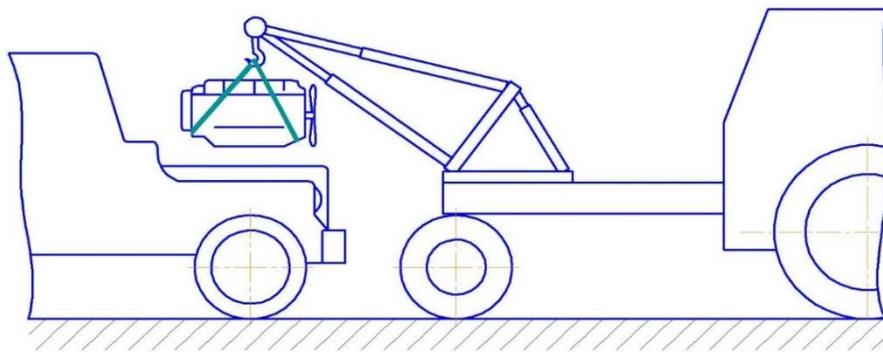


Рисунок 2.3 – Использование манипулятора в ремонтных работах

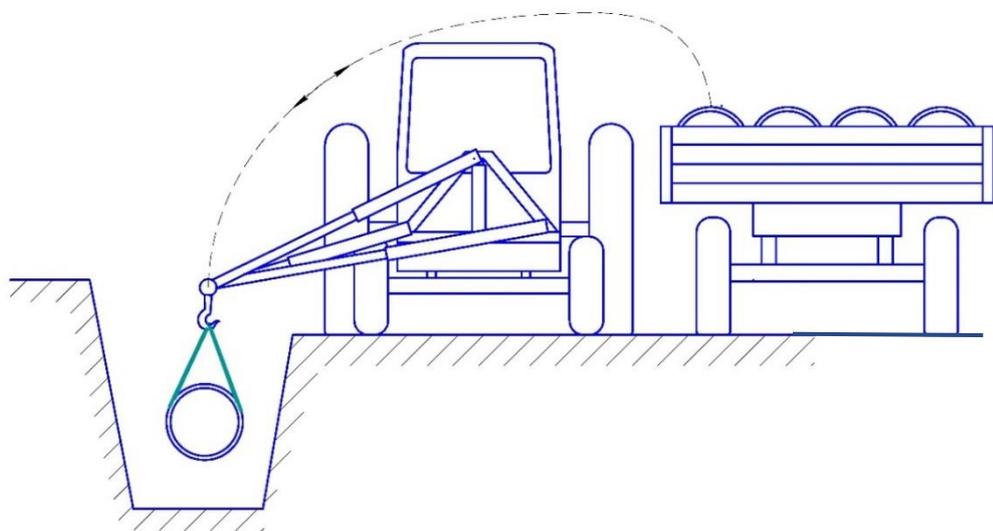


Рисунок 2.4 – Применение манипулятора в строительстве

2.1. Формализация технологических процессов и планирование траекторий перемещения груза

Описание технологических процессов погрузки-разгрузки контейнеров возможно с помощью графов, например, с применением сетей Петри [108].

Погрузочно-разгрузочные работы можно разделить на два типа операций:

- захват груза и перенос его в пространстве с обеспечением заданной ориентации;
- установка грузов в строгом порядке в соответствии с другими грузами (штабелирование).

Формализованное представление технологического процесса погрузки контейнеров можно представить в виде графа (рисунок 2.5).

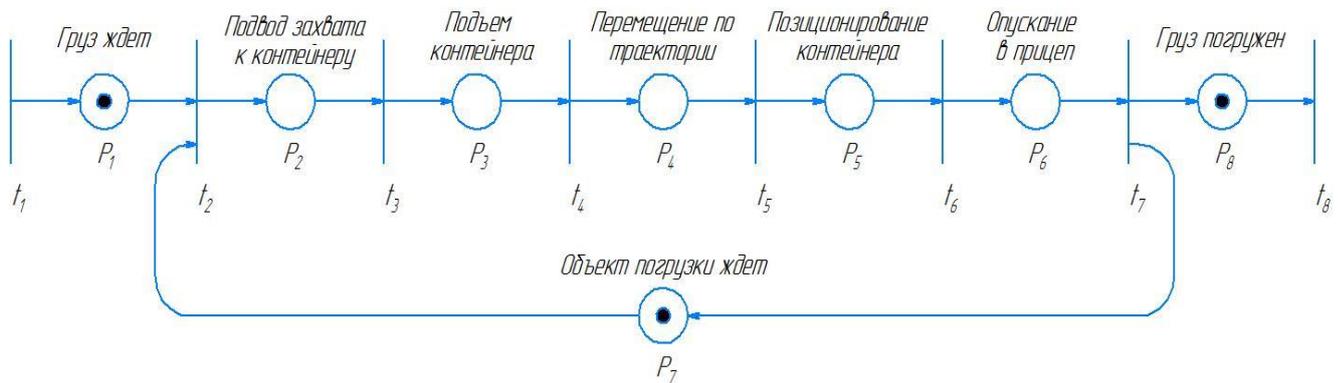


Рисунок 2.5 – Формализованное представление технологического процесса погрузки контейнеров

Время погрузки одного контейнера складывается из нескольких временных интервалов

$$t_K = t_1 + t_2 + \dots + t_8, \quad (2.1)$$

где t_1 - время загрузки контейнера; t_2 - время захвата контейнера; t_3 - время отрыва и подъема контейнера; t_4 – время перемещения контейнера к точке погрузки; t_5 – время позиционирования контейнера и ожидание окончания раскочки; t_6 – время

опускания (в прицеп); t_7 - время освобождения захвата от контейнера; t_8 – время перемещения захвата к новому контейнеру.

Для увеличения производительности погрузочных работ, контейнера перед началом погрузки должны быть загружены, т.е. $P_i = I$ – математическое ожидание. Тогда время погрузки одного контейнера

$$t_K = t_2 + t_3 + \dots + t_8. \quad (2.2)$$

На производительность в значительной степени будет влиять и время на перемещение контейнеров t_4 , и время холостого позиционирования t_8 .

Общее время загрузки прицепа контейнерами

$$T = t_K \cdot n, \quad (2.3)$$

где n -число контейнеров, вмещающихся в прицеп.

Функция математического ожидания погрузки груза определяется как

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (2.4)$$

где P_i – математическое ожидание i -ой операции.

2.1.1. Задачи планирования траекторий

Требования к выполнению технологических процессов погрузки-разгрузки и перемещения грузов определяют способы построения траекторий и законы перемещения по траекториям с учетом структурной схемы и параметров исполнительных приводов погрузочного манипулятора. Технологические процессы грузопереработки контейнеров и штучных грузов формируют требования и к системам управления погрузочных манипуляторов.

Решение задачи позиционирования рабочего органа погрузочного манипулятора основывается на свойствах конструкции и геометрических особенностях зоны обслуживания [126, 127, 142].

Управление погрузочным манипулятором является комплексной задачей, включающей планирование и синтез траекторий, решение задачи

позиционирования груза, задание и реализация закона перемещения груза по траектории [18, 20, 82, 98, 100, 101, 141].

Определение конфигурации манипулятора в начальной и конечной точках является первоочередной задачей планирования траекторий захватного устройства. Одним из способов планирования траекторий в декартовом пространстве является способ задания траектории в виде последовательности прямолинейных участков с узловыми точками. Такая траектория может быть сглажена при использовании кубических сплайнов. Планирование траекторий захвата манипулятора значительно упрощается при наличии решения прямой и обратной задач [33, 76].

Планирование траекторий может осуществляться интерполяцией или аппроксимацией выбранной траектории полиномами и построением последовательности опорных точек для управления манипулятором при перемещении из начального положения в конечное [60, 161].

Построение траектории движения манипулятора на базе кубической сплайн-интерполяции позволяет осуществлять вычисления в реальном масштабе времени с целью минимизации работы [154].

Траекторию движения захвата манипулятора можно разбить на части, с промежуточными узловыми точками, но реализуемая траектория часто отличается от заданной и движение по траектории оказывается неравномерным. Следует отметить, что чем больше промежуточных точек, тем меньше ошибка отклонения от траектории, но медленнее движение захвата по траектории из-за движений в режиме real-time. При таком способе задания движения необходимо точное отслеживание движения по траектории и необходима алгоритмическая реализация малых задержек на контрольных точках. То есть необходимо решение задачи минимизации времени движения по траектории.

При проектировании механизма основной задачей является достижение наилучших показателей качества, то есть используются принципы оптимального проектирования обеспечения наилучших технико-экономических показателей при заданных реальных условиях работы [159]. Оптимальность механизма оценивают

по специальным критериям, поэтому важной задачей является формулировка цели оптимизации, которая математически выражается как требование обеспечения минимума выбранного критерия. В качестве такого критерия могут быть приняты различные технико-экономические показатели (стоимость изготовления и эксплуатации, надежность, качество функционирования и т.п.). Каждый из этих критериев будет являться функцией нескольких переменных при проектировании параметров механизмов, таких как длины звеньев, массы и т.п. Поэтому задача оптимального проектирования в основном будет иметь неоднозначное решение.

Так, например, критерий быстродействия, то есть время приведения механизма в заданное состояние, будет находиться по формуле:

$$\Phi = \int_0^{\tau_{раз}} dt = \tau_{раз}, \quad (2.5)$$

где $\tau_{раз}$ – время разгона механизма, t – время.

Критерий быстродействия применим на отдельных участках траекторий.

Снижение расхода энергии всегда остается на первом месте при проектировании механизмов. Критерий экономичности, который характеризует расход энергии и представляет собой израсходованную за определенное время энергию, определится из уравнения (2.6).

$$\Phi = G = \int_0^{\tau_{раз}} W dt, \quad (2.6)$$

где G – израсходованная энергия, $W(t)$ – текущая мощность.

Минимизация инерционных нагрузок, а соответственно и затрат энергии во время переходных процессов описана в разделе 3.1 через квадратный критерий. Минимизация работы, затрачиваемой за цикл операции рассмотрена в разделе 3.2.

Среднее интегральное отклонение переменной от заданного состояния в переходном процессе, т.е. интегральная оценка точности, может быть найдена из уравнения (2.7).

$$\Phi = \frac{\int_0^{\tau_{раз}} (Y_{зад} - Y(t)) dt}{\tau_{раз}}, \quad (2.7)$$

где $Y(t)$ – величина текущего отклонения оцениваемой переменной, $Y_{зад}$ – заданное конечное состояние переменной.

Интегральный критерий качества Φ_i может быть представлен в виде определенного интеграла, который представляет собой число, оценивающее выбранное качество механизма (уравнение 2.8).

$$\Phi_i = \int_{t_0}^{\tau_i} f(Y, U_i, t) dt, \quad (2.8)$$

где Y – координата состояния системы, U_i – оптимизируемый конструктивный параметр механизма, t_0, t_i – начальное и конечное время.

Переменные Y , которые характеризуют состояние объекта, всегда ограничены, например, длины звеньев (зависят от конструктивных особенностей), максимальная скорость электропривода (зависит от напряжения, частоты тока питания) и т.п.

Поиск идеального решения заключается в выборе таких значений оптимизируемых конструктивных параметров U_i , при которых критерий качества, в зависимости от его смысла, примет минимальное или максимальное значение при соблюдении ограничений.

В работе рассмотрен способ реализации траектории, основанный на управлении скоростями движения каждой степени подвижности манипулятора в момент задания движения к контрольной точке на траектории.

Траектории погрузки контейнера согласно технологическому процессу (рисунок 2.5) можно представить в виде нескольких составных прямолинейных и криволинейных участков (рисунок 2.6).

Перемещение груза возможно по непрерывной траектории $\overset{\cup}{AE}$, но не всегда реализуемо из-за необходимости обхода препятствий (бортов). Возможны варианты перемещения по кусочно-линейным траекториям:

- 1) $\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CE}$ (отрыв и подъем + горизонтальное перемещение + опускание);
- 2) $\overline{AB} + \overline{BE}$ или $\overline{AD} + \overline{DE}$ (отрыв и подъем + перемещение с одновременным опусканием);
- 3) $\overline{AB} + \overset{\cup}{\overline{BE}}$ (отрыв и подъем + перемещение по дуге с одновременным опусканием).

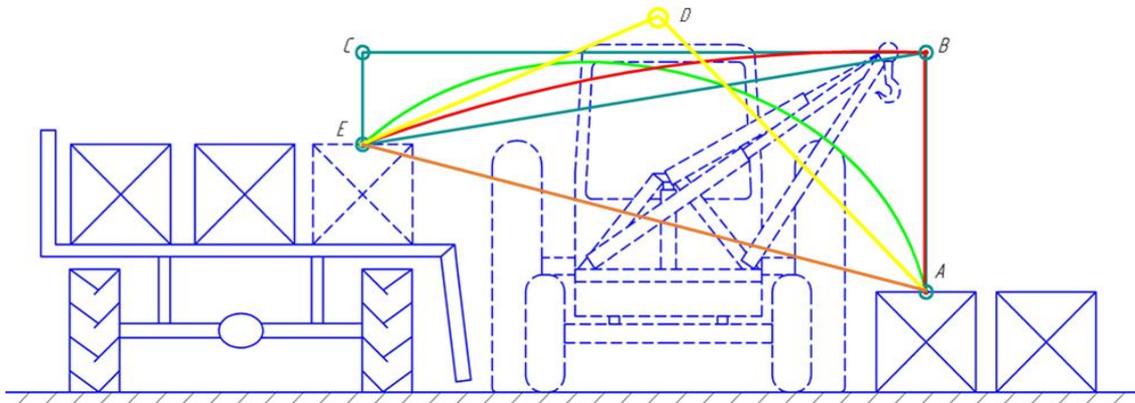


Рисунок 2.6 – Возможные траектории погрузки контейнера

Как видно, при планировании траекторий, часть участков можно представить в виде прямых отрезков. Перемещение по прямой \overline{AE} является наиболее рациональным, хотя и не всегда реализуемым из-за наличия препятствий.

2.1.2. Перемещение груза манипулятором-триподом по заданным траекториям

Погрузочный манипулятор с исполнительным пространственным механизмом в виде трипода (рисунок 2.7) представляет сложный механизм параллельно-последовательной структуры.

Для определения траектории перемещения точки M (рисунок 2.8) в пространстве используется зависимость между координатами двух точек в пространстве и расстоянием между ними.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Погрузочный манипулятор с исполнительным пространственным механизмом в виде трипода: а) на базе энергетического транспортного средства; б) в лабораторных условиях

Уравнения связей для рассматриваемой схемы манипулятора представляют собой нелинейные уравнения, связывающие обобщенные координаты манипулятора l_1, l_2, l_3, l_4 с декартовыми координатами захвата (точки $M - x, y, z$) и координаты точки A поворотного основания y_A, z_A .

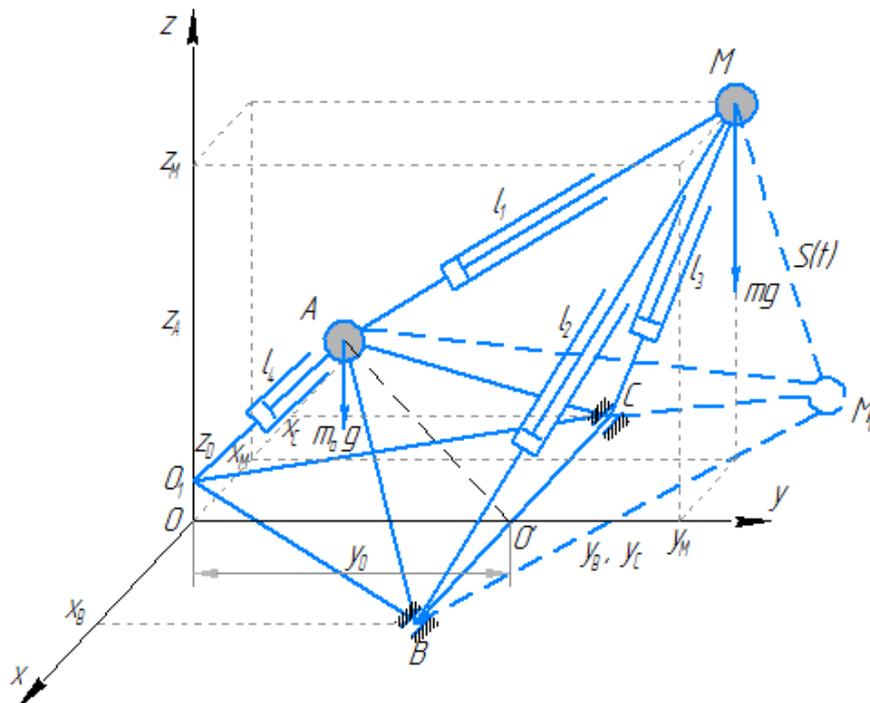


Рисунок 2.8 – Расчетная схема манипулятора

$$\begin{aligned}
&\sqrt{x^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2} - l_1(t) = 0, \\
&\sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + z^2} - l_2(t) = 0, \\
&\sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + z^2} - l_3(t) = 0, \\
&\sqrt{y_A^2 + (z_A - OO_1)^2} - l_4(t) = 0, \\
&\sqrt{z_A^2 + (y_B - y_A)^2} - AO' = 0,
\end{aligned} \tag{2.9}$$

где l_1, l_2, l_3, l_4 – обобщенные координаты манипулятора, $\varphi = f(l_4), y_B = y_C, x_B = -x_C, OD = const$.

Выражения (2.9) являются решением обратной задачи о положениях для рассматриваемого манипулятора.

Решение прямой задачи о положениях получено в работах [36, 41, 45, 90, 145].

$$\left\{ \begin{aligned}
&x = \frac{1}{4x_B} (l_3^2 - l_2^2); \\
&y = y_0 + \sqrt{l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{A^2}{4z_A^2}} \cdot \cos \varphi - \frac{B \cdot \sin \varphi}{2z_A}; \\
&z = \sqrt{l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{A^2}{4z_A^2}} \cdot \cos \varphi - \frac{B \cdot \sin \varphi}{2z_A}.
\end{aligned} \right. \tag{2.10}$$

где $A = -l_1^2 + 0,5l_2^2 + 0,5l_3^2 - x_B^2 - z_A^2$; $B = -l_1^2 + 0,5l_2^2 + 0,5l_3^2 - x_B^2 + z_A^2$.

С помощью выражений (2.10) можно задавать перемещение точки M (крепления захвата или крюка) в пределах теоретической зоны обслуживания.

Для параметрического задания перемещения груза по требуемой траектории координаты точки его подвеса M задаются функциями

$$\left\{ \begin{aligned}
&x(t) = f_1(t), \\
&y(t) = f_2(t), \\
&z(t) = f_3(t).
\end{aligned} \right. \tag{2.11}$$

Задавшись уравнением траектории $f(t)$ и решая совместно выражения (2.9) и (2.11), можно получать реализацию закона движения по заданным траекториям. Например, для реализации движения по прямой, функции изменения декартовых координат задаются в виде [36]:

$$\begin{cases} f_1(t) = \frac{S(t) + x_0 K_x}{K_x}, \\ f_2(t) = \frac{S(t) + y_0 K_y}{K_y}, \\ f_3(t) = \frac{S(t) + z_0 K_z}{K_z}. \end{cases} \quad (2.12)$$

где $S(t)$ – длина отрезка; x_0, y_0, z_0 – начальные координаты; K_x, K_y, K_z – коэффициенты, зависящие от начальных условий.

2.2. Моделирование управления погрузочным манипулятором-триподом

Объект управления манипулятором в общем виде может быть представлен в форме уравнений состояния

$$\dot{l} = Al + B\dot{u} \quad , \quad (2.13)$$

где l – обобщенная координата (управляемая величина); \dot{u} – управляющее воздействие; A и B – матрицы соответствующих коэффициентов.

Под целью управления понимается решение задачи приближения значения выходных параметров l к желаемому результату

$$\begin{aligned} |l - l^*| &\rightarrow \min \quad \text{или} \\ |l - l^*| &\leq \varepsilon \quad , \end{aligned} \quad (2.14)$$

где ε - заданная допустимая погрешность отклонения.

В системах дистанционного ручного управления манипуляторами позиционный режим управления описывается уравнениями [129, 130]

$$\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{l_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{l_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{l_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{l_4} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

где λ_{l_i} - масштабные коэффициенты; u_i – координаты, определяющие положение задающего устройства.

Режим управления манипулятором-триподом по скорости

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \\ \dot{i}_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{v_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{v_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{v_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{v_4} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \\ \dot{i}_4 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Структурная схема системы позиционного управления погрузочным манипулятором-триподом представлена на рисунке 2.9.

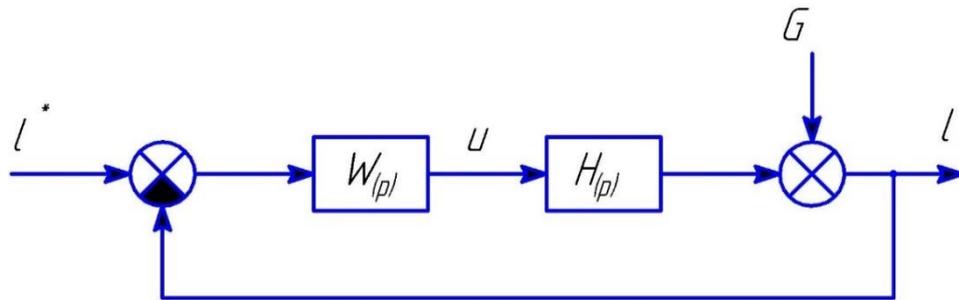


Рисунок 3.1 – Структурная схема линейной системы позиционного управления

Линейная динамическая модель управления перемещением груза согласно структурной схеме записана выражениями

$$\begin{aligned} l_i &= H(p) \cdot u_i + G, \\ u_i &= W(p) \cdot (l^* - l). \end{aligned} \quad (2.17)$$

где $H(p)$ – передаточная функция объекта управления; G – возмущение, действующее на объект управления; $W(p)$ – передаточная функция регулятора; $(l^* - l)$ – задаваемая ошибка отклонения от траектории.

2.3. Метод и алгоритм реализации копирующего управления манипулятором-триподом

Алгоритм формирования программы копирующего управления выходным звеном (т. M) манипулятора-трипода построен из условия идеального отслеживания траектории M_0M_k . Условие идеального отслеживания траектории точки M подразумевает, что перемещения подвижных частей приводных

механизмов звеньев задающего устройства и штоков исполнительных актуаторов связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} S(t)_{Mm} &= S(a)_{Mp} \cdot \lambda^{-1}, \\ V(t)_{Mm} &= V(a)_{Mp} \cdot \lambda^{-1}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

где $S(t)_{Mm}$, $V(t)_{Mm}$ – соответствующее перемещение и скорость точки M манипулятора; $S(a)_{Mp}$, $V(a)_{Mp}$ – соответствующее перемещение и скорость точки M задающего устройства (рукоятки); λ – масштабный коэффициент.

Пусть манипулятор характеризуется следующими геометрическими размерами (рисунок 2.10):

$$\begin{aligned} OM &= \lambda l_1; \quad AM = \lambda l_2; \quad BM = \lambda l_3; \quad OC = c; \quad OK = d; \\ OA, AB, OB; \quad OA &= OB; \quad AC = CB = a; \quad MK = L. \end{aligned}$$

Положение точки M можно представить в виде уравнений связей

$$\begin{aligned} l_1^2 &= x_M^2 + y_M^2 + z_M^2, \\ l_2^2 &= (x_M + a)^2 + (y_M + c)^2 + z_M^2, \\ l_3^2 &= (x_M - a)^2 + (y_M + c)^2 + z_M^2, \\ L^2 &= x_M^2 + (y_M + d)^2 + z_M^2. \end{aligned} \quad (2.19)$$

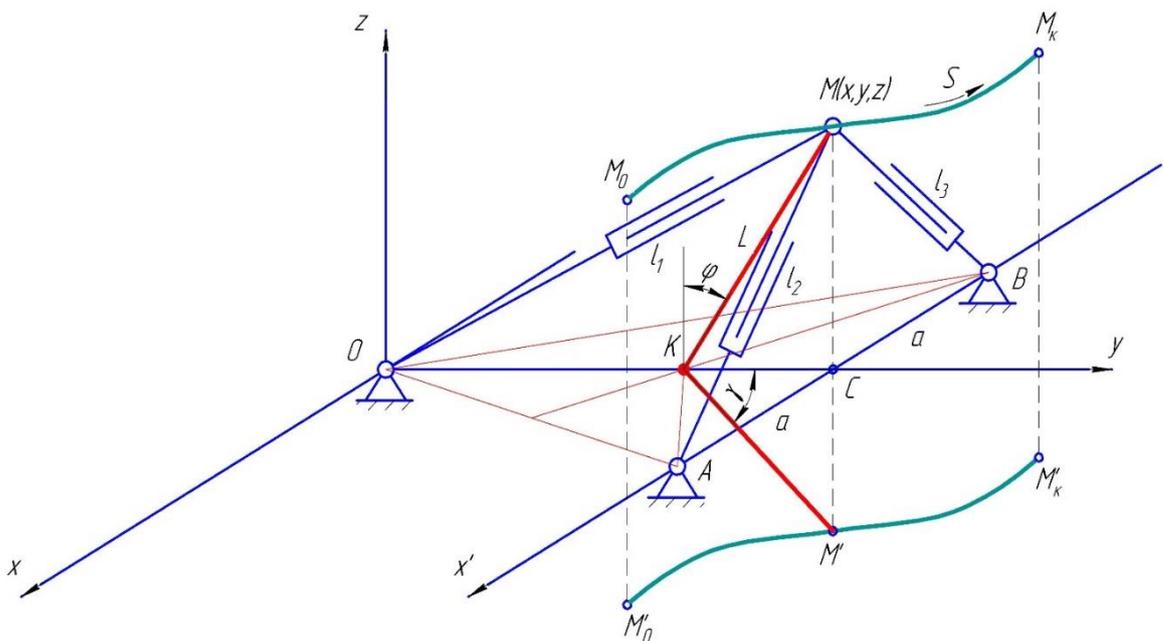


Рисунок 2.10 – Расчетная схема к формированию алгоритма управления

Зададим воспроизводимую кривую в виде функции $f_M = f(x_M, y_M)$, а начальное положение точки M_0 задающего устройства – $\lambda x_0, \lambda y_0, \lambda z_0$, (т.е. $M_0(x_0, y_0, z_0)$), причем точка M_0 совпадает с одной из точек траектории воспроизводимой кривой и соответствует углам звена $L - \varphi_0$ и γ_0 .

Обозначим начальные длины звеньев задающего механизма за l_{10}, l_{20}, l_{30} , а ходы подвижных частей (штоков), соответственно, S_1, S_2 и S_3 .

Алгоритм формирования программы управления актуаторами погрузочного манипулятора представлен на рисунке 2.11.

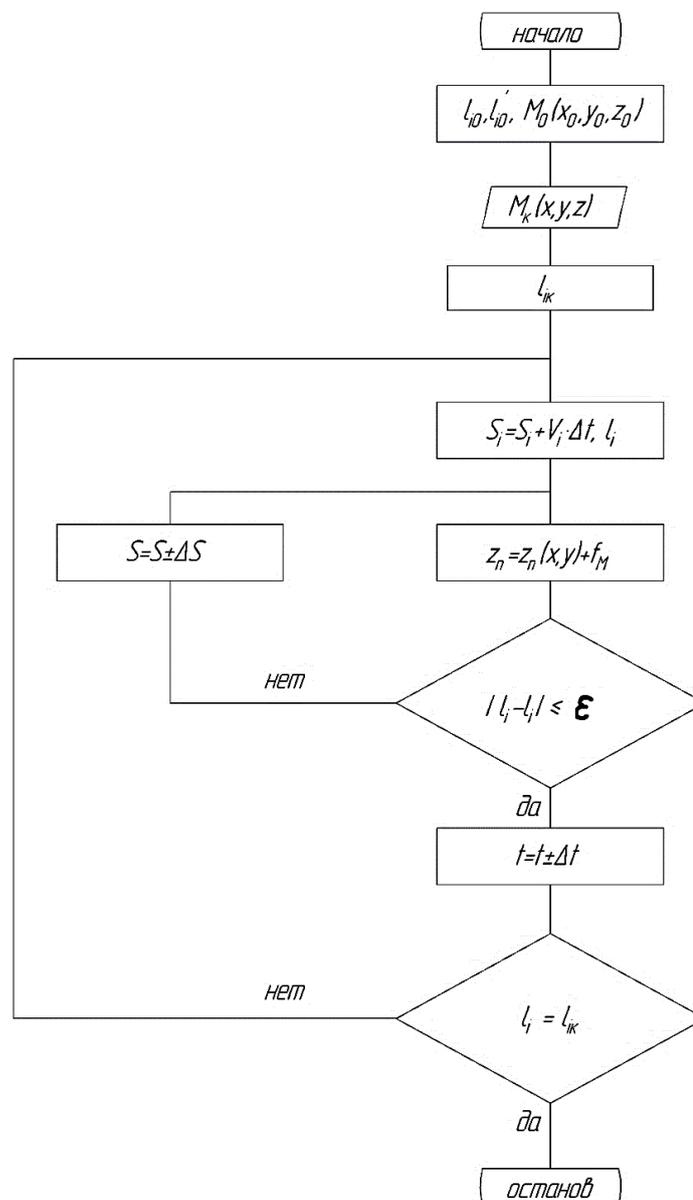


Рисунок 2.11 – Алгоритм формирования программы управления приводами манипулятора

В теле алгоритма считываются текущие показания датчиков положения штоков исполнительных электроцилиндров l_{i0} и положения штоков задающего механизма l'_{i0} . По этим показаниям по уравнениям (2.19) определяются декартовы координаты начальной точки положения груза $M_0(x_0, y_0, z_0)$. Затем задаются координаты конечной точки позиционирования груза $M_k(x, y, z)$ и вычисляются конечные значения длин исполнительных звеньев l_{ik} . Длины исполнительных звеньев связаны с длинами звеньев задающего механизма масштабным коэффициентом λ , т.е. $l_i = \lambda \cdot l'_i$.

Затем задается приращение координат по дуге траектории $S_i = S_i + V_i \Delta t$, вычисляются текущие значения l_i и происходит отработка движения по траектории. Если отклонение фактической от задаваемой траектории находится в пределах допустимой ошибки ε , то происходит дальнейшее приращение по времени движения t и дальнейшее приращение дуговой координаты S , если же $|l_i - l_i^*| > \varepsilon$, то происходит корректировка дуговой координаты. Движение по траектории осуществляется до тех пор, пока текущие значения длин электроцилиндров l_i не достигнут заданного конечного положения l_{ik} .

В результате реализации предложенного алгоритма определяется задаваемая траектория движения груза $\lambda z = f(\lambda_x, \lambda_y)$ и последовательность включения двигателей электроцилиндров. В зависимости от заданной погрешности отклонения ε от воспроизводимой траектории выбираются значение шагов ΔS и Δt .

2.4. Структурная схема системы ручного управления погрузочным манипулятором

Устройство ручного управления погрузочным манипулятором, позволяющее управлять не каждой степенью подвижности в отдельности, а непосредственно сразу несколькими обобщенными координатами, задавая траекторию выходного звена, представлено на рисунке 2.12.

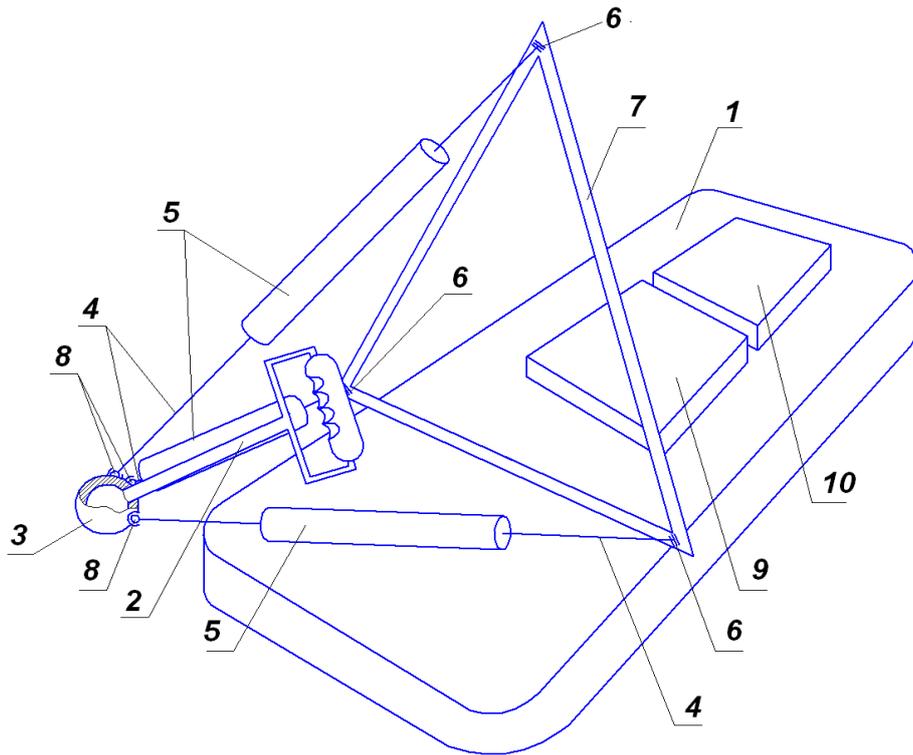


Рисунок 2.12 – Схема устройства ручного управления манипулятором-триподом

В состав системы управления (рисунок 2.12) входят платформа 1, манипуляционная рукоятка 2, установленная на сферическом шарнире 3, штанг 4 датчиков позиционирования 5 с цилиндрическими шарнирами 6. При этом дополнительно к платформе 1 неподвижно крепится треугольная рама 7, к которой, в свою очередь, крепятся штанги 4 реохордных датчиков позиционирования 5 посредством цилиндрических шарниров 6 одними концами, другими концами штанги 4 датчиков позиционирования 5 посредством шарнирного соединения 8 крепятся на сферическом шарнире 3, образуя полу пирамиду, внутри которой расположена манипуляционная рукоятка 2. Сферический шарнир 3 имеет возможность перемещения в зависимости от хода штанг 4 датчиков позиционирования 5. Дополнительно на платформе 1 установлены микроконтроллерный блок управления 9 и мостовой усилитель сигнала 10, при этом микроконтроллерный блок управления 9 связан посредством каналов связи с датчиками позиционирования 5 и мостовым усилителем сигнала

10. Функциональная схема управления манипулятором-триподом представлена на рисунке 2.13.

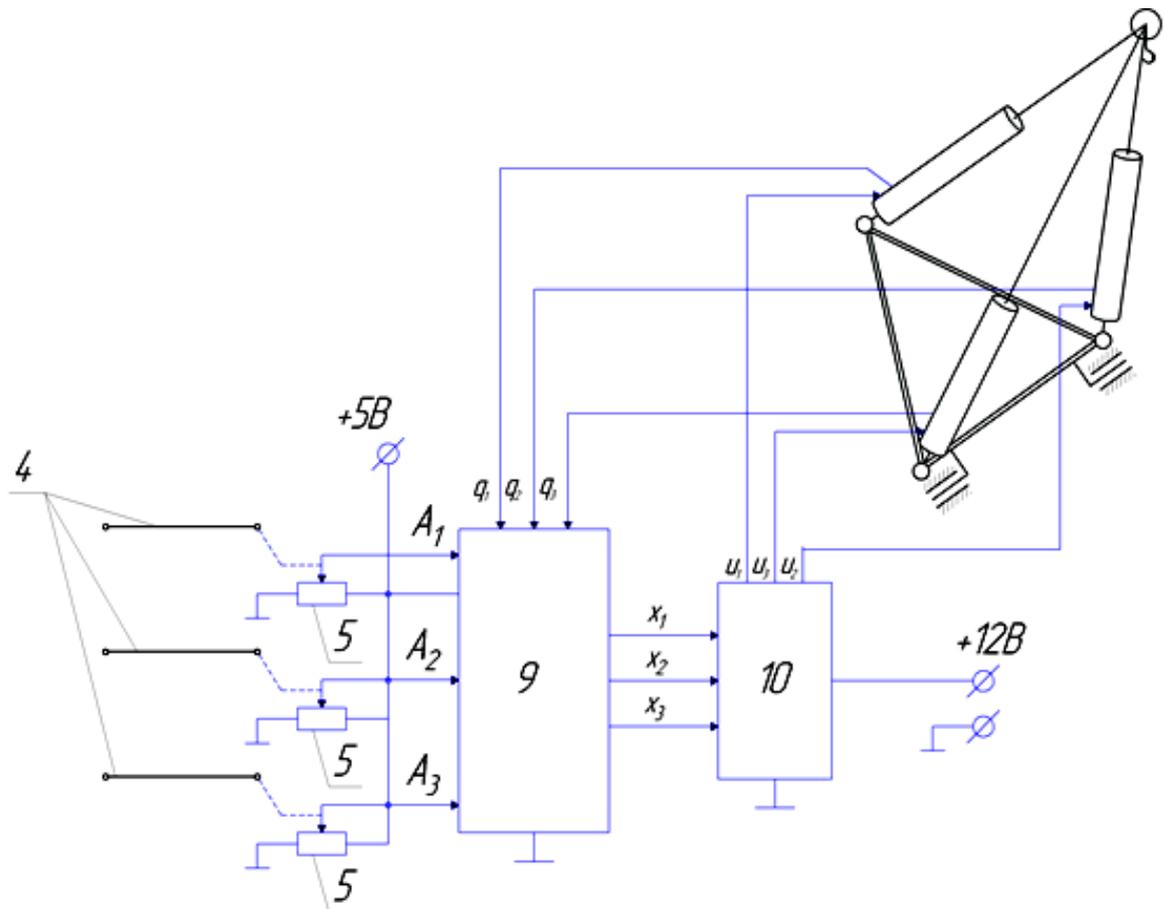


Рисунок 2.13 - Функциональная схема управления манипулятором-триподом

Для перемещения захвата в пространстве, размещенном на сферическом шарнире 3 (рисунок 2.12), осуществляется управление несколькими электроцилиндрами манипулятора-трипода одновременно. Управление электроцилиндрами манипулятора-трипода происходит посредством манипуляционной рукоятки 2, через которую оператор воздействует на реохордные датчики позиционирования 5, перемещая штанги 4. Штанги 4 перемещают в свою очередь ползунки реохордных датчиков позиционирования 5 (рисунок 2.13). Сигнал в виде тока от реохордных датчиков позиционирования поступает на входы каналов связи A_1 , A_2 , A_3 микроконтроллерного блока управления 9. Одновременно микроконтроллерный блок управления 9 сравнивает сигналы от датчиков электроцилиндров манипулятора-трипода, которые в виде тока поступают на микроконтроллерный блок управления 9 по каналам связи q_1 ,

q_2 и q_3 , соответственно. Если сигналы на каналах связи q_1 , q_2 , q_3 идентичны, соответственно, сигналам на каналах связи A_1 , A_2 , A_3 , то микроконтроллерный блок управления 9 не выдает управляющих сигналов. Если, например, значение сигнала на канале связи A_1 больше сигнала на канале связи q_1 , то микроконтроллерный блок управления 9 выдает управляющий ШИМ-сигнал по каналу связи x_1 на мостовые усилители сигнала 10 и управляющее напряжение по каналу связи u_1 блока 10 подается на электроцилиндр манипулятора-трипода до тех пор, пока значения сигналов на каналах связи q_1 и A_1 не сравняются. Аналогично происходит управление всеми электроцилиндрами манипулятора-трипода.

Алгоритм опроса датчиков и выдачи управляющих ШИМ-сигналов для управления одним актуатором представлен в виде блок-схемы на рисунке 2.14. Цифровые значения в блоках сравнения алгоритма означают сопротивление реохордных датчиков постоянному току в килоомах.

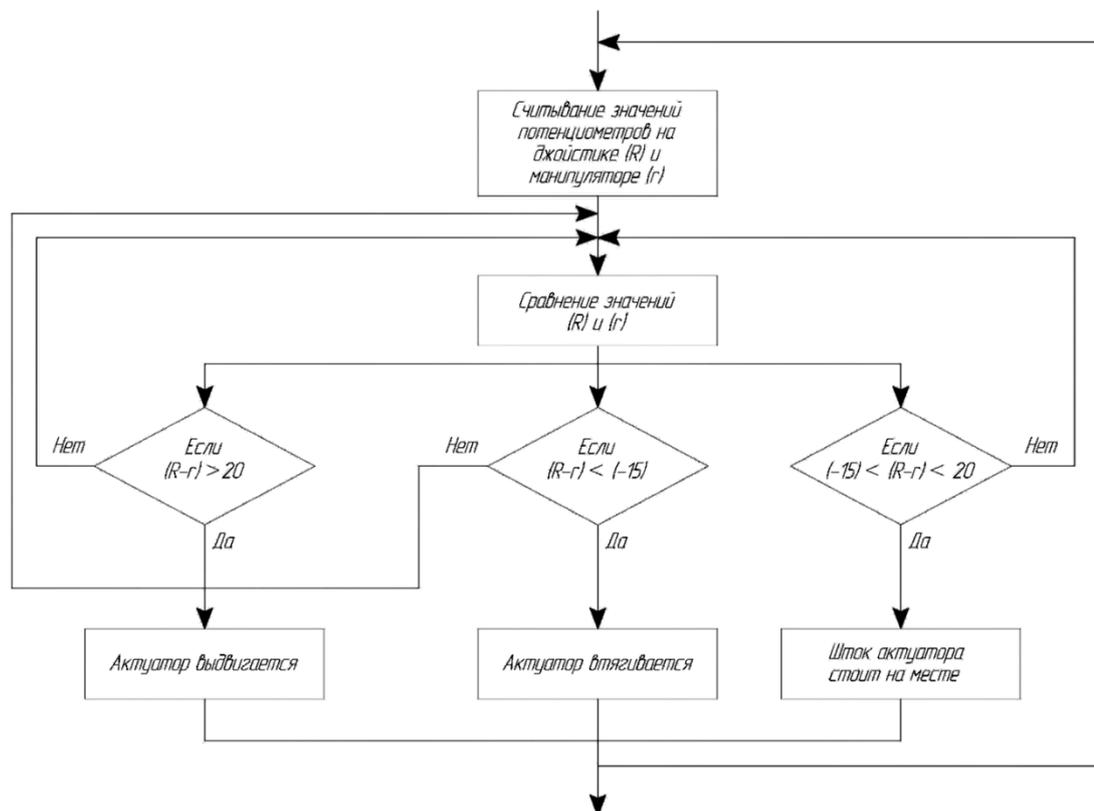


Рисунок 2.14 - Фрагмент алгоритма опроса датчиков и выдачи управляющих ШИМ-сигналов

При создании алгоритма принято допущение об идеальном отслеживании взаимного положения подвижных частей приводных механизмов звеньев рукоятки управления и штоков соответствующих им электроцилиндров, т.е. перемещения и скорости подвижных частей приводных механизмов звеньев рукоятки и штоков электроцилиндров (прямые и обратные) связаны только масштабным коэффициентом λ .

Выводы по главе

Рассмотрены технологические процессы погрузки грузов в различных сферах деятельности при помощи погрузочного манипулятора-трипода, управляемого человеком-оператором на операциях с контейнерами, мешками и другими штучными грузами, для работы в стесненных условиях. Представлено формализованное описание технологического процесса погрузки контейнеров и штучных грузов в виде графа. Рассмотрены варианты траекторий погрузки контейнера в виде нескольких составных прямолинейных и криволинейных участков.

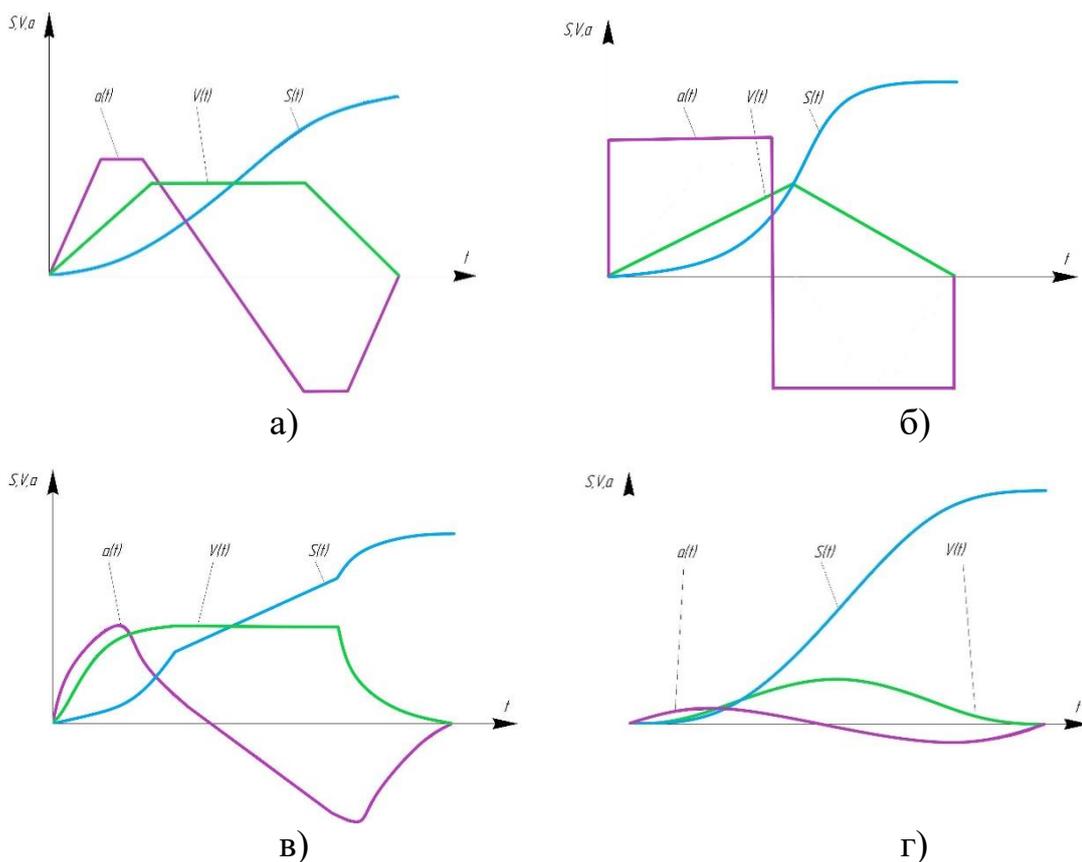
Решена обратная задача кинематики для рассматриваемого манипулятора. Разработаны математическая модель объекта управления манипулятором, структурная схема системы ручного управления погрузочным манипулятором-триподом. Представлена методика и алгоритм системы копирующего управления манипулятором триподом на подвижном основании.

В главе представлено описание устройства ручного управления погрузочным манипулятором, позволяющего управлять не каждой степенью подвижности в отдельности, а непосредственно сразу несколькими обобщенными координатами, задавая траектории выходного звена.

3. МЕТОД И СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЗОЧНОГО МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА

3.1. Обеспечение перемещения груза по заданному закону движения по траектории

При перемещении контейнеров и штучных грузов на подвесе в конечной точке позиционирования происходит раскачка груза. Время успокоения груза влияет на общую производительность погрузочного агрегата. Для уменьшения или исключения раскачки груза используют различные законы трогания и останова, с минимизацией скорости и ускорения в начальный и конечный момент времени (рисунок 3.1).



а) трапецеидальный; б) треугольный; в) экспоненциальный; г) синусоидальный

Рисунок 3.1 – Законы перемещения груза по траектории при различных законах изменения скорости

Законы перемещения груза по траектории, обеспечивающие нулевые значения скоростей и ускорений в момент трогания и останова, называют законами «мягкого» касания [117].

Закон «мягкого» трогания и останова позволяет обеспечить плавное уменьшение управляющих сил и моментов по мере приближения к конечному положению объекта, что в свою очередь повышает точность позиционирования [143, 150]. Впервые законы «мягкого» управления были предложены А.П. Батенко [7].

Использование законов «мягкого» касания в манипуляторах с открытыми кинематическими цепями исследовалось многими учеными. Для манипуляторов параллельной структуры применение таких законов должно быть тщательно обосновано из-за особенности конструкции.

3.1.1. Динамический синтез оптимальных законов управления степенями подвижности погрузочного манипулятора

Разработка систем управления параллельно-последовательных манипуляторов с большим числом степеней подвижности, управляемых как в автоматическом, так и в полуавтоматическом режиме, связано с проблемой синтеза программных движений исполнительных звеньев. Общая задача перемещения рабочего органа манипулятора разделяется на три этапа – позиционирование, синтез траектории в пространстве и определение закона движения по траектории [28, 29, 39, 40, 124, 145].

Для погрузочных манипуляторов актуальна задача снижения динамических нагрузок при перемещении грузов [68], поэтому программный закон движения исполнительных звеньев должен обеспечивать как можно меньшие ускорения, а, следовательно, и минимальные инерционные нагрузки.

Задача позиционирования кинематически избыточного манипулятора-трипода решалась как задача оптимизации, в которой минимизируется квадрат разностей конечного и начального значений обобщенных координат l_i . Подробно

эта задача рассмотрена в работах Жоги В.В., Несмиянова И.А. и Дяшкина-Титова В.В. В этих же работах доказано, что наиболее нагруженными в манипуляторе-трипODE, в исполнении и компоновке как на рисунке 2.8, являются приводы первого и четвертого исполнительных звеньев [41, 85, 86, 91].

Если после решения оптимизационной задачи позиционирования выясняется, что требуется перемещение основания трипода четвертым электроцилиндром (l_4), то решается задача минимизации величины ускорения поворотного основания трипода с целью минимизации инерционных нагрузок.

Рассмотрим расчетную схему манипулятора с двумя сосредоточенными массами m – масса груза, приведённая к геометрической точке M захвата, m_A – масса поворотной платформы и исполнительных актуаторов, приведённые к точке A (глава 2, рисунок 2.8). В качестве обобщенных координат выбираем координаты захвата $q_1=x$, $q_2=y$, $q_3=z$ и координаты точки A поворотного основания $q_4=y_A$, $q_5=z_A$.

В этом случае кинетическая энергия системы имеет вид

$$T = T_M + T_A,$$

$$T = \frac{1}{2}(m\dot{x}^2 + m\dot{y}^2 + m\dot{z}^2) + \frac{1}{2}(m_A\dot{x}_A^2 + m_A\dot{y}_A^2 + m_A\dot{z}_A^2), \quad (3.1)$$

т.к. $x_A = 0$, $\dot{x}_A = 0$, то

$$T = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{m_A}{2}(\dot{y}_A^2 + \dot{z}_A^2). \quad (3.2)$$

Координаты точки A связаны с углом поворота основания выражениями $y_A = OA \cdot \sin\varphi$, $z_A = OA \cdot \cos\varphi$.

Уравнение Лагранжа с неопределёнными множителями

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k + \sum_{k=1}^5 \lambda_k \cdot \frac{\partial f_k}{\partial q_k}, \quad (3.3)$$

где $q_1=x$, $q_2=y$, $q_3=z$, $q_4=y_A$, $q_5=z_A$.

Уравнения голономных связей

$$f_1 = \sqrt{x^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2} - l_1(t) = 0,$$

$$\begin{aligned}
f_2 &= \sqrt{(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2 + z^2} - l_2(t) = 0, \\
f_3 &= \sqrt{(x-x_C)^2 + (y-y_C)^2 + z^2} - l_3(t) = 0, \\
f_4 &= \sqrt{y_A^2 + (z_A - OO_1)^2} - l_4(t) = 0, \\
f_5 &= \sqrt{z_A^2 + (y_B - y_A)^2} - AO' = 0,
\end{aligned} \tag{3.4}$$

где $AO' = const$.

Находим выражения формализма Лагранжа от кинетической энергии

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_1}{\partial \dot{x}} \right) &= m\ddot{x}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_2}{\partial \dot{y}} \right) = m\ddot{y}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_3}{\partial \dot{z}} \right) = m\ddot{z}, \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_4}{\partial \dot{y}_A} \right) &= m_A \ddot{y}_A, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_5}{\partial \dot{z}_A} \right) = m_A \ddot{z}_A, \quad \frac{\partial T_i}{\partial q_i} = 0.
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Обобщенные силы (потенциальные силы)

$$Q_1=0, \quad Q_2=0, \quad Q_3=-mg, \quad Q_4=0, \quad Q_5=-m_A g. \tag{3.6}$$

Получим систему из пяти дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
m\ddot{x} &= \sum_{i=1}^5 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial x}, & m\ddot{y} &= \sum_{i=1}^5 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial y}, & m\ddot{z} &= \sum_{i=1}^5 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial z}, \\
m_A \ddot{y}_A &= \sum_{i=1}^5 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial y_A}, & m_A \ddot{z}_A &= \sum_{i=1}^5 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial z_A},
\end{aligned}$$

С учетом (3.4)

$$\left\{ \begin{aligned}
m\ddot{x} &= \lambda_1 \cdot \frac{x}{l_1} + \lambda_2 \frac{(x-x_B)}{l_2} + \lambda_3 \frac{(x-x_C)}{l_3}, \\
m\ddot{y} &= \lambda_1 \cdot \frac{(y-y_A)}{l_1} + \lambda_2 \frac{(y-y_B)}{l_2} + \lambda_3 \frac{(y-y_C)}{l_3}, \\
m\ddot{z} &= \lambda_1 \cdot \frac{(z-z_A)}{l_1} + \lambda_2 \frac{z}{l_2} + \lambda_3 \frac{z}{l_3} - mg, \\
m_A \ddot{y}_A &= \lambda_1 \cdot \frac{(y-y_A)}{l_1} + \lambda_4 \frac{y_A}{l_4} + \lambda_5 \frac{(y_B - y_A)}{AO'}, \\
m_A \ddot{z}_A &= \lambda_1 \cdot \frac{(z-z_A)}{l_1} + \lambda_4 \frac{(z_A - OO_1)}{l_4} + \lambda_5 \frac{z_A}{AO'} - m_A g
\end{aligned} \right. \tag{3.7}$$

Задаваясь законом перемещения захвата из заданного положения в известное конечное $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$, из выражений (3.4) находятся законы изменения длин исполнительных звеньев $l_2(t)$ и $l_3(t)$. Тогда как, законы изменения длин

исполнительных звеньев, вследствие ненулевой маневренности манипулятора, неизвестны. Их законы можно найти, воспользовавшись некоторым критерием оптимальности. С этой целью преобразуем уравнения (3.7).

Разделив на m первые три уравнения, введя обозначения $u_1 = \frac{\lambda_1}{m\ell_1}$, $u_2 = \frac{\lambda_2}{m\ell_2}$, $u_3 = \frac{\lambda_3}{m\ell_3}$, получены следующие выражения

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= u_1 x + u_2(x - x_B) + u_3(x - x_C), \\ \ddot{y} &= u_1(y - y_A) + u_2(y - y_B) + u_3(y - y_C), \\ \ddot{z} &= u_1(z - z_A) + u_2 z + u_3 z - g.\end{aligned}\quad (3.8)$$

Из выражений (3.7) видно, что неопределенные множители Лагранжа имеет размерность ньютона $H = \kappa z \cdot \frac{M}{c^2}$, следовательно, в нашем случае это есть сила, тогда обозначим $\lambda_4 = F_4$, а $\lambda_5 = F_5$ (F_4 и F_5 – управляющая сила четвертого цилиндра и реакция связи точке A).

Введём новые переменные $u_4 = \frac{F_4}{m_A l_4} = \frac{\lambda_4}{m_A l_4}$ и $u_5 = \frac{F_5}{m_A AO'} = \frac{\lambda_5}{m_A OA'}$,

получим

$$\ddot{y}_A = \frac{-m}{m_A} u_1 (y - y_A) + u_4 y_A - u_5 (y_B - y_A), \quad (3.9)$$

$$\ddot{z}_A = \frac{-m}{m_A} u_1 (z - z_A) + u_4 (z_A - OO_1) + u_5 \cdot z_A - g. \quad (3.10)$$

Таким образом, получили 10 уравнений: пять уравнений связей (3.4) и пять дифференциальных уравнений (3.8) – (3.10) и имеем 10 неизвестных: x , y , z , y_A , z_A , u_1 , u_2 , u_3 , u_4 , u_5 .

Для разработки программных движений исполнительных звеньев манипулятора необходимо провести синтез системы уравнений, реализующей эти движения и определить управляющие силы, считая, что траектория точки M является функцией от координат $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$.

Решим совместно уравнения (3.9) и (3.10), исключив из них u_5 .

$$\frac{\ddot{y}_A + \frac{m}{m_A} u_1 (y - y_A) - u_4 y_A}{-(y_B - y_A)} = \frac{\ddot{z}_A + \frac{m}{m_A} u_1 (z - z_A) - u_4 (z_A - OO_1) + g}{z_A}, \quad (3.11)$$

$$\ddot{y}_A z_A + \ddot{z}_A (y_B - y_A) = \frac{-m}{m_A} u_1 [(y - y_A) z_A - (z - z_A) \cdot (y_B - y_A)] + u_4 [y_A z_A + (z_A - OO_1) \cdot (y_B - y_A)] - g (y_B - y_A).$$

Известно [32], что касательное ускорение точки можно выразит через проекции ее скорости и ускорения на координатные оси:

$$a_\tau = \frac{a_y v_y + a_z v_z}{v} = a_y \cdot \cos(\bar{v} \bar{j}) + a_z \cdot \cos(\bar{v} \bar{k}) \quad \text{или} \quad a_{\tau A} = \frac{\ddot{y}_A V_y + \ddot{z}_A V_z}{V}.$$

В нашем случае

$$a_{\tau A} = \frac{\ddot{y}_A z_A + (y_B - y_A) \cdot \ddot{z}_A}{AO'}. \quad (3.12)$$

Откуда (рисунок 3.2)

$$\frac{z_A}{AO'} = \cos(AO' \wedge \bar{k}) = \sin \beta \quad \text{и} \quad \frac{(y_B - y_A)}{AO'} = \cos(AO' \wedge \bar{j}) = \cos \beta.$$

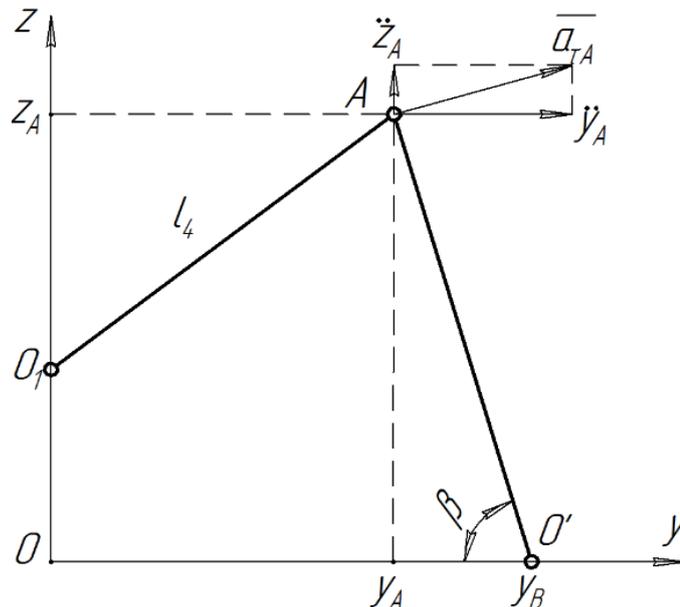


Рисунок 3.2 – К определению касательного ускорения

Следовательно, правая часть выражения (3.12) является касательным ускорением точки A

$$a_{\tau} = \ddot{y}_A \cdot \sin \beta + \ddot{z}_A \cdot \cos \beta \quad \text{или} \quad a_{\tau A} = \frac{\ddot{y}_A z_A + \ddot{z}_A (y_B - y_A)}{AO'}.$$

Тогда, разделив выражение (3.11) после его преобразования на AO' , получим

$$a_{\tau A} = \frac{-m u_1}{m_A AO'} \left[(y - y_A) \cdot z_A - (z - z_A) \cdot (y_B - y_A) \right] + \frac{u_4}{AO'} \left[y_A \cdot z_A + (z_A - OO_1) \cdot (y_B - y_A) \right] - \frac{g}{AO'} (y_B - y_A) \quad \text{или}$$

$$a_{\tau A} = -\frac{m u_1}{m_A AO'} \left[z_A (y - y_B) + z (y_B - y_A) \right] + \frac{u_4}{AO'} \left[z_A y_B + OO_1 (y_A - y_B) \right] - \frac{g}{AO'} (y_B - y_A).$$

Представим выражение (3.10) в виде

$$a_{\tau A} = \frac{m u_1}{m_A AO'} \left[z_A (y_B - y) + z (y_A - y_B) \right] + \frac{u_4}{AO'} \left[z_A y_B + OO_1 (y_A - y_B) \right] - \frac{g}{AO'} (y_B - y_A),$$

с другой стороны

$$a_{\tau A} = \frac{m u_1}{m_A} \left[\frac{z_A}{AO'} (y_B - y) + \frac{z (y_A - y_B)}{AO'} \right] + u_4 \left[\frac{z_A}{AO'} y_B + OO_1 \frac{(y_A - y_B)}{AO'} \right] + \frac{g}{AO'} (y_A - y_B). \quad (3.13)$$

Из схемы рисунка 3.2

$$z_A^2 + (y_B - y_A)^2 - AO'^2 = 0 \quad \text{или} \quad z_A^2 + [-(y_A - y_B)]^2 - AO'^2 = 0,$$

$$z_A^2 + (y_A - y_B)^2 - (AO')^2 = 0. \quad (3.14)$$

Вводим новую переменную, $\psi = \frac{S}{AO'}$ где S – длина дуги (участка)

траектории точки A в плоскости YOZ , для которой справедливо выражение

$$S^2 = y_A^2 + z_A^2 \quad \text{или} \quad S = \left(\sqrt{1 + \frac{y_A^2}{z_A^2}} \right) \cdot z_A, \quad ,$$

тогда

$$dS = \sqrt{1 + \left(\frac{dy_A}{dz_A} \right)^2} dz_A = \frac{AO'}{(y_A - y_B)} dz_A. \quad (3.15)$$

Подставим выражение (3.14) выразив оттуда предварительно $(y_A - y_B)$ в (3.15)

$$dS = \frac{AO'}{\sqrt{(AO')^2 - z_A^2}} dz_A ,$$

$$S - S_0 = AO' \cdot \arcsin\left(\frac{z_A}{AO'}\right) - AO' \cdot \arcsin\left(\frac{z_{AO'}}{AO'}\right) ,$$

$$S = AO' \cdot \arcsin\left(\frac{z_A}{AO'}\right) ,$$

т.к. $S = \psi \cdot AO'$ то $\psi_{AO'} = AO' \arcsin\left(\frac{z_A}{AO'}\right)$,

$$\psi = \arcsin\left(\frac{z_A}{AO'}\right) \text{ откуда следует } \frac{z_A}{AO'} = \sin \psi ,$$

$$z_A = AO' \cdot \sin \psi . \quad (3.16)$$

Подставим выражение (3.16) в (3.14)

$$(AO')^2 \cdot \sin^2 \psi + (y_A - y_B)^2 - (AO')^2 = 0 ,$$

выразим отсюда $(y_A - y_B)$: $(y_A - y_B)^2 = (AO')^2 - (AO')^2 \cdot \sin^2 \psi = (AO')^2 \cdot \cos^2 \psi$,

получим

$$(y_A - y_B) = AO' \cdot \cos \psi , \quad \sin \psi = \frac{z_A}{AO'} \text{ и } \cos \psi = \frac{(y_A - y_B)}{AO'} . \quad (3.17)$$

Решая совместно выражения (3.16), (3.17) и (3.13) получим

$$a_{\tau A} = \frac{mu_1}{m_A} [(y_B - y) \cdot \sin \psi + z \cdot \cos \psi] + u_4 [y_B \cdot \sin \psi + OO_1 \cos \psi] + g \cdot \cos \psi .$$

Раскроем скобки и выразим $\sin \psi$ и $\cos \psi$

$$a_{\tau A} = \frac{mu_1}{m_A} y_B \cdot \sin \psi - \frac{mu_1}{m_A} \cdot y \cdot \sin \psi + \frac{mu_1}{m_A} \cdot z \cdot \cos \psi + u_4 y_B \cdot \sin \psi + u_4 OO_1 \cdot \cos \psi + g \cdot \cos \psi ,$$

$$a_{\tau A} = \left[\frac{mu_1}{m_A} y_B - \frac{mu_1}{m_A} y + u_4 y_B \right] \cdot \sin \psi + \left[\frac{mu_1}{m_A} z + u_4 OO_1 + g \right] \cdot \cos \psi ,$$

$$a_{\tau A} = \left[\frac{mu_1}{m_A} (y_B - y) + u_4 y_B \right] \cdot \sin \psi + \left[\frac{mu_1}{m_A} z + u_4 OO_1 + g \right] \cdot \cos \psi . \quad (3.18)$$

Представим выражение (3.18) в виде уравнения

$$a_{\tau A} = A_1 \cdot \sin \psi + A_2 \cdot \cos \psi , \quad (3.19)$$

где

$$A(t) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \sqrt{\left[\frac{mu_1}{m_A} (y_B - y) + u_4 y_B \right]^2 + \left[\frac{mu_1}{m_A} z + u_4 OO_1 + g \right]^2}.$$

Уравнение (3.18) можно преобразовать к виду

$$a_{\tau A} = A(t) \cdot \sin(\psi + \alpha(t)),$$

где

$$tg\alpha(t) = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\left(\frac{mu_1}{m_A} (y_B - y) + u_4 y_B \right)}{\left(\frac{mu_1}{m_A} z + u_4 OO_1 + g \right)}.$$

Синтез программного закона движения поворотного основания BAC будем проводить из условия минимума ускорения точки A основания пирамиды $ABCM$.

С целью определения законов изменения $u_1(t)$ и $u_4(t)$ минимизируем функцию в каждый конкретный момент времени

$$\Phi = A(t_k)^2 \rightarrow \min, \quad (3.20)$$

$$\Phi = \left[\left(\frac{mu_1(t)}{m_A} (y_B - y(t)) + u_4(t) \cdot y_B \right)^2 + \left(\frac{mu_1(t)}{m_A} z(t) + u_4(t) + g \right)^2 \right].$$

В соответствии с методом Лагранжа вычисляем частные производные от функции Φ по переменным $u_1(t)$ и $u_4(t)$ в текущий момент времени

$$\frac{\partial \Phi}{\partial u_1} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial u_4} = 0$$

$$\left[\frac{mu_1(t)}{m_A} (y_B - y(t)) + u_4(t) \cdot y_B \right] \cdot \frac{m}{m_A} (y_B - y(t)) + \left[\frac{m}{m_A} u_1(t) \cdot z(t) + u_4(t) \cdot OO_1 + g \right] \cdot \frac{m}{m_A} z(t) = 0, \quad (3.21)$$

$$\left[\frac{mu_1(t)}{m_A} (y_B - y(t)) + u_4(t) \cdot y_B \right] \cdot y_B(t) + \left[\frac{m}{m_A} u_1(t) \cdot z(t) + u_4(t) \cdot OO_1 + g \right] \cdot OO_1 = 0. \quad (3.22)$$

Преобразуем выражения (3.21) и (3.22), вынеся $u_1(t)$ и $u_4(t)$

$$\frac{mu_1(t)}{m_A} \left[y_B^2 - 2y_B \cdot y(t) + y(t) + z(t) \right] + u_4(t) \left[y_B^2 - y_B \cdot y(t) + OO_1 \cdot z(t) \right] + g \cdot z(t) = 0,$$

$$\frac{mu_1(t)}{m_A} [y_B^2 - y_B \cdot y(t) + OO_1 \cdot z(t)] + u_4(t) [y_B^2 + OO_1^2] + g \cdot OO_1 = 0,$$

или

$$u_4(t) [y_B^2 - y_B \cdot y(t) + OO_1 \cdot z(t)] = -\frac{mu_1(t)}{m_A} [y_B^2 - 2y_B \cdot y(t) + y(t) + z(t)] - g \cdot z(t), \quad (3.23)$$

$$\frac{mu_1(t)}{m_A} [y_B^2 - y_B \cdot y(t) + OO_1 \cdot z(t)] = -u_4(t) [y_B^2 + OO_1^2] - g \cdot OO_1. \quad (3.24)$$

Разделим выражение (3.23) на выражение (3.24)

$$\frac{u_4(t)}{u_1(t) \frac{m}{m_A}} = \frac{u_1(t) \frac{m}{m_A} [y_B^2 - 2y_B \cdot y(t) + y(t) + z(t)] + g \cdot z(t)}{u_4(t) [y_B^2 + OO_1^2] + g \cdot OO_1},$$

$$\frac{mu_1(t)}{m_A} [y_B^2 - 2y_B \cdot y(t) + y(t) + z(t)] + u_4(t) [y_B^2 - y_B \cdot y(t) + OO_1 \cdot z(t)] + g \cdot z(t) = 0,$$

$$\frac{mu_1(t)}{m_A} [y_B^2 - y_B \cdot y(t) + OO_1 \cdot z(t)] + u_4(t) [y_B^2 + OO_1^2] + g \cdot OO_1 = 0.$$

Из выражений частных производных (3.9) и (3.10) совместным их решением определяются законы изменения коэффициентов $u_1(t)$ и $u_4(t)$, из которых находятся значения множителей Лагранжа λ_1 и λ_4 , и далее законы изменения управляющих сил $F_I(t)$, $F_4(t)$ (рисунок 3.3).

Определив закон изменения $u_1(t)$ и $u_2(t)$ найдем законы изменения множителей Лагранжа от времени t на участке траектории от начальной конфигурации до конечной (приложение 5).

$$\lambda_1(t) = u_1(t) \cdot ml_1, \lambda_4 = u_4(t) \cdot m_A l_4. \quad (3.25)$$

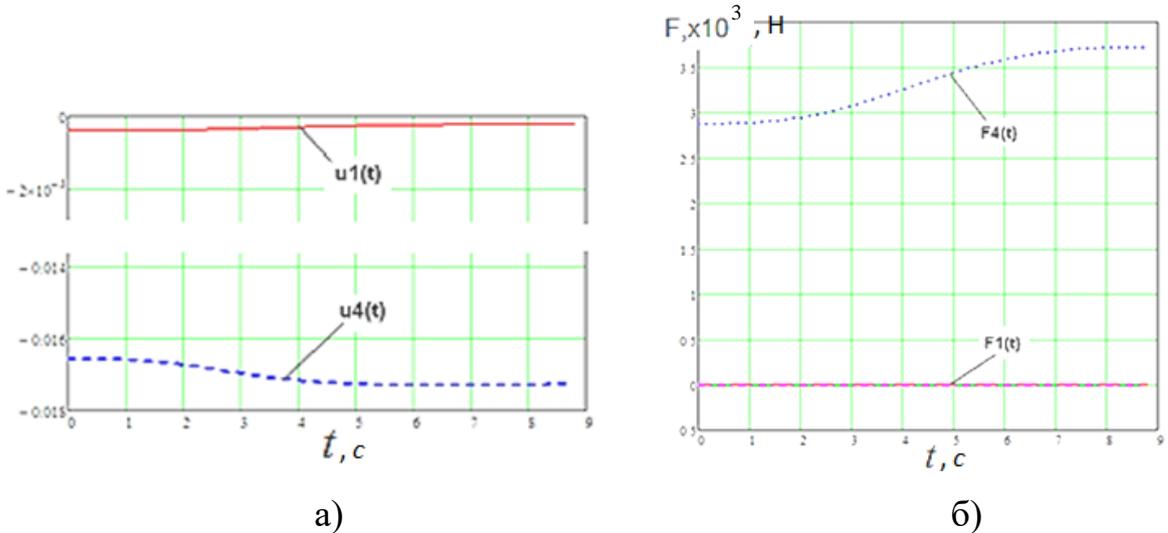
Так как физический смысл множителей Лагранжа в нашем случае есть реакции (усилия в линейных двигателях), то правильность вывода коэффициентов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ проверим в начальной и конечной конфигурациях манипулятора из уравнений статики стержневой конструкции (рисунок 3.4).

Согласно расчетной схемы (рисунок 3.4) получим две системы уравнений равновесия в точках сосредоточения приведенных масс: в точке приведения М

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0; -N_{23} \cos \alpha - N_1 \cos \beta &= 0, \\ \sum F_x = 0; N_1 \sin \beta - G - N_{23} \sin \alpha &= 0, \end{aligned} \quad (3.26)$$

в точке приведения A

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0; -N_1' \cos \beta - N_0 \cos \gamma - N_4 \sin \delta &= 0, \\ \sum F_z = 0; -N_1' \sin \beta - G_A - N_0 \sin \gamma - N_4 \cos \delta &= 0. \end{aligned} \quad (3.27)$$



а) законы изменения коэффициентов $u_1(t)$ и $u_4(t)$; б) законы изменения управляющих сил $F_1(t)$, $F_4(t)$

Рисунок 3.3 – Графическое представление результатов решения

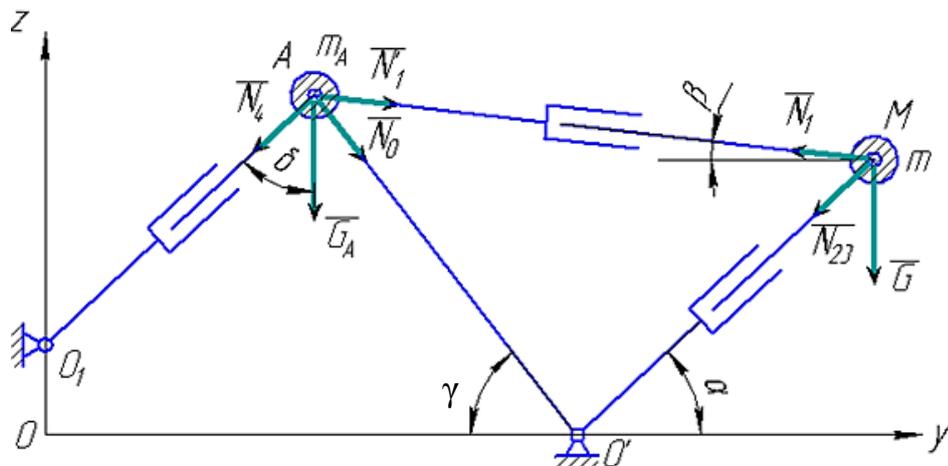


Рисунок 3.4 – Расчетная схема к определению коэффициентов $u_1(t)$ и $u_2(t)$

Определив из уравнений (3.26) и (3.27) реакции

$$N_{23} = -\frac{G}{\sin \alpha}, N_1 = -\frac{N_{23} \cos \alpha}{\cos \beta}, N_4 = \frac{N_1' \cos \beta + N_0 \cos \gamma}{\sin \delta},$$

и так как $\lambda_1=N_1$ и $\lambda_4=N_4$ определяем u_1 и u_4 для моментов времени $t_0=0$ и $t_k=T$:

$$u_{10} = \frac{\lambda_{10}}{ml_{10}}, u_{40} = \frac{\lambda_{40}}{m_A l_{40}}, u_{1k} = \frac{\lambda_{1k}}{ml_{1k}}, u_{4k} = \frac{\lambda_{4k}}{m_A l_{4k}}. \quad (3.28)$$

Полученные различными способами коэффициенты $u_1(t)$ и $u_2(t)$ для конкретного случая сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

Сравнение значений $u_1(t)$ и $u_2(t)$, определенных различными методами

Способ нахождения	Значения коэффициентов u_1 и u_4			
	$t_0=0$		$t_k=T$	
	u_{10}	u_{40}	u_{1k}	u_{4k}
Из аналитических выражений законов изменения $u_i(t)$	-0,00219	-0,017	-0,00357	-0,026
Методами статики	-0,00231	-0,019	-0,00363	-0,027

Знак “–“ при коэффициентах указывает на то, что актуаторы 1 и 4, в рассматриваемом положении, работают на растяжение.

Зная начальную и конечную конфигурацию манипулятора при известных $u_1(t)$ и $u_4(t)$ определяется максимальное значение коэффициента $A(t)$. Дважды проинтегрировав выражения (3.7) получим закон программного движения точки A из условия минимума касательного ускорения (рисунок 3.5), переход от закона движения точки A к закону движения исполнительного звена l_4 не представляет сложностей.

Представленный здесь аналитический синтез программного закона движения исполнительного звена из условия минимума ускорения соответствует закону «мягкого» касания [55], удовлетворяющего условию

$$\left. \frac{d\ell(t)}{dt} \right|_{t=0, t=\tau} = 0 \quad (3.29)$$

и позволяющему при его реализации существенно снизить динамические нагрузки, как на конструкцию манипулятора, так и на перемещаемые грузы.

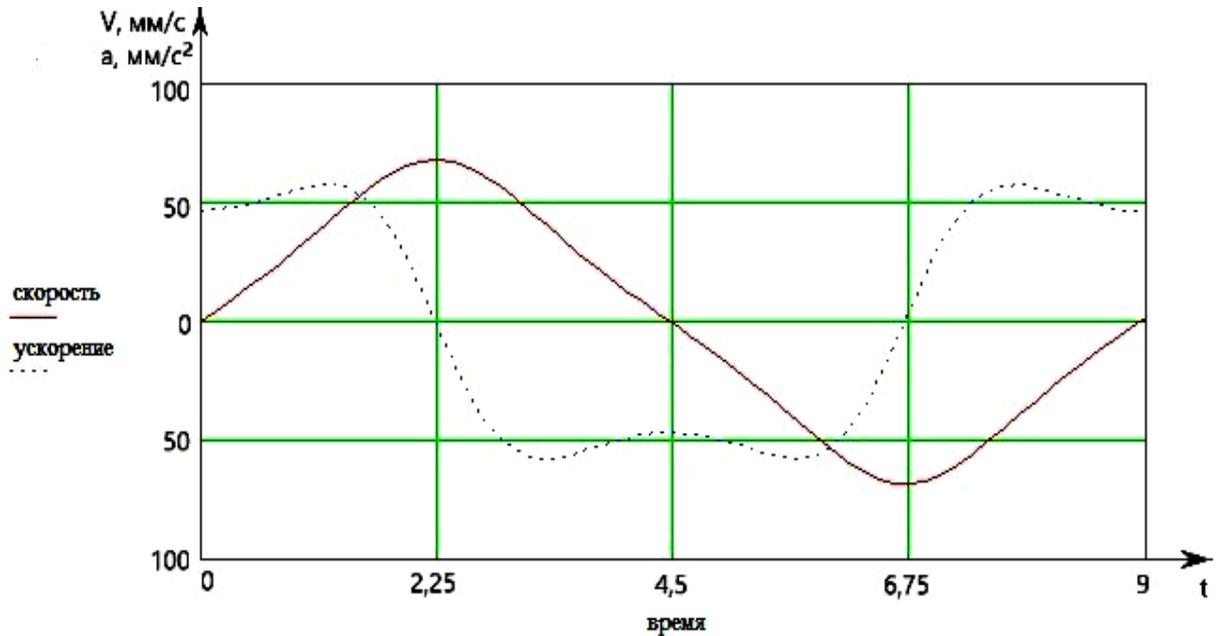


Рисунок 3.5 – Характер изменения линейной скорости и касательного ускорения т.А для синтезированного закона движения поворотного основания

3.2. Задача управления погрузочным манипулятором по критерию минимизации затрачиваемой работы

Одним из самых распространенных способов повышения производительности манипуляторов является увеличение скоростей перемещения рабочего органа. При этом для сохранения динамических параметров системы применяют контурное управление движением манипулятора для реализации заданной траектории [75].

Совмещение одновременно нескольких движений манипулятора при выполнении технологического процесса существенно увеличивает его производительность, но приводит к возрастанию затрат энергии [12].

В работе [88, 102, 120] отмечается, что для подавляющего большинства строительных роботизированных манипуляторов за критерий синтеза

геометрических параметров принимается минимизация суммарной работы, выполняемой приводами робота при отработке типовых движений.

Критерий минимизации суммарной работы приводов манипулятора при отработке траекторий [136]

$$A(\bar{l}) = \sum_{j=1}^n \left(\int_0^t |P_j(\bar{l})| dt \right) \rightarrow \min \quad (3.30)$$

где $P_j = k_j M_j \dot{q}_j$ — мощность привода j -ой степени подвижности; M_j — обобщенный момент j -го привода; \dot{q}_j — обобщенная скорость j -ой степени подвижности; $k = 1, 2, 3$ — коэффициент запаса, учитывающий возможное увеличение мощности для динамических режимов движения; l — длина звеньев манипулятора.

Задача управления манипулятором включает задачу формирования уравнений динамики и задачу выбора или синтеза законов управления, обеспечивающих выполнение заданного критерия качества (точности позиционирования схвата, точность перемещения схвата по заданной или синтезированной траектории) [9, 55, 82]. Для описания динамики реального погрузочного манипулятора использованы уравнения Лагранжа (3.5) с неизвестными множителями.

Длина и характер кривой траектории представляют особый интерес с точки зрения оптимального перемещения схвата, поэтому найдем длину траектории и ее графическое отображение

$$S = \int_{t_0}^T V(t) dt, \text{ при } t_0 = 0, \quad (3.31)$$

где абсолютная скорость груза

$$V(t) = \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz(t)}{dt} \right)^2}. \quad (3.32)$$

Функционирование любой адаптивной системы управления определяется целевой функцией текущего управления, которая должна быть непрерывной и независимой от условий работы [34].

Перемещение груза, как отмечалось ранее в разделе 2, возможно по различным траекториям (рисунок 3.6).

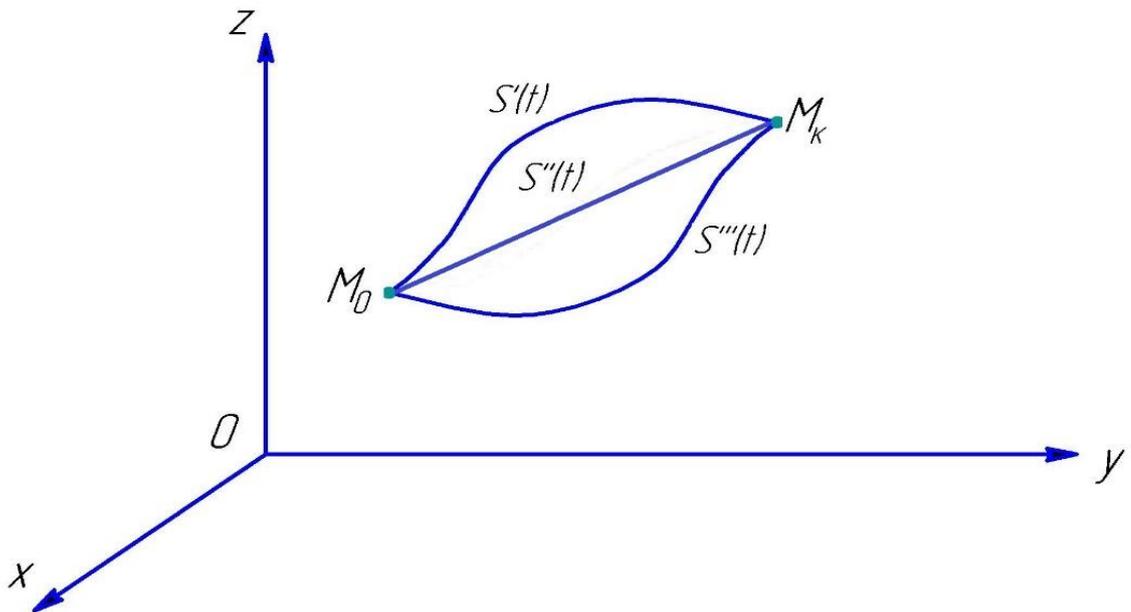


Рисунок 3.6 – Траектории процесса перемещения груза

Состоянию системы в каждый момент времени рабочего цикла соответствует положение точки в трехмерном пространстве (рисунок 3.6). В результате приложения управления $u(t)$ точка движется по некоторой траектории $S(t)$ из начальной точки M_0 к конечной M_k , достигая конечного положения $S(T)$. Управление $u(t)$, при котором критерий качества $J(S(T))$ достигает своего минимального значения, является оптимальным управлением [11].

Зная усилия в актуаторах N_1, N_2, N_3, N_4 , запишем работу, затрачиваемую на перемещение груза

$$A = \sum_{i=1}^3 N_i (l_{ik} - l_{i0}) + N_4 \cdot |AO'| \cdot (\varphi_k - \varphi_0) \quad (3.33)$$

или

$$A = Q(S_k - S_0) \quad , \quad (3.34)$$

где Q – обобщенная сила; $(S_k - S_0)$ – траектория перемещения груза.

Поставим вычислительный эксперимент, целью которого является определение оптимальной траектории перемещения груза. За критерий оптимизации примем минимизацию работы, затрачиваемой за цикл операции

$$J(S(T)) = \sum A(l_i) \rightarrow \min. \quad (3.35)$$

В процессе проведения вычислительного эксперимента перемещение схвата манипулятора будем задавать по нескольким траекториям, внутри одной выпуклой области зоны обслуживания.

Реализация вычислительного эксперимента проведена в *MathCad* (приложение 6).

Работа, затрачиваемая на перемещение груза по траектории, определялась как сумма работ каждого актуатора манипулятора

$$A = \sum_{i=1}^4 A_i(l_i), \quad (3.36)$$

$$A_i(l_i) = \frac{N_i(l_i(t) - l_{ik})}{1000}, \quad (3.37)$$

где N_i – усилие в i -м актуаторе; $l_i(t)$ – текущее значение обобщенной координаты, мм; l_{ik} – максимальный ход штока актуатора ($l_{1k}=1140$ мм, $l_{4k}=912$ мм).

Перемещение от начальной точки M_0 к конечной M_k осуществлялось по прямой траектории и по криволинейной по закону «мягкого» касания.

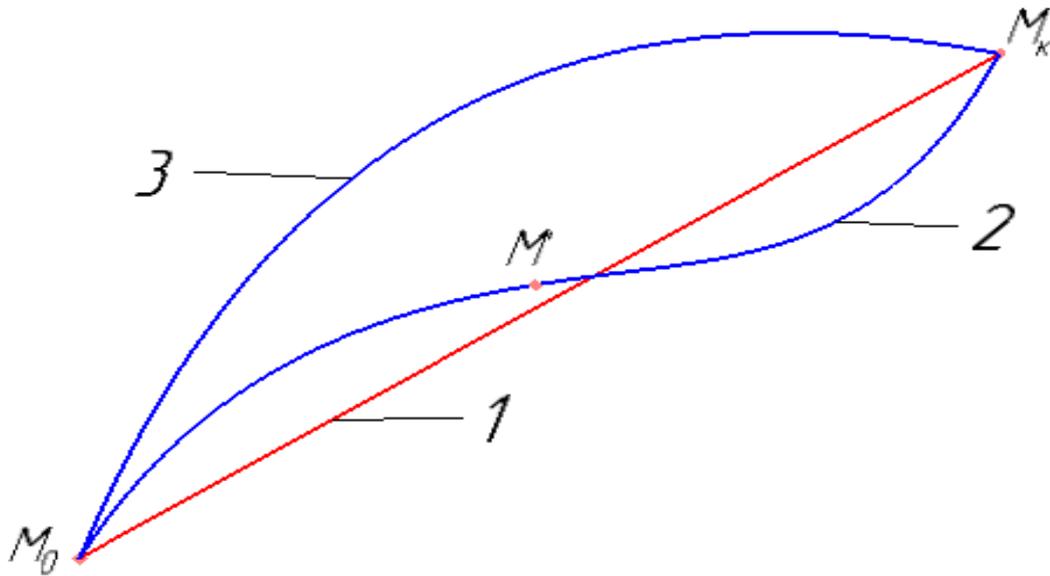
Для обоих случаев начальная и конечная конфигурации погрузочного манипулятора одинаковы.

За начальные значения приняты длины актуаторов:

$$\begin{aligned} l_{10} &= 1400 \text{ мм}; l_{20} = 1500 \text{ мм}; \\ l_{30} &= 1352 \text{ мм}; l_{40} = 911,9 \text{ мм}. \end{aligned}$$

или $M_0(x,y,z) = M_0(-297,25; 1129,71; 740,49)$.

Конечное положение груза задано координатами $M_k(300; 1500; -600)$. Вес перемещаемого груза 450 Н. При заданных координатах длина траектории составляет 371 мм (рисунок 3.7).



1 – прямая траектория; 2 – криволинейная, полученная от парциальных движений;
3 – криволинейная по дуге

Рисунок 3.7 – Траектории перемещения груза к оценке затрачиваемой работы
каждым приводом

При этих исходных данных определены затрачиваемые работы каждым приводом при перемещении груза по различным траекториям. Результаты сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Значения работ приводов за цикл операции, *кДж*

Траектория	$\sum A_1$	$\sum A_2$	$\sum A_3$	$\sum A_4$	A
Прямая	43,725	12,223	19,769	31,525	107,279
Криволинейная (дуга)	49,217	14,577	21,131	33,612	118,537

Как видно из расчетов, суммарная работа за цикл перемещения груза по прямой меньше, чем при перемещении по криволинейной траектории (по дуге) (рисунок 3.8) и составляет 107,279 *кДж* или на 11,3% меньше.

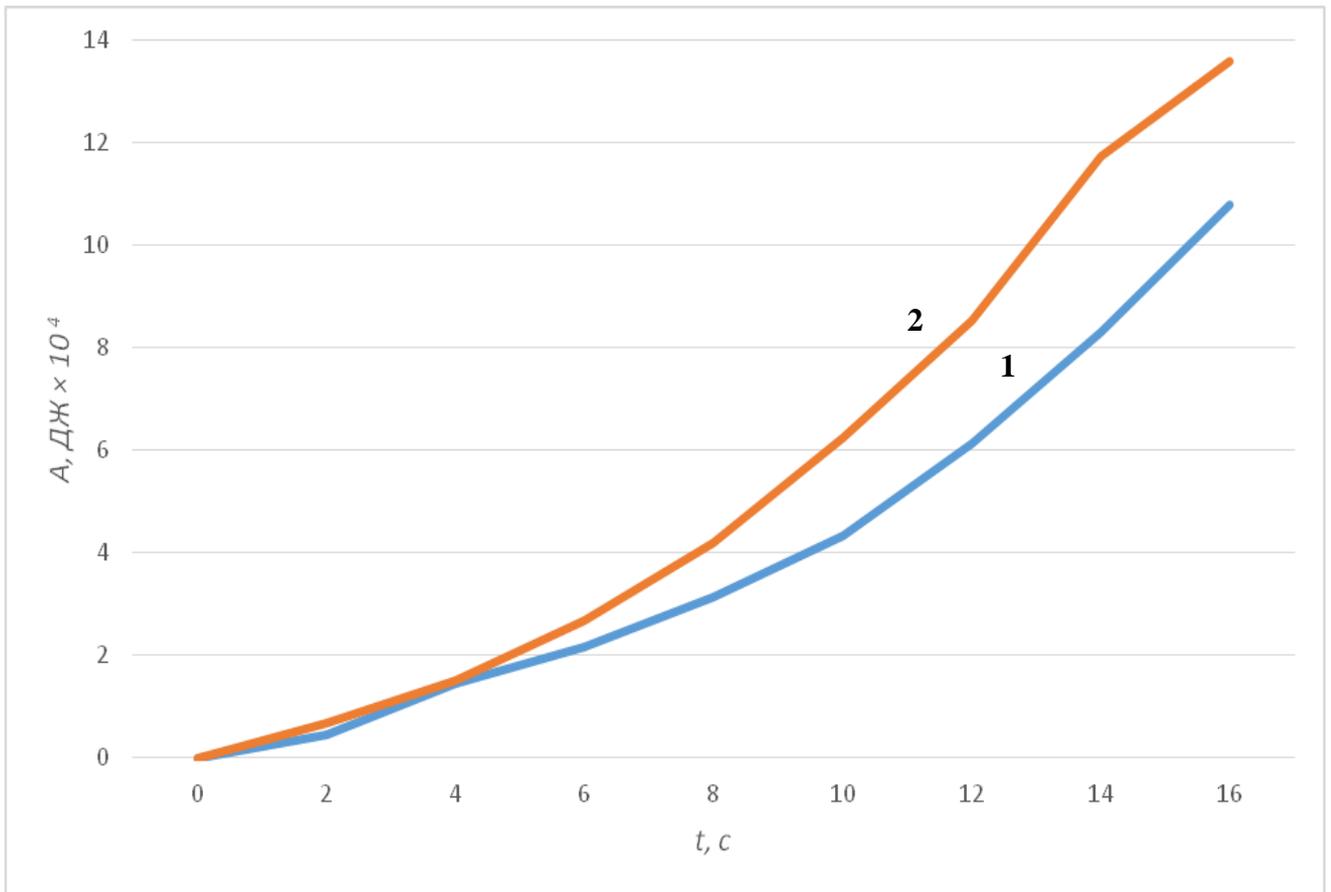


Рисунок 3.8 – Работа движущих сил, затрачиваемая на привод исполнительных звеньев при движении груза по прямой – 1 и по криволинейной траектории, в случае поочередного парциального движения приводов – 2

3.3. Динамика груза на подвесе при различных законах программных движений

С целью рассмотрения колебаний груза на подвесе манипулятора-трипода для случая перемещения груза по прямолинейной траектории в горизонтальной плоскости рассмотрена динамическую модель с сосредоточенными массами (рисунок 3.9).

Масса m_M трипода сосредоточена в точке M и движется по заданному программному движению под действием управляющей силы F_y по прямой со скоростью $\dot{S}(t)$, закон изменения которой задан программным движением.

Для рассматриваемой системы Лагранжиан выглядит следующим образом:

$$L = \left(\frac{1}{2} \cdot m_1 l^2 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_1 \dot{S}^2 + ml \dot{S} \dot{\varphi} \cos \varphi \right) + \frac{1}{2} \cdot m_M \dot{S}^2 - m_1 gl (1 - \cos \varphi), \quad (3.38)$$

где l – длина подвеса; m_1 – масса груза; $S(t)$ – закон перемещения точки подвеса по прямой.

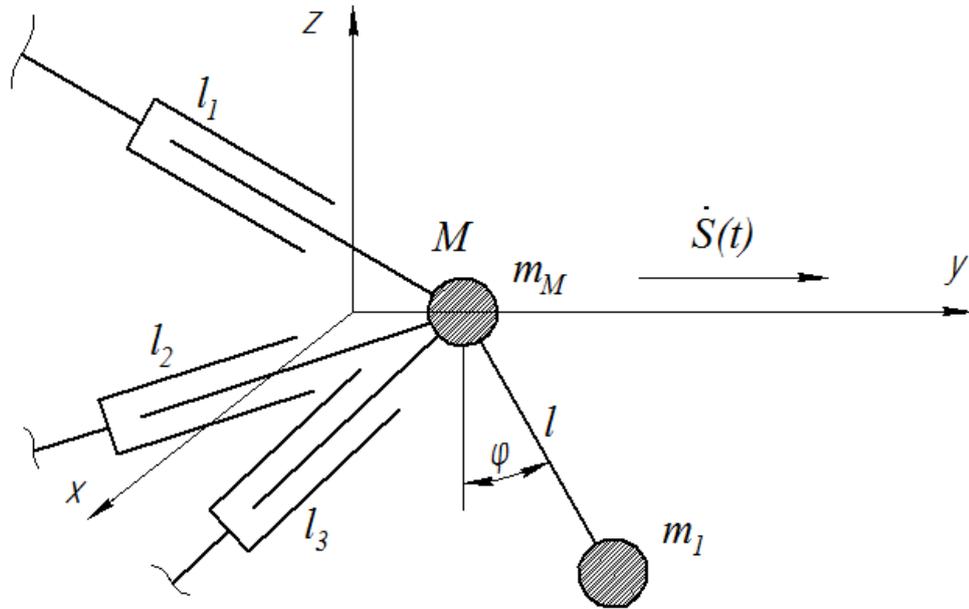


Рисунок 3.9 – Расчетная схема подвеса груза

С учетом действующей управляющей силы F_y дифференциальные уравнения движения примут вид:

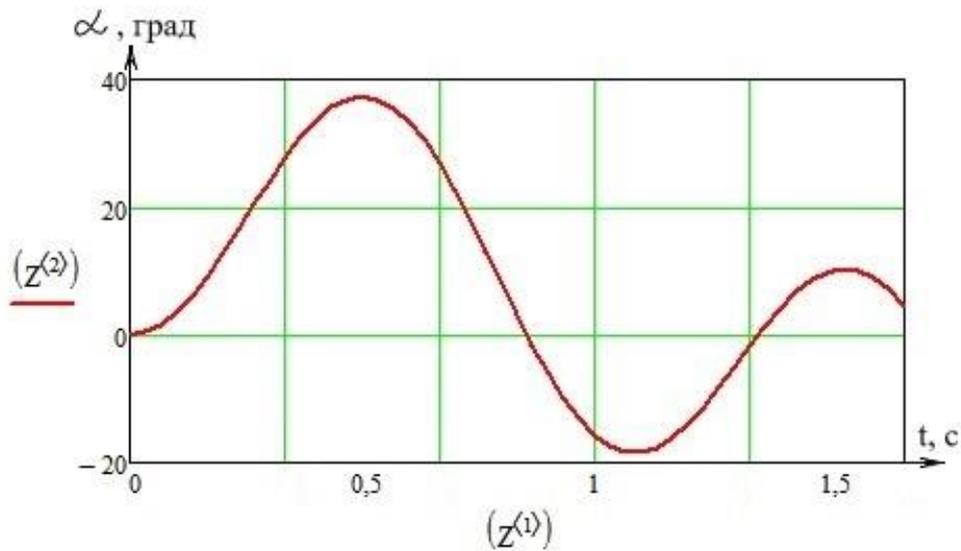
$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{1 - \frac{m_1 \cos \varphi^2}{m_M + m_1}} \cdot \left[-\frac{g}{l} \cdot \sin \varphi - \frac{\cos \varphi}{m_M + m_1} \cdot F_y - \frac{m_1 \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi^2}{m_M + m_1} \right], \quad (3.39)$$

$$\ddot{S} = \frac{1}{1 - \frac{m_1 \cos \varphi^2}{m_M + m_1}} \cdot \frac{1}{m_M + m_1} \left(F_y + m_1 g \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi + m_1 l \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \right). \quad (3.40)$$

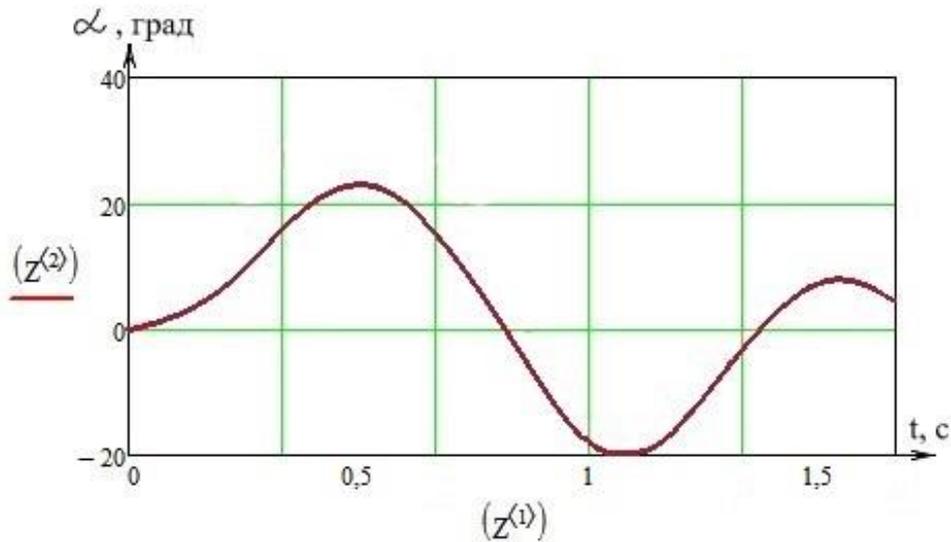
Рассмотрены случаи движения груза m_M по прямой с остановом без задания программного движения и с заданием программного движения по синтезированному закону в разделе 3.1 и приведенному на рисунке 3.5.

Для заданных законов программных движений получены графические зависимости $\varphi(t)$.

Логарифмический декремент для случая беспрограммного управления показанного на рисунке 3.10,а) $\ln(\varphi_0/\varphi_1)=0.348$, а для случая программного управления по синтезированному закону на рисунке 3.10,б) - $\ln(\varphi_0/\varphi_1)= 0.185$.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Колебания груза на подвесе при прямолинейном законе движения точки подвеса груза и его последующей остановки

Явно, что случай управления по синусоидальному закону более предпочтителен для перемещения грузов с минимальными инерционными нагрузками.

3.4. Моделирование парциальных движений манипулятора

Для проведения имитационного моделирования использовался междисциплинарный программный комплекс, позволяющий моделировать физико-технические объекты и системы, а также проводить виртуальные испытания - *SimulationX 3.4*. С помощью данного инструмента можно еще на стадии разработки оценить правильность инженерных решений, устранить недоработки и сократить число физических прототипов. Программа моделирует поведение и взаимодействие различных физических объектов механики, приводной техники, электрических, гидравлических, пневматических систем и их комбинаций, а также аналоговых и цифровых систем управления в режиме реального времени.

Посредством стандартных элементов библиотек *SimulationX 3.4* была реализована модель электропривода – электроцилиндра с приведенной к штоку перемещаемой массой (рисунок 3.11).

Законы управления актуаторами задаются в блоке *curveSet1* и через блок *function1* управляющие ШИМ-сигналы подаются на серводвигатель – электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением (*machine1*). Статор электродвигателя жестко закреплен (*preset1*), момент инерции ротора электродвигателя задается в блоке *inertia1*. Вращение от вала электродвигателя передается на червяк червячной передачи *worm1*. Передаточное отношение червячной передачи $i=20$. Опоры вала червяка и червячного колеса жестко связаны со статором электродвигателя (*preset2* и *preset3*). Момент инерции червячного колеса задается в блоке *inertia2*. Вал червячного колеса связан с винтом шарико-винтовой передачи *ballScrewDrive1*. В блоках *worm1* и *ballScrewDrive1* учитывается жесткость червячной и винтовой передач, там же учитываются и зазоры в сочленениях. Упругодемпфирующие свойства шарнирных соединений штока электроцилиндра с грузозахватным органом учитываются в блоке *springDamper1*. Приведенная масса *mass1* учитывает и массу груза, и грузозахватного оборудования. Учет внешних сил и изменение угла

между вертикальной нагруженной силой (веса груза) и осью штока электроцилиндра задается в блоке *source1* и *curve1*. Положение штока и его скорость фиксируется блоком *sensor2*, обратная связь от данного блока, в виде сигнала, поступает на сумматор *sum1* и корректируется управляющий ШИМ-сигнал в блоке *function1*.

Моделирование включало в себя перемещение штока одного электроцилиндра с отслеживанием изменения перемещения и скорости штока в электроцилиндре при реализации парциального движения. Перемещение груза производилось выдвиганием штока одного электроцилиндра и затем втягиванием штока до упора (рисунок 3.12).

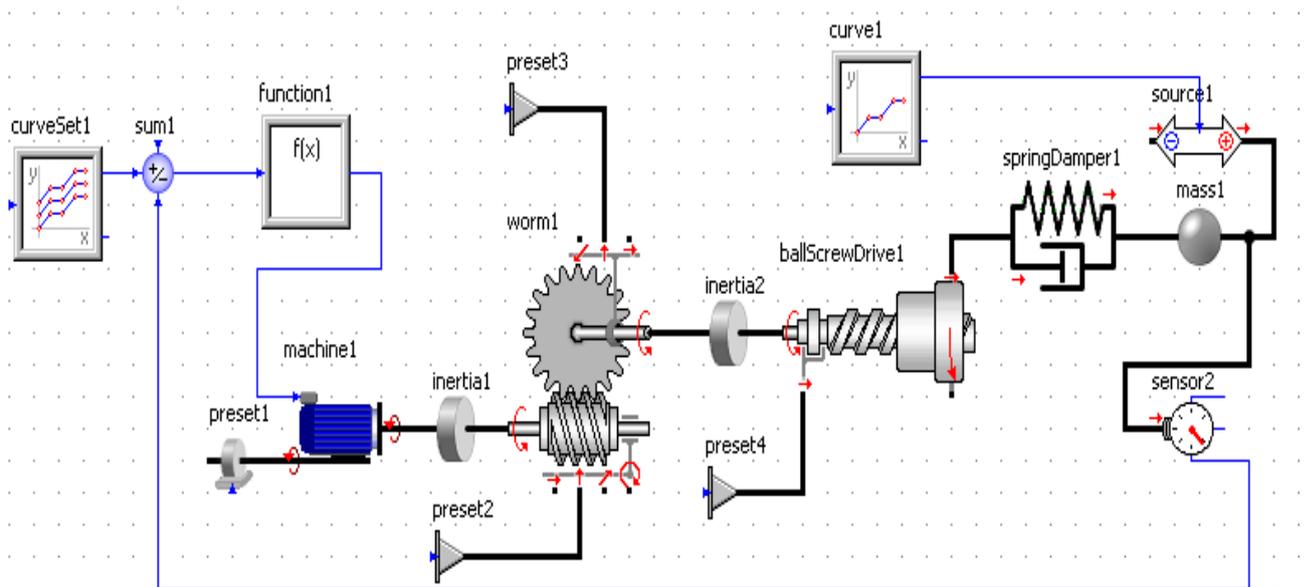


Рисунок 3.11 – Структурная схема виртуальной модели электропривода

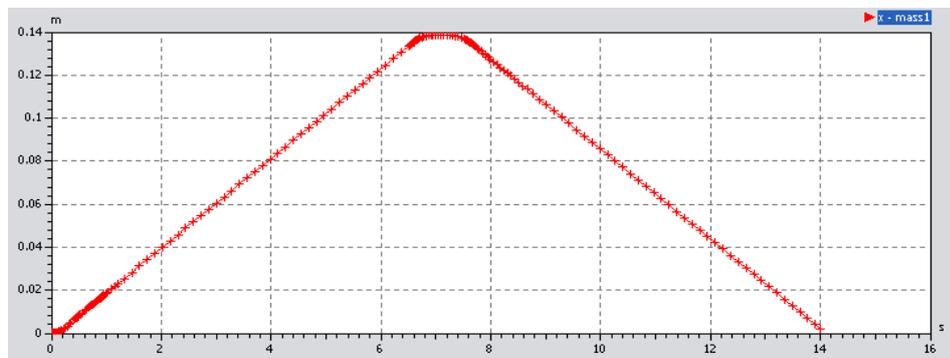


Рисунок 3.12 – Перемещение штока электроцилиндра по заданному закону движения

Как видно из графика (рисунок 3.12) выдвижение штока электроцилиндра на длину 140 мм происходит за 6,8 с. При этом перемещение происходит равномерно, без ускорения. При предельной скорости движения штока с грузом в 45 мм/с моделировалось движение с задаваемой скоростью 20 мм/с. То есть отношение скорости задающего механизма к скорости штока исполнительного звена составляет $\frac{V_y}{V_H} = 0,44$. Диаграмма изменения скорости штока представлена на рисунке 3.13.

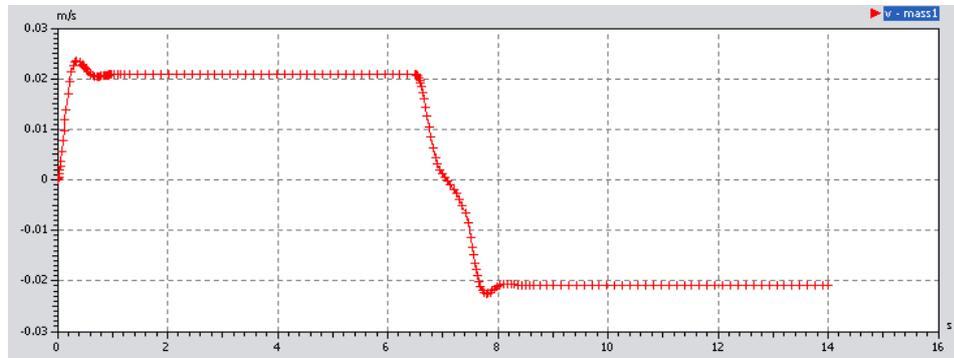


Рисунок 3.13 – Диаграмма изменения скорости штока электроцилиндра

При моделировании перемещения штока электроцилиндра по синусоидальному закону (рисунок 3.14) – выдвижение штока на то же расстояние, что и в случае по рисунку 3.12, происходит за 7 секунд. Скорость меняется волнообразно с незначительными скачками (рисунок 3.15).

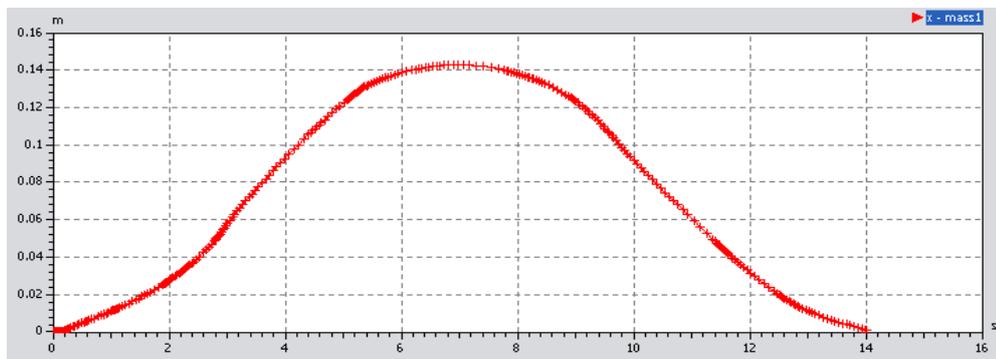


Рисунок 3.14 – Перемещение штока электроцилиндра по синусоидальному закону

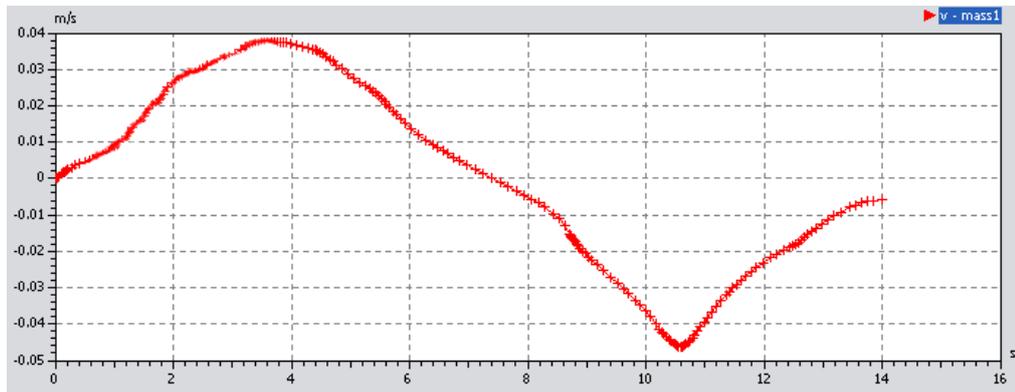


Рисунок 3.15 – Скорость при перемещении штока по синусоидальному закону

Проведенное имитационное моделирование показывает, что предложенный метод управления электроцилиндрами погрузочного манипулятора может быть практически реализован и использован в системах ручного управления.

Выводы по главе

Предложено использование закона «мягкого» управления, рассмотрены законы перемещения груза по траектории, рассчитаны программные законы движения манипулятора, получены графики работы движущих сил, затрачиваемой на привод исполнительных звеньев. Составлена динамическая модель погрузочного манипулятора на основе уравнений Лагранжа с неопределенными множителями. Решена задача динамического синтеза оптимальных законов управления степенями подвижности погрузочного манипулятора. Оценены колебания груза на подвесе при прямолинейном движении и последующим останом.

Проведено имитационное моделирование управляемого движения штока электроцилиндра погрузочного манипулятора, которое показывает, что предложенный метод управления электроцилиндрами погрузочного манипулятора может быть практически реализован и использован в системах ручного управления.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЗОЧНЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ

4.1. Экспериментальные образцы систем управления и стендовое оборудование

Экспериментальные исследования проводились с целью проверки работоспособности разработанных систем управления и проверки соответствия математической модели опытным образцам. Экспериментальные исследования и отработка алгоритма управления проводились на макете погрузочного робота-манипулятора параллельно-последовательной структуры на базе трипода.

Испытание и исследование систем управления манипулятором-триподом проводилось на действующей модели манипулятора (рисунок 4.1).

В качестве звеньев переменной длины манипулятора использованы актуаторы *SFK САНВ-21* (рисунок 4.2).



1 - четырехподвижный шарнир, 2 - актуаторы *SFK САНВ-21*, 3 - поворотное основание, 4 – платформа, 5 - микрокомпьютер *Raspberry*

Рисунок 4.1 - Модель манипулятора –трипода с актуаторами *SFK*

Рисунок 4.2 – Линейный привод серии *SANB-21*

Таблица 4.1

Технические характеристики актуаторов *SFK SANB-21*

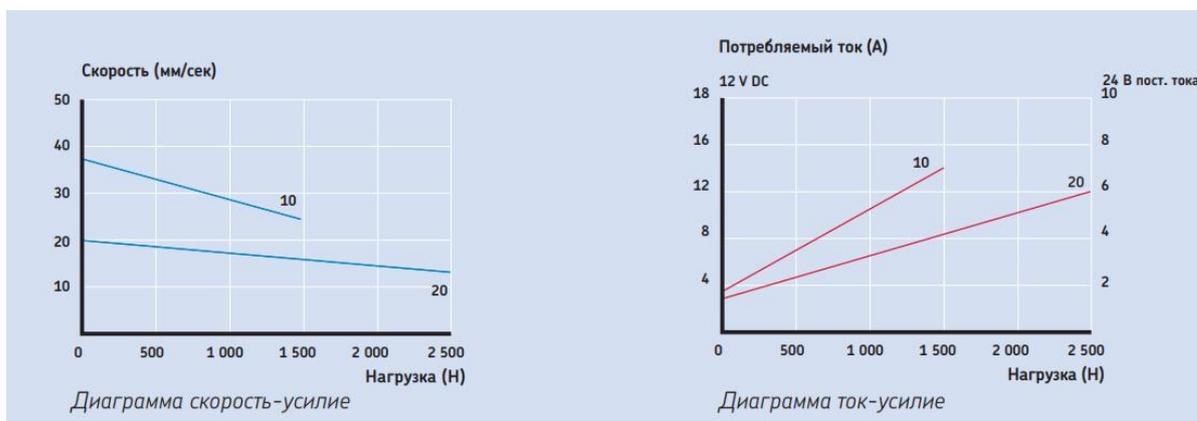
Грузоподъемность, Н	2300
Максимальная скорость, мм/с	42-65
Длина хода и длина во втянутом состоянии, мм	610/1002
Точность позиционирования, мм	0,5
Рабочее напряжение, В	12/24
Потребляемый ток, А	16/8
Масса, г	5500
Температуры окружающей среды, °С	от -40 до +85

Каждый актуатор оснащён потенциометром, что позволяет контролировать длины звеньев манипулятора и при реализации программных законов движения системой управления организовать обратную связь.

Данные движители не имеют внутренней системы управления, но оснащены датчиком обратной связи, для определения состояния актуатора [3]. Управление актуатором происходит аналогично управлению обычным электродвигателем постоянного тока, с тем отличием, что длина штока ограничивает рабочий режим актуатора. Номинальное напряжение привода актуатора составляет 12 В (24 В), но

может регулироваться за счет изменения управляющего ШИМ-сигнала. Направление движения штока зависит от полярности подаваемого напряжения. В подсистеме управления электроприводами изменение полярности и усиление ШИМ-сигнала, поступающего от микроконтроллера, осуществляется схемами мостовых усилителей мощности.

Из графиков зависимости (рисунок 4.3) видно, что при увеличении нагрузки на актуатор, скорость его работы уменьшается и требуется большее напряжение.



а)

б)

а) скорости от нагрузки, б) электрического тока от нагрузки

Рисунок 4.3 - Графики зависимости

4.1.1. Стендовое оборудование и практическая реализация системы позиционного управления манипулятором-триподом

Для реализации координатного позиционного управления, отработки движений и настройки системы управления, а также для исследования запаздывания системы создана экспериментальная установка, состоящая из манипулятора-трипода (рисунок 4.1), блока контроллеров управления актуаторами (рисунок 4.4, в) и пульта управления (рисунок 4.4, а).

Внешний вид устройства управления погрузочным манипулятором, согласно схемы по рисунку 2.12 из главы 2, представлен на рисунке 4.4 а), устройство считывания и задания управляющих сигналов на базе микроконтроллера *ATmega 328*, размещенного непосредственно на станине

задающего механизма (рисунок 4.4, б). Блок формирования управляющих ШИМ-сигналов на исполнительные приводы (рисунок 4.4, в) на базе микроконтроллера *Atmega 2560* размещен непосредственно на шасси манипулятора.



а)



б)



в)

а) внешний вид устройства ручного управления; б) устройство считывания и задания управляющих сигналов; в) блок формирования ШИМ-сигналов на исполнительные приводы

Рисунок 4.4 – Система позиционного управления манипулятором-триподом

Обмен данными между микроконтроллерами *ATmega 328* и *ATmega 2560* осуществляется по радиоканалу на частоте 433 МГц.

Высокая частота радиоканала обеспечивает устойчивость канала данных к производственным электромагнитным помехам.

Устройство ручного управления (рисунок 4.4, а) выполнено в виде пространственного механизма, подобного исполнительному механизму манипулятора. Задающее устройство представляет собой поступательную пару звеньев 1 и 2 (рисунок 4.5). На подвижной рейке 2 закреплена фрикционная дорожка 3, по которой обкатывается колесо 4 потенциометра 5. На концах звеньев 1 и 2 предусмотрены шарнирные узлы 6.

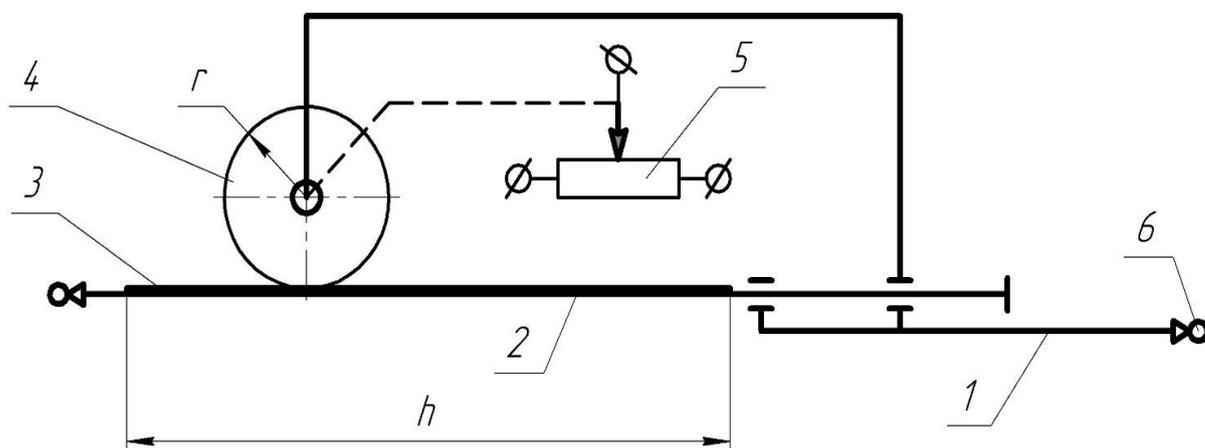


Рисунок 4.5 – Кинематическая схема управляющего устройства задающего механизма

Радиус колеса потенциометра $r = 22$ мм рассчитан таким образом, что ход подвижной рейки $h = 2\pi r$.

Пульт управления представляет собой набор потенциометров с сопротивлением 22 кОм. Ход потенциометров составляет $h = 40$ мм, тогда как при $l_{min} = 1002$ мм, $l_{max} = 1612$ мм ход штока актуатора составляет $\Delta l = 610$ мм. Отсюда несложно подсчитать коэффициент подобия $\lambda = \Delta l / h = 15,2$.

Следовательно, задав положение потенциометра 1 в положении 20 мм, шток актуатора 1 выдвигается на $\Delta l = h \cdot \lambda = 20 \cdot 15,2 = 304$ мм. В пульте управления

использовались ползунковые потенциометры с линейной характеристикой (тип А).

В качестве микроконтроллерного блока управления используется микрокомпьютер на основе контроллера *ATmega2560* - *Arduino Mega 2560* (рисунок 4.6). *Arduino Mega* может получать питание как через подключение по *USB*, так и от внешнего источника питания. Источник питания выбирается автоматически.



Рисунок 4.6 – Внешний вид микрокомпьютера *Arduino Mega 2560*

Таблица 4.2

Краткие характеристики *Arduino Mega 2560*

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	54 (14 из которых могут работать также как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
Флеш-память	256 КВ (из которых 8 КВ используются для загрузчика)
ОЗУ	8 КВ
Энергонезависимая память	4 КВ
Тактовая частота	16 МГц

Внешнее питание подается от аккумуляторной батареи 12 В. На платформе *Mega 2560* имеется 16 аналоговых входов, каждый разрешением 10 бит (т.е. может принимать 1024 различных значения), а также цифровые входы.

Запись регистрируемых параметров–текущих положений осуществляется также встроенными средствами микроконтроллера. Все данные сохраняются в отдельный файл на ПК через *USB*-подключение.

Контроллер управления актуатором (рисунок 4.7) собран на мощных биполярных транзисторах. Скорость вращения ротора электродвигателя постоянного тока задается управляющим ШИМ-сигналом. Контроллер обеспечивает максимальную нагрузку до 10 А на каждый двигатель.

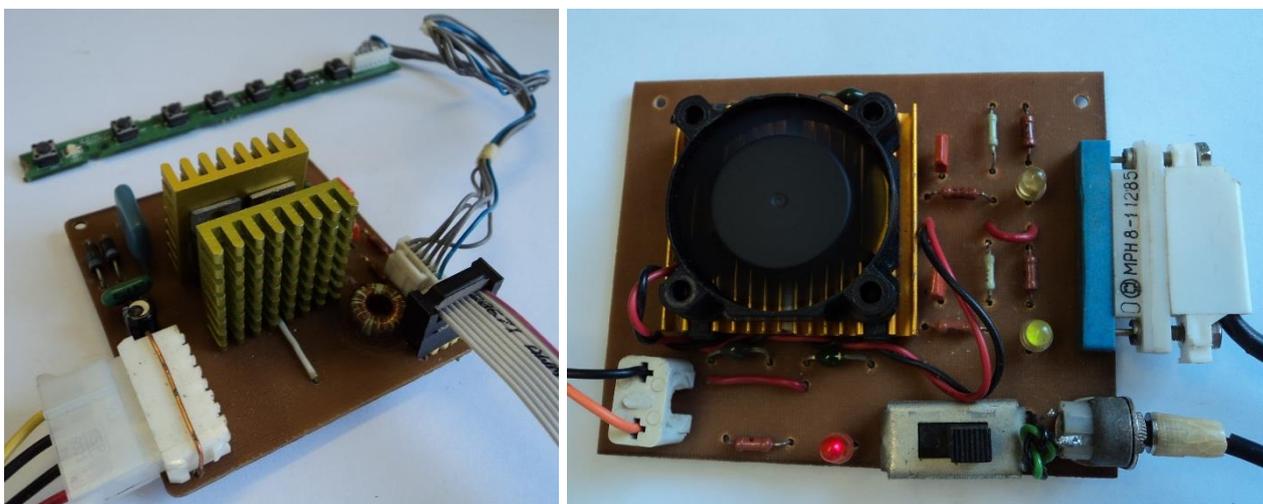


Рисунок 4.7 – Платы контроллеров управления актуатором

Принципиальная схема подключения к плате контроллера управления электродвигателей актуаторов представлена на рисунке 4.8.

Алгоритм управления манипулятором реализован на языке *C#* в среде *Arduino IDE* (приложение 7, приложение 8).

Среда разработки *Arduino* – *Arduino IDE* (рисунок 4.9) состоит из встроенного текстового редактора программного кода, области сообщений, окна вывода текста(консоли), панели инструментов с кнопками часто используемых команд и нескольких меню. Для загрузки программ и связи среда разработки подключается к аппаратной части *Arduino*.

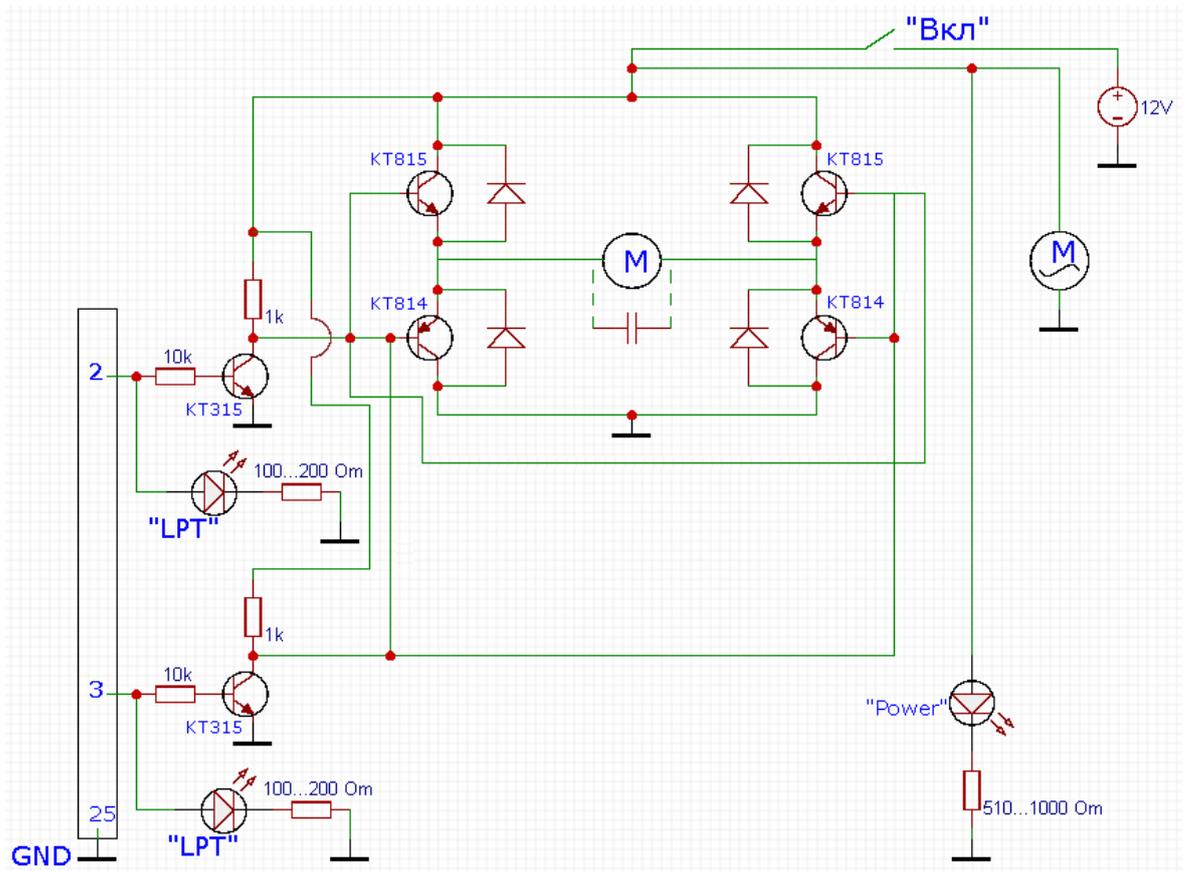


Рисунок 4.8 – Электрическая принципиальная схема платы контроллера управления

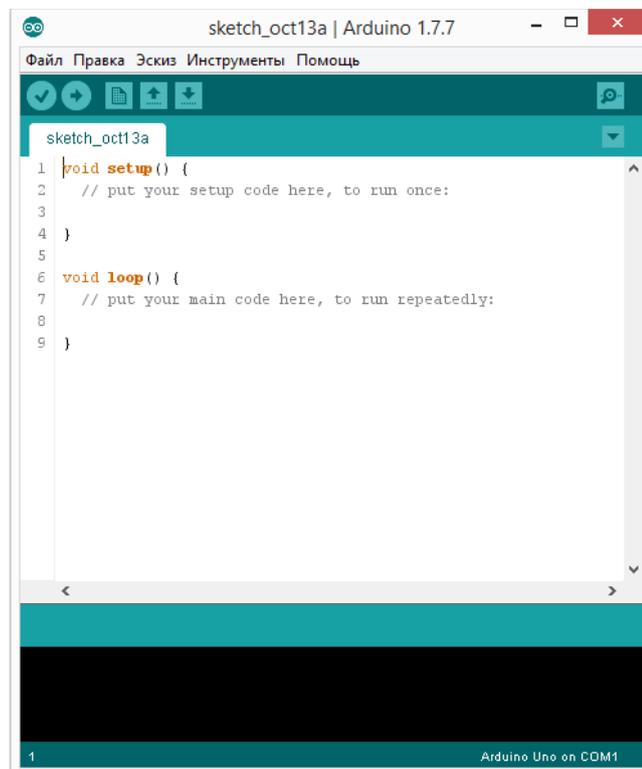
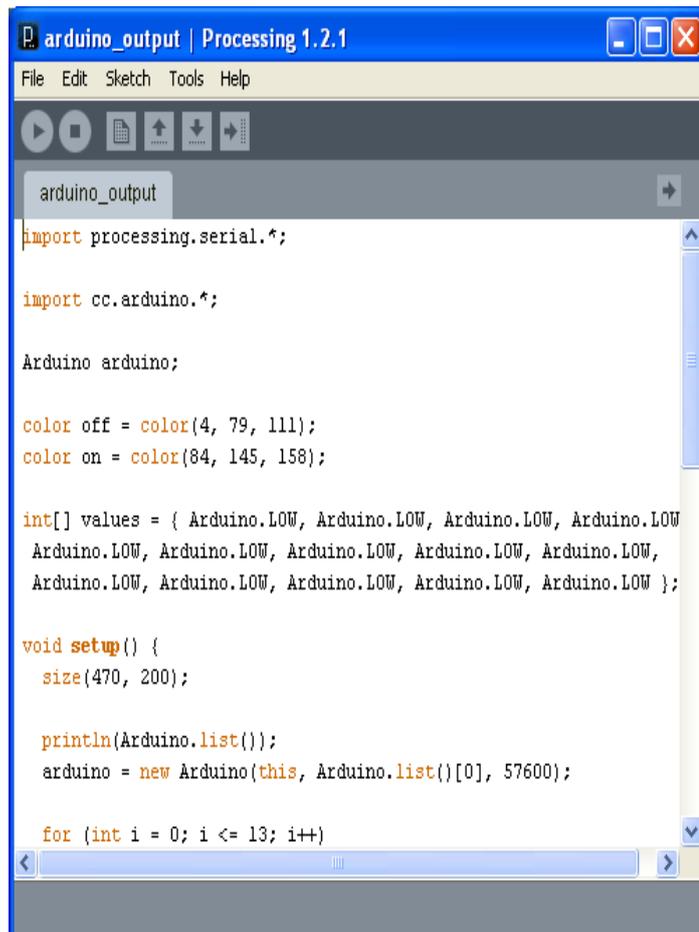


Рисунок 4.9 – Среда разработки Arduino

Также для программирования микрокомпьютера *Arduino* используется среда *Processing* (рисунок 4.10). *Processing* является языком программирования для создания визуализаций с помощью платформы *Java Virtual Machine* и позволяет быстро создавать интерактивные программы отображения изображений и анимации. Из *Processing*-а можно общаться с микроконтроллером *ATmega*, при помощи протокола *Firmata*.



```

arduino_output | Processing 1.2.1
File Edit Sketch Tools Help

arduino_output
import processing.serial.*;

import cc.arduino.*;

Arduino arduino;

color off = color(4, 79, 111);
color on = color(84, 145, 158);

int[] values = { Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW,
Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW,
Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW, Arduino.LOW };

void setup() {
  size(470, 200);

  println(Arduino.list());
  arduino = new Arduino(this, Arduino.list()[0], 57600);

  for (int i = 0; i <= 13; i++)

```

Рисунок 4.10 - Среда разработки Processing

Программно-аппаратный комплекс системы позиционного управления (рисунок 4.11) функционирует следующим образом: сигналы от задающего устройства через коммутационную схему поступают на платформу *Arduino ATmega*, где посредством программы через радиоканал поступает на микроконтроллер *ATmega 2560* через *COM*-интерфейс и программу управления в

среде *Processing*. Управляющие ШИМ-сигналы формируются в зависимости от задаваемых траекторий перемещения груза и законов движения по траектории. Сформированные ШИМ-сигналы посредством мостовых усилителей реализовывают движение исполнительных электроцилиндров.

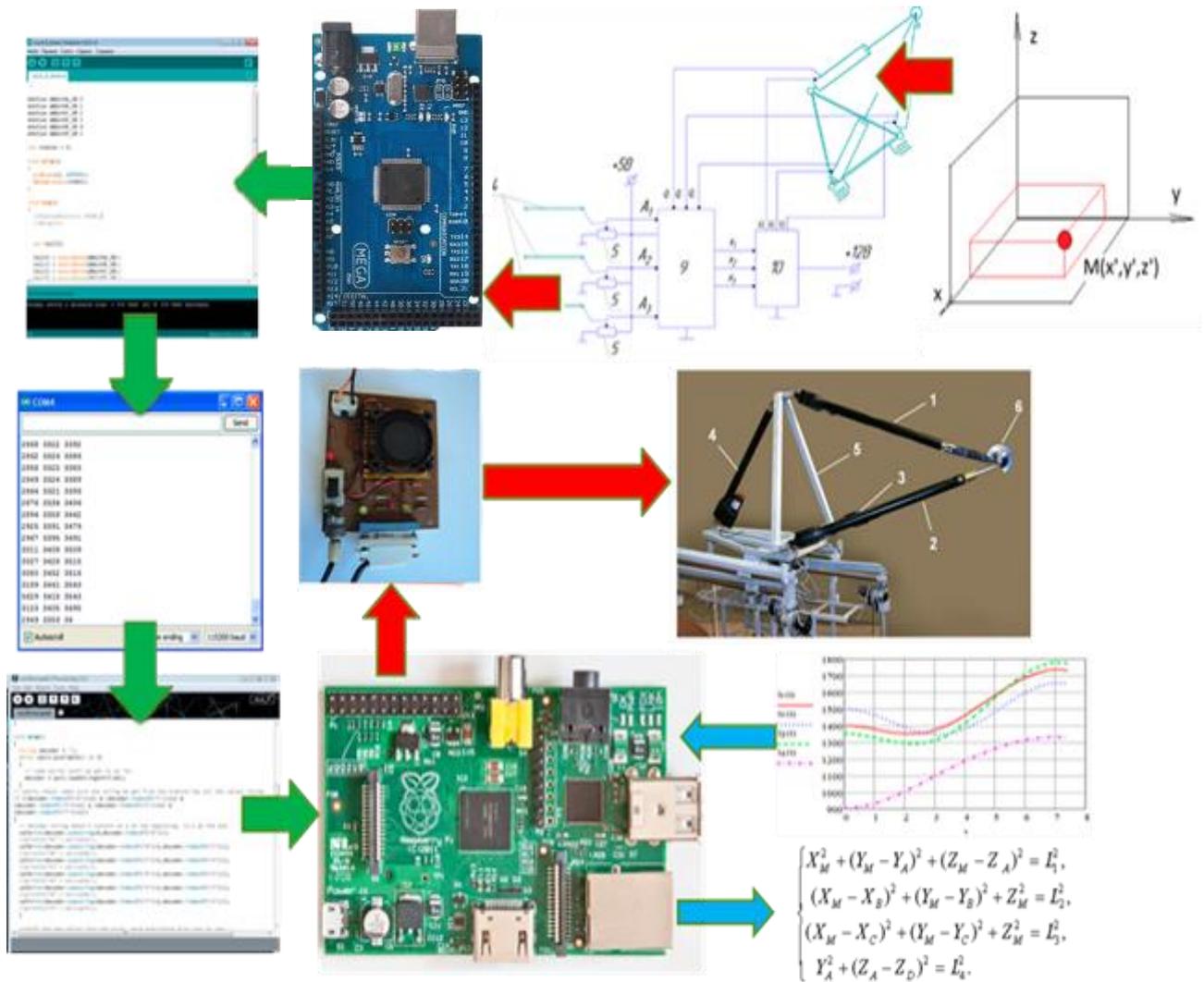


Рисунок 4.11 – Схема функционирования программно-аппаратного комплекса позиционного управления манипулятором

4.2. Методика проведения экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований предполагала следующие этапы:

- 1) Перемещение захвата с грузом по заданной траектории:

- а) опытным оператором;
 - б) неопытным оператором.
- 2) Перемещение захвата с грузом по заданной траектории:
- а) по криволинейной траектории из начальной точки M_0 в конечную точку позиционирования M_k ;
 - б) по прямолинейной траектории из начальной точки M_0 в конечную точку позиционирования M_k .
- 3) Задание начальной и конечной точек позиционирования с помощью устройства управления и дальнейшее перемещение груза в автоматическом режиме по заданному закону программного движения. Оценка колебаний груза на подвесе после остановки точки подвеса.

В процессе экспериментальных исследований фиксировались посредством АЦП, встроенного в микроконтроллер *ATmega 2560*:

- текущие координаты штока каждого актуатора исполнительного механизма;
- время движения каждого актуатора исполнительного механизма;
- текущие координаты штоков задающего устройства;
- время управляющего воздействия на каждую степень подвижности.

4.3. Оценка точности позиционирования и воспроизведения траекторий по парциальным движениям манипулятора

При экспериментальных исследованиях эргатической системы управления оператором задавались управляющие воздействия, при этом идеальное отслеживание траектории возможно только при условии, что скорость управляющего воздействия меньше максимально возможной скорости перемещения штока актуаторов. Для оценки ошибок позиционирования и точности отслеживания заданной траектории исполнительным механизмом необходимы значения скоростей управляющих воздействий, поэтому регистрировалось время управляющего воздействия t' и время работы

исполнительного привода t . Т.е. скорость управляющего воздействия и исполнительного привода определялись соответственно

$$\begin{aligned} V_{y_i} &= \frac{dl'_i}{dt'}, \\ V_{H_i} &= \frac{dl_i}{dt}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Для оценки точности позиционирования и точности воспроизведения траектории рассматривались кусочные движения манипулятора.

Так как электроцилиндры трипода идентичны по типоразмеру, мощности и скоростным параметрам, рассмотрены движения одного актуатора.

Как видно из графиков, полученных в результате экспериментальных исследований, при скорости перемещения штока задающего устройства равной или меньшей максимально возможной скорости исполнительного актуатора ($V_y \leq V_H$) наблюдается практически полное копирование задающего движения (рисунок 4.12). При увеличении скорости управляющего воздействия (рисунок 4.13) наблюдается запаздывание исполнительного механизма. Это возникает потому, что скорость управляющего воздействия значительно выше скорости исполнительных актуаторов.

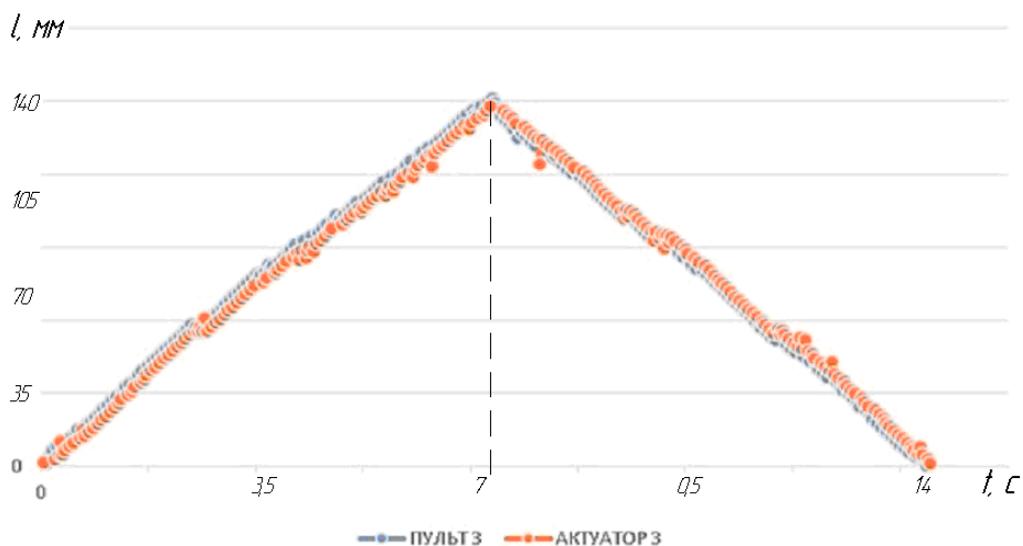


Рисунок 4.12 - Графики перемещения штоков задающего устройства и

исполнительного актуатора при $V_y/V_H \leq 1$

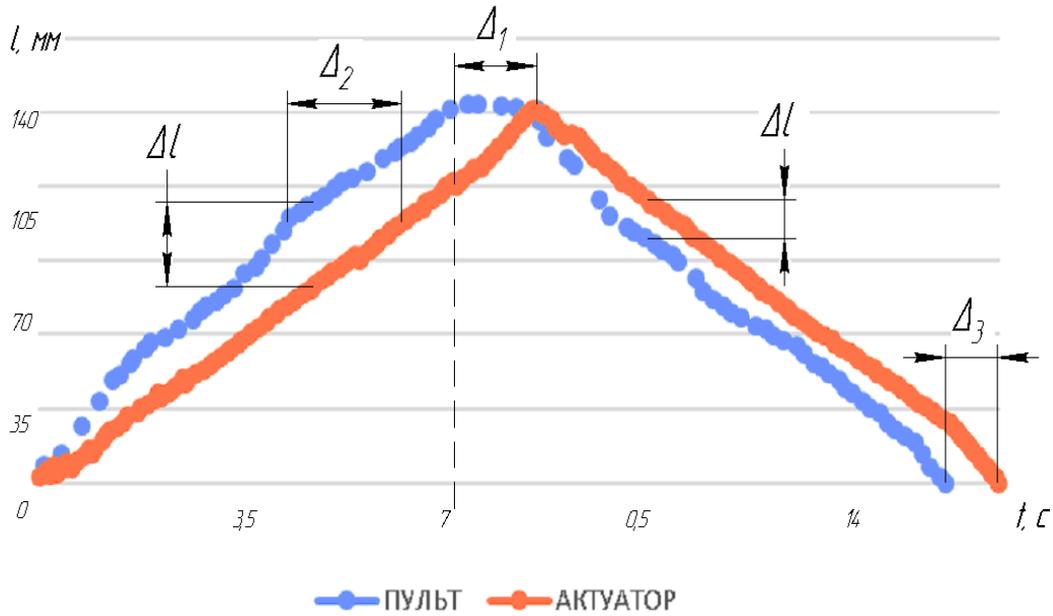


Рисунок 4.13 – Графики перемещения штоков задающего устройства и исполнительного актуатора при $V_y/V_H \geq 1$

При этом, при увеличении отношения скоростей V_y/V_H ошибки позиционирования (рисунок 4.14) и отклонение фактической траектории от заданной (рисунок 4.15) только увеличиваются.

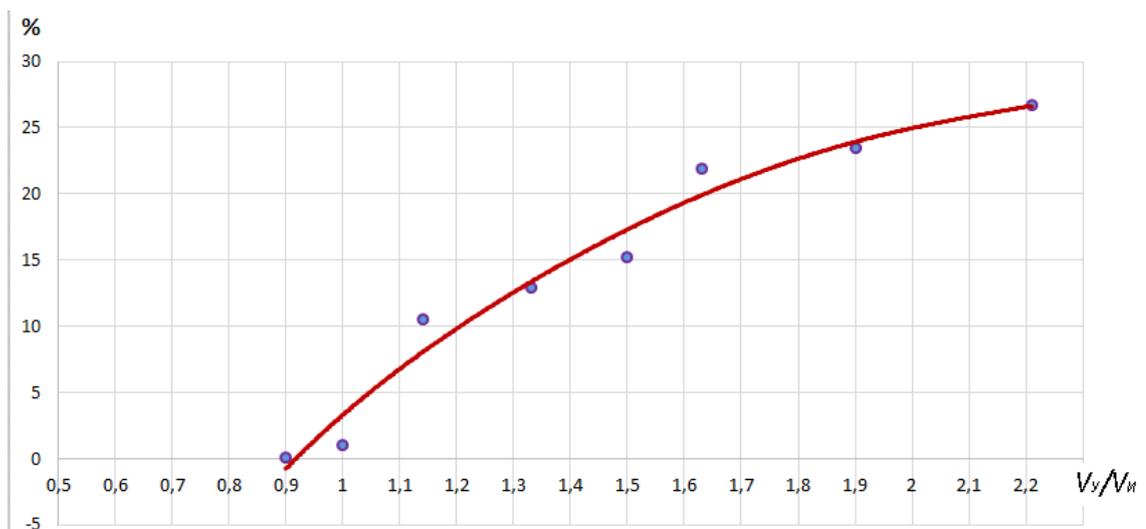


Рисунок 4.14 – Зависимость ошибки позиционирования (Δ_1) от отношения скоростей задающего устройства к исполнительному

При значениях $V_y/V_H \leq 1$ ошибки позиционирования составляют 0,1...1,8%, а отклонение фактической траектории от задаваемой - не более 3,4% при $V_y/V_H = 1$ и 0,4% при $V_y/V_H \leq 0,6$ (рисунок 4.15).

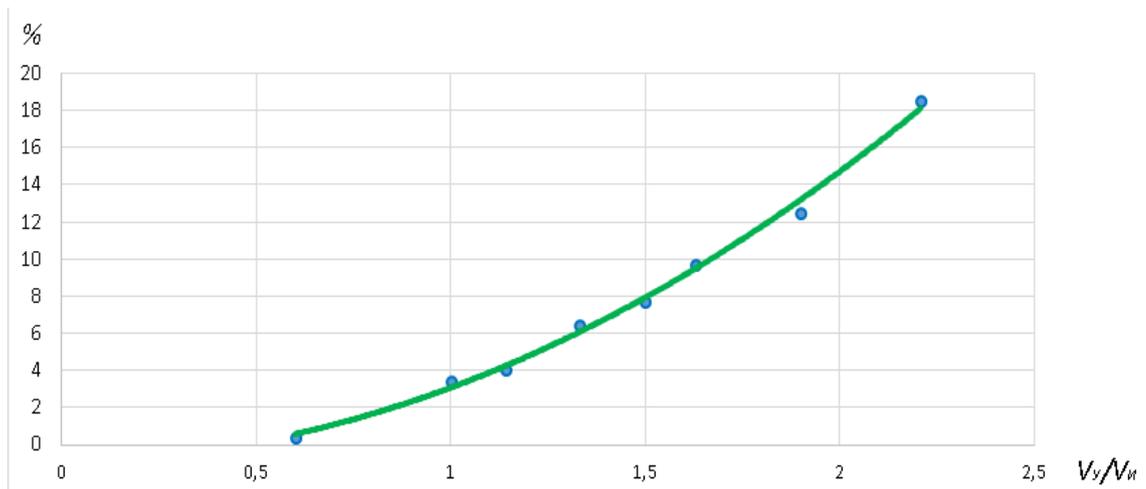


Рисунок 4.15 - Зависимость ошибки отклонения фактической траектории от задаваемой от отношения задающего устройства к исполнительному, %

В том случае, когда скорость управляющего воздействия в 1,5 раза превышает максимально возможную скорость штока актуатора - ошибки позиционирования возрастают до 15% и более (рисунок 4.14). Отклонение фактической траектории от задаваемой при $V_y/V_H = 1,5...2$ составляет 8...20%, что уже недопустимо для большинства технологических процессов погрузочно-разгрузочных работ. Поэтому максимальные скорости перемещения штоков управляющего устройства не должны быть выше максимально возможных скоростей исполнительных актуаторов. При этом следует учитывать, что увеличение нагрузки на исполнительные актуаторы снижает скорость штоков. Для актуаторов SKF САНВ-21 максимальная скорость штоков без нагрузки составляет 65 мм/с, а при максимальной нагрузке в 2300 Н – 45 мм/с [71]. Следовательно, для исполнительных механизмов погрузочных манипуляторов с данными актуаторами SKF скорость перемещения задающего устройства не

должна превышать 45 мм/с. Область допустимых скоростей управления такими актуаторами в зависимости от погрузки представлена на рисунке 4.16.

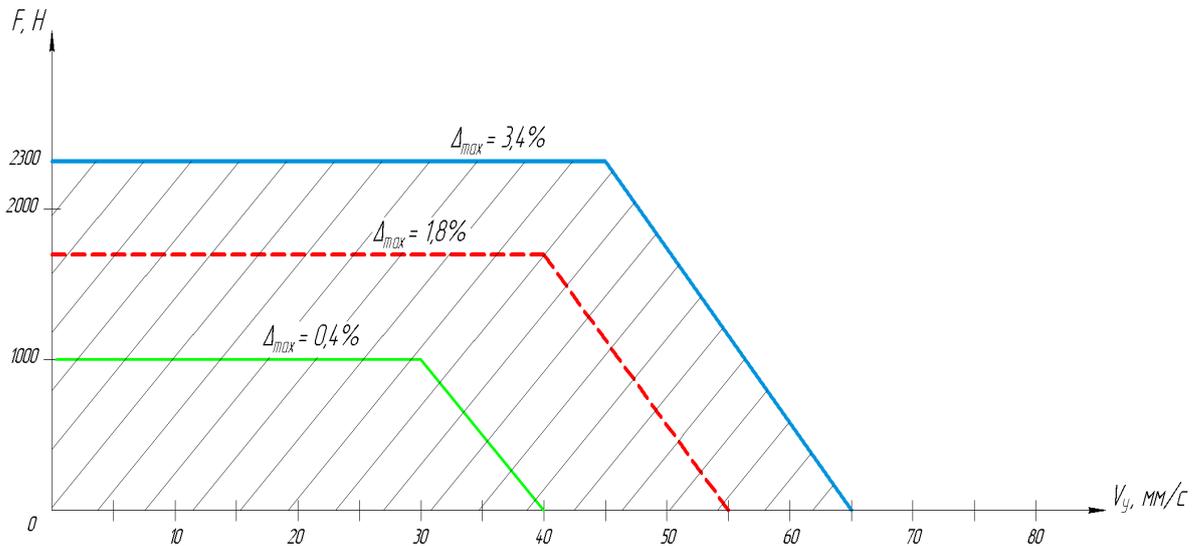


Рисунок 4.16 - Области допустимых скоростей управления актуаторами SKF САНВ-21

Интерес представляет и зависимость времени запаздывания исполнительного механизма от отношения скоростей штоков задающего устройства к штоку актуатора (рисунок 4.17).

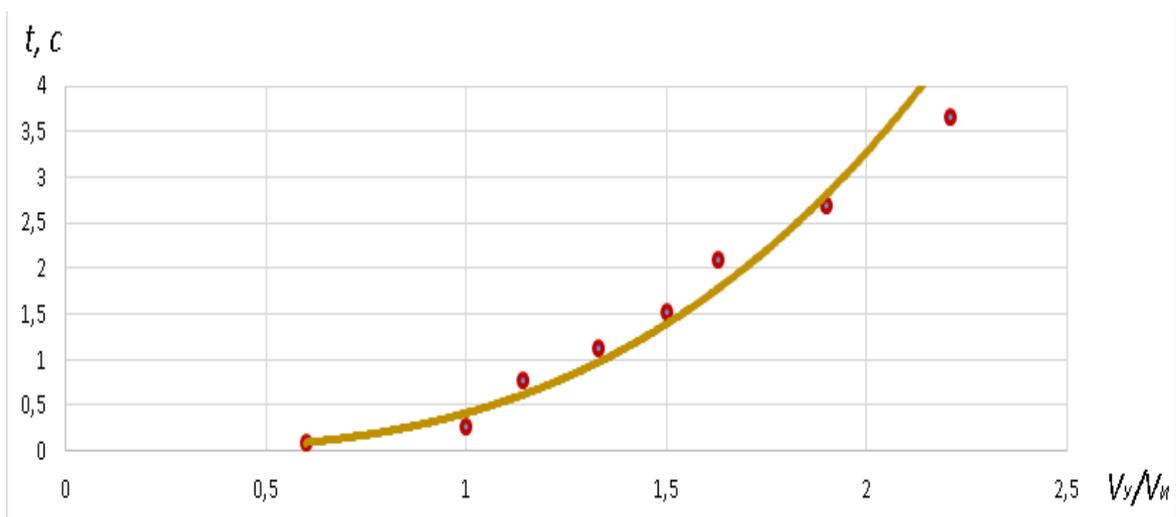


Рисунок 4.17 - Зависимость времени запаздывания исполнительного механизма от отношения скоростей задающего механизма к исполнительному, $t, с$

При соотношении $V_y/V_H = 1$ время запаздывания составляет 0,35с, с увеличением V_y/V_H до 1,5...2 это время уже будет составлять от 1,52 до 3,65 с. Это довольно значительное запаздывание, что еще раз подтверждает необходимость ограничения управляющих скоростей, тем более при погрузочно-разгрузочных работах с участием человека к этому времени запаздывания прибавится еще и время реакции оператора.

Для реализации прямолинейной траектории захвата необходима согласованная работа практически всех приводов трипода, причем с разными скоростями штоков цилиндров.

При перемещении схвата с грузом по прямой траектории шток актуатора движется неравномерно (рисунок 4.18). Как видно из графика, максимальные отклонения задаваемой траектории от фактической составляют $\Delta l_{max} = 0,2\%$, а ошибка позиционирования $\Delta_{max} = 1\%$.

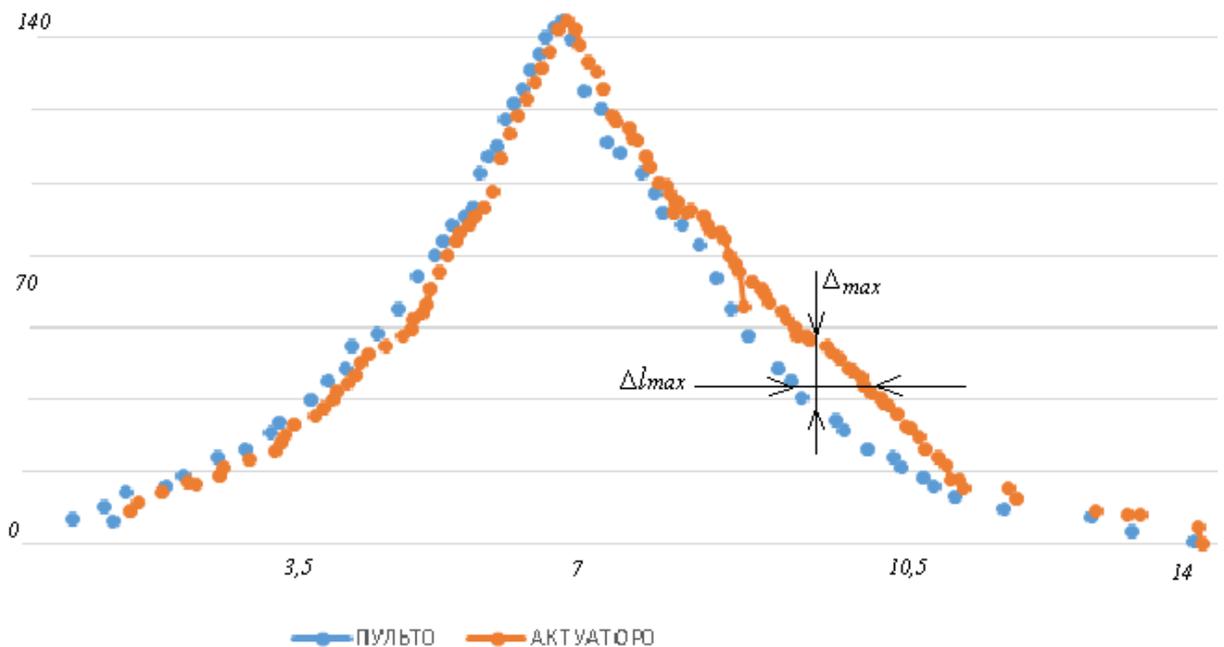


Рисунок 4.18 - Движение штоков задающего устройства и исполнительного актуатора при обработке прямолинейной траектории при $V_y/V_H \leq 1$

4.4. Оценка ошибок позиционирования от опытности оператора

Одна из главных функций манипулятора - это операция позиционирования. При этом задается точность, которую должен обеспечивать манипулятор при позиционировании в заданной конечной точке, несмотря на устройство механизма или другие влияющие факторы.

В эксперименте по определению эффективности систем управления принимали 3 человека. Перед экспериментом все испытуемые были проинструктированы об особенностях управления, был объяснен принцип управления. Каждый участник эксперимента для себя провел тренировочные попытки управления манипулятором.

Эксперимент проводился в трехкратной повторности для каждого участника.

Усредненная ошибка позиционирования оценивалась как

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{des} - x_i)^2}, \quad (4.2)$$

где N – число измеряемых точек; x_{des} и x_i - желаемое и текущее положение схвата, соответственно.

Графическое представление ошибок представлено на рисунке 4.19.

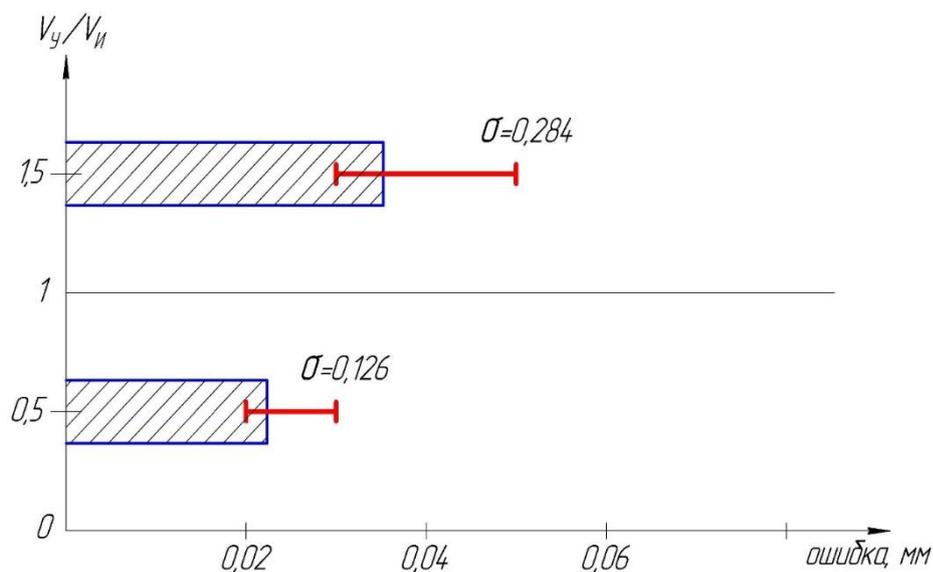


Рисунок 4.19 – Усредненные ошибки позиционирования

Режим управления при скоростях управляющих воздействий $V_y/V_H \geq 1$ позволяет обеспечить наибольшую производительность, но с большой погрешностью позиционирования, в то время как управление при отношении скоростей $V_y/V_H \leq 1$ существенно позволяет повысить точность позиционирования и копирования заданной траектории.

4.5. Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Сравнивая теоретические (рисунок 3.12) и экспериментальные (рисунок 4.12) кривые видно, что при отношении скорости управляющего воздействия V_y к скорости исполнительного звена V_H $\left(\frac{V_y}{V_H} \leq 1\right)$ расхождение теоретических и экспериментальных данных составляет 2,86% (рисунок 4.20).

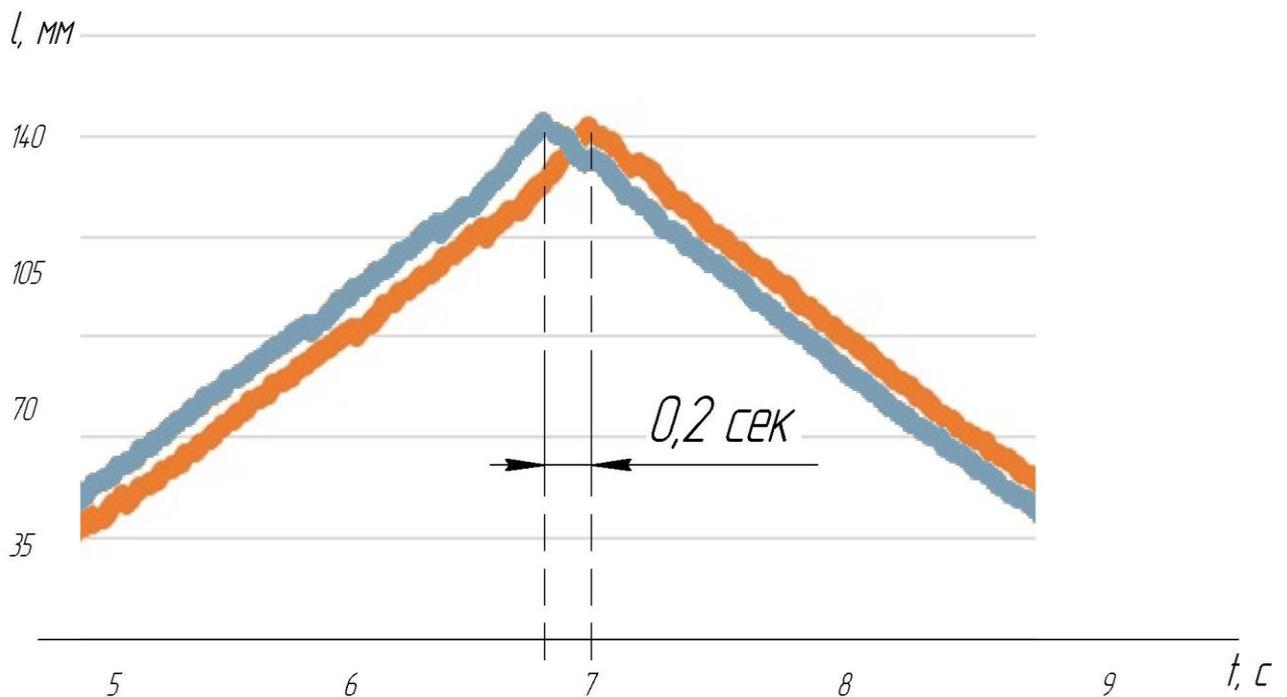


Рисунок 4.20 – Сравнение теоретических и экспериментальных данных перемещения штока электроцилиндра

4.6. Оценка эффективности управления и повышения производительности манипулятора-трипода с позиционной системой управления

Оценка производительности погрузочного агрегата с манипулятором параллельно-последовательной кинематической структуры проводилась на цикле одной операции погрузки груза, согласно технологическому процессу, представленному на схеме по рисунку 2.5.

За критерий оценки производительности принято отношение произведения массы груза m и длины траектории S_{Σ} к общему времени T_{Σ} на перемещение груза и позиционирование рабочего оборудования [62]

$$P = m \cdot \frac{S_{\Sigma}}{T_{\Sigma}}, \left[\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \quad (4.3)$$

По сути, выражение (4.3) показывает среднюю скорость перемещения груза на цикле технологической операции. Чем меньше время перемещения груза на одной и той же длине траектории, тем больше показатель производительности.

Данный показатель имеет технологические ограничения, обусловленные кинематическими параметрами электроцилиндра

$$\frac{P}{m} \leq V_{\max}, \quad (4.4)$$

где V_{\max} - максимально возможная скорость перемещения груза по траектории.

Для заданной прямолинейной траектории перемещения груза погрузочным манипулятором при использовании позиционной системы управления показатель производительности на заданном участке составил $P_1=16$ кг·м/с. В то время как при перемещении груза по той же траектории, но управляя каждой степенью подвижности манипулятора этот показатель равен $P_2=13$ кг·м/с (рисунок 4.21).

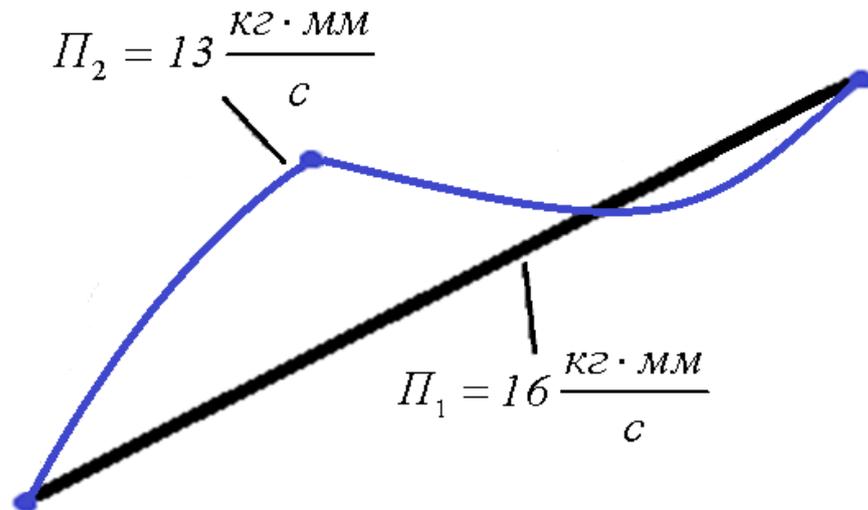


Рисунок 4.21 – Прямолинейная траектория перемещения груза

Таким образом эффективность предложенной позиционной системы управления по сравнению с традиционной ручной системой управления составляет 18,75%. Это достигается за счет сокращения времени перемещения груза T_{Σ} .

Для измерения амплитуды колебаний траверсы к сферическому шарниру прикреплен потенциметрический датчик (рисунок 4.22), входным сигналом которого является угловое перемещение контактного ползунка, а выходным – напряжение, которое можно снять с этого контакта.

Основное преимущество такого датчика состоит в том, что он обеспечивает высокую точность и стабильность функции преобразования, а также имеет малое значение переходного сопротивления, низкий уровень собственных шумов, небольшой коэффициент сопротивления.

Проведена тарировка датчика, в соответствии со способами представления зависимостей метод сглаживания был представлен графически. Он базируется на фундаментальном методе сглаживания – методе наименьших квадратов. В основе этого метода лежит принцип максимума правдоподобия: наиболее вероятное положение линии – графика функциональной зависимости – соответствует минимуму суммы квадратов отклонений от нее опытных точек.

Рассмотрим применение способа наименьших квадратов для выбора функции в виде линейной зависимости, проходящей через начало системы

координат, $y=ax$. В этом случае по массиву экспериментальных данных необходимо определить параметр a , характеризующий угол наклона прямой к оси абсцисс.

Согласно теории наименьших квадратов наименьшее отклонение его вычисленных значений, полученных при опыте, будет тогда, когда

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)^2 = \min, \quad (4.5)$$

где n – число опытных точек, y_i и ax_i – соответственно действительные и вычисленные значения ординат.

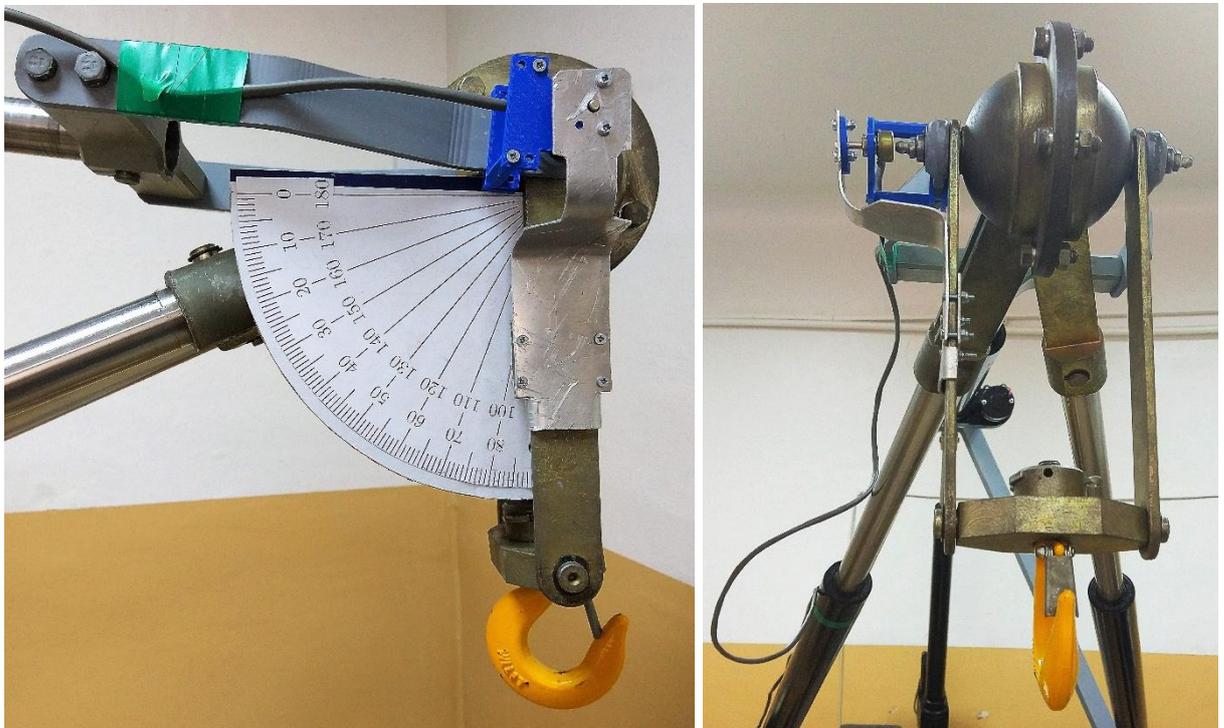


Рисунок 4.22 – Датчик регистрации колебаний траверсы

Минимум функции имеет место тогда, когда первая производная от нее по аргументу равна нулю, а вторая производная положительна. Аргумент рассматриваемой функции в данном случае – параметр a . Задача состоит в том, чтобы из всех возможных значений параметра найти такое, при котором выполнялось бы условие (4.5). Для этого берем частную производную от функции (4.5) по параметру a и приравниваем к нулю полученное выражение:

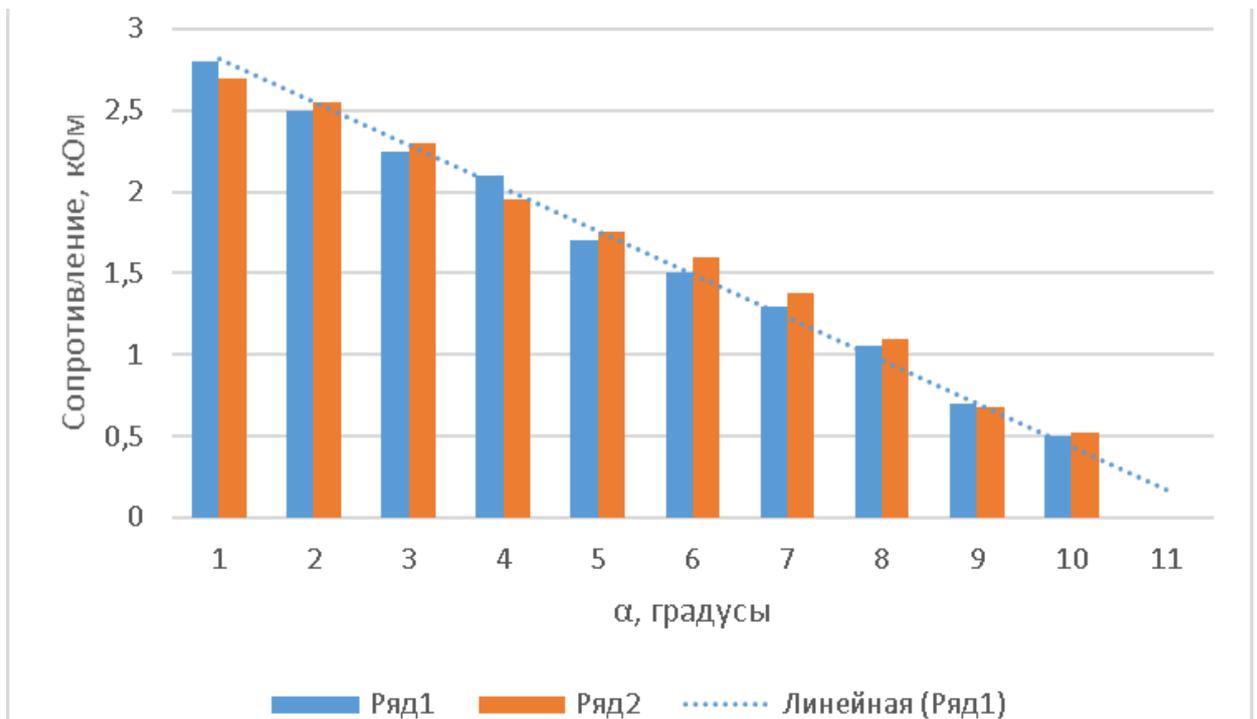
$$\frac{\partial}{\partial a} = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)^2 = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i) \cdot (-x_i) = 0, \quad (4.6)$$

откуда

$$a = \sum_{i=1}^n y_i x_i / \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right). \quad (4.7)$$

Подставляя в формулу (4.7) опытные данные x_i , y_i , получим численное значение параметра a .

По тарифовочным данным, полученным в ходе эксперимента, в *MS Excel* строилась аппроксимирующая линейная кривая, а погрешность тарифовки оценивали в программе, написанной на языке программирования *Delphi*.

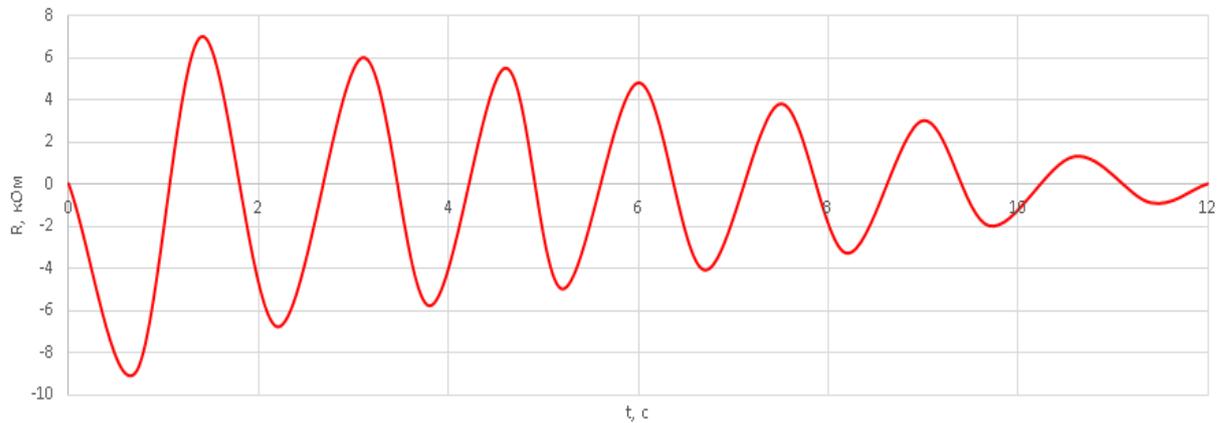


Ряд 1- поворот по часовой стрелке, Ряд 2 – поворот против часовой стрелки

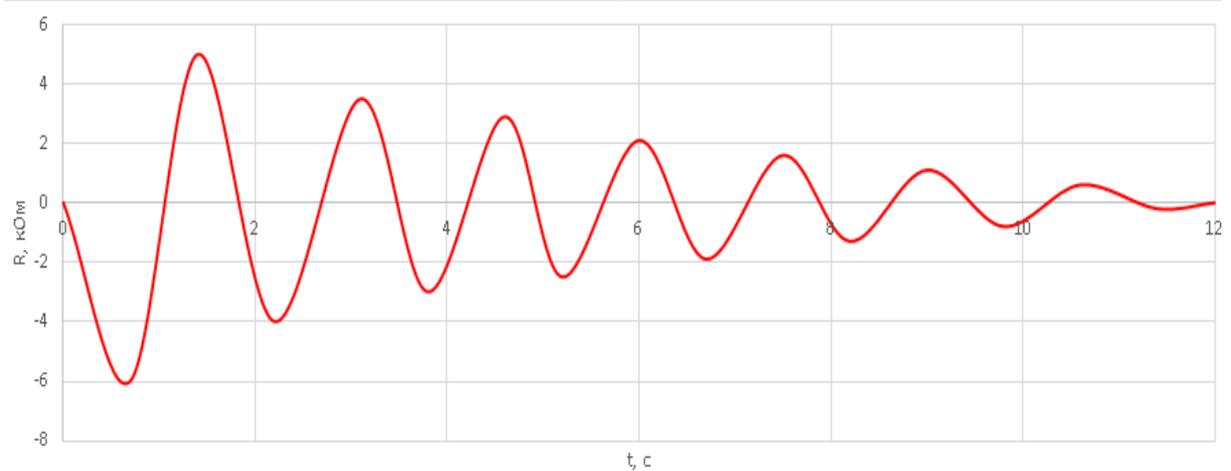
Рисунок 4.23 – Тарифовочный график датчика угла поворота траверсы

Тарифовка датчика проводилась с трехкратным повторением.

Для регистрации колебаний груза на подвесе, показания с реохордного датчика считываются при помощи микрокомпьютера *Arduino* со встроенным АЦП, который, в свою очередь, подключен к программной среде *SFMonitor* (рисунок 4.24) на компьютере с операционной системой *Windows*.



а)



б)

а) опыт 1 (обычный режим остановки), б) опыт 2 (остановка по закону мягкого касания)

Рисунок 4.24 – Листинг программы осциллографа

4.7. Кинематический показатель удобства управления манипулятором-триподом

Одним из показателей эффективности использования манипуляторов различного назначения является угол сервиса ψ – некоторый телесный угол в зоне действия, внутри которого рабочий орган может подойти к точке захвата груза без изменения глобальных или ориентирующих региональных координат (рисунок 4.25).

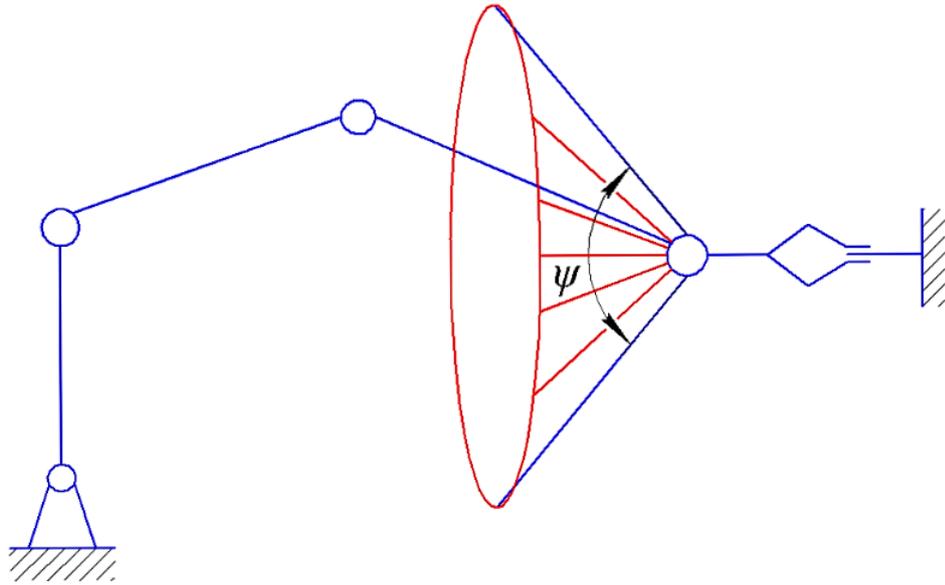


Рисунок 4.25 – Угол сервиса

Для сравнительной оценки рабочих возможностей различных манипуляторов используется понятие среднего коэффициента сервиса, вычисляемого для всей рабочей зоны, по всему ее объему V [30]

$$K_{\theta} = \frac{1}{V} \int K_v dV . \quad (4.8)$$

Коэффициент сервиса характеризует качественную оценку кинематических свойств погрузочного манипулятора и в некоторых случаях может выступать критерием синтеза манипуляторов при выборе структурной схемы [58].

Известно [13], что величина телесного угла ψ определяется отношением площади сферы, вырезанной телесным углом, к квадрату радиуса сферы, поэтому максимальное значение телесного угла

$$\psi_{\max} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ ср (стерадиан)} . \quad (4.9)$$

Отношение $\frac{\psi}{\psi_{\max}} = \theta$ - есть коэффициент сервиса, который может изменяться от 0 до 1 для манипуляторов, действующих в ангулярной системе координат.

В предлагаемой системе управления задающий механизм представляет собой трипод, где рукоять является медианой MK треугольной пирамиды

(рисунок 4.26). Введем понятие угла манипулирования ψ' , по сути являющегося обратным углом сервиса ψ .

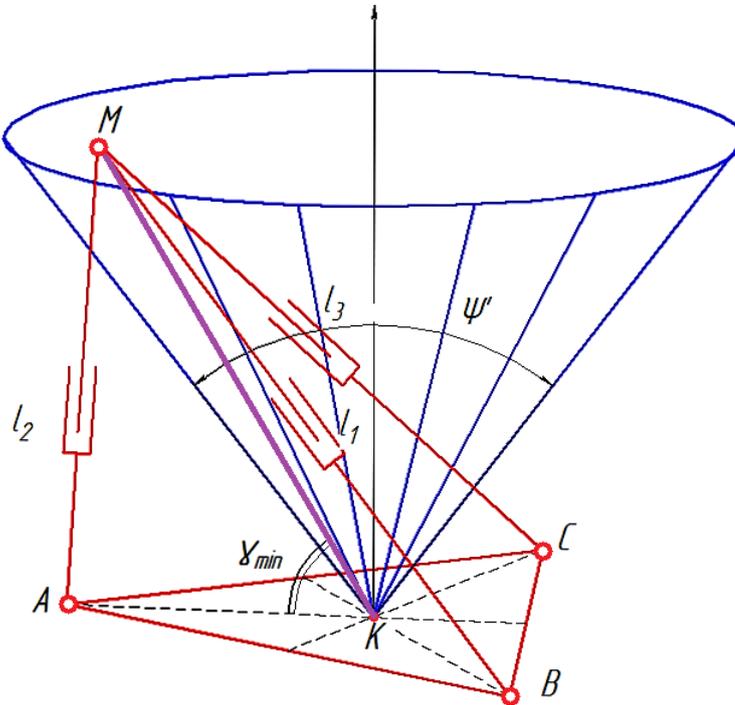


Рисунок 4.26 – К определению угла манипулирования

Рассматривая зону действия манипулятора с пространственным исполнительным механизмом в виде трипода видим, что вершина O телесного угла манипулирования ψ' не находится на звеньях манипулятора. Вершина O будет лежать на линии, проходящей через вершину M треугольной пирамиды задающего механизма и точку пересечения медиан основания пирамиды.

Для устройств управления на основе исполнительного механизма в виде пространственной пирамиды максимальный угол манипулирования определится по выражению (4.9):

$$\psi' = \pi - 2\gamma_{\min} \text{ - угол манипулирования,} \quad (4.10)$$

$$\theta' = \frac{\pi - 2\gamma_{\min}}{4\pi} \text{ - коэффициент манипулирования.} \quad (4.11)$$

Из вышеизложенного явно видно (рисунок 4.27), что при значениях $\psi'_{\max} \rightarrow \psi''_{\max}$ или даже при $\psi'_{\max} > \psi''_{\max}$ будет наблюдаться наилучшее удобство управления манипулятором в пределах телесного угла манипулирования как с

точки зрения оператора, так и с точки зрения устойчивости манипулятора. Поэтому введем дополнительный параметр, характеризующий удобство управления – коэффициент благоприятного управления в пределах телесного угла манипулирования, показывающий эффективность использования объема зоны действия задающего механизма:

$$k_{\psi'} = \frac{S_{\psi'_{xkz}}}{S_{xkz}}, \quad (4.12)$$

где $S_{\psi'_{xkz}}$ - сечение конуса угла манипулирования;

S_{xkz} - сечение зоны обслуживания задающего механизма.

Коэффициент $k_{\psi'}$ можно выразить через объемы

$$k_{\psi'} = \frac{V_{\psi'}}{V_{3.0}}, \quad (4.13)$$

где $V_{\psi'}$ - объем конуса угла манипулирования;

$V_{3.0}$ - объем зоны обслуживания задающего механизма.

По значениям $k_{\psi'}$ можно определять параметры задающего механизма устройства управления для манипуляторов-триподов, примется $k_{\psi'}$ за критерий оптимизации.

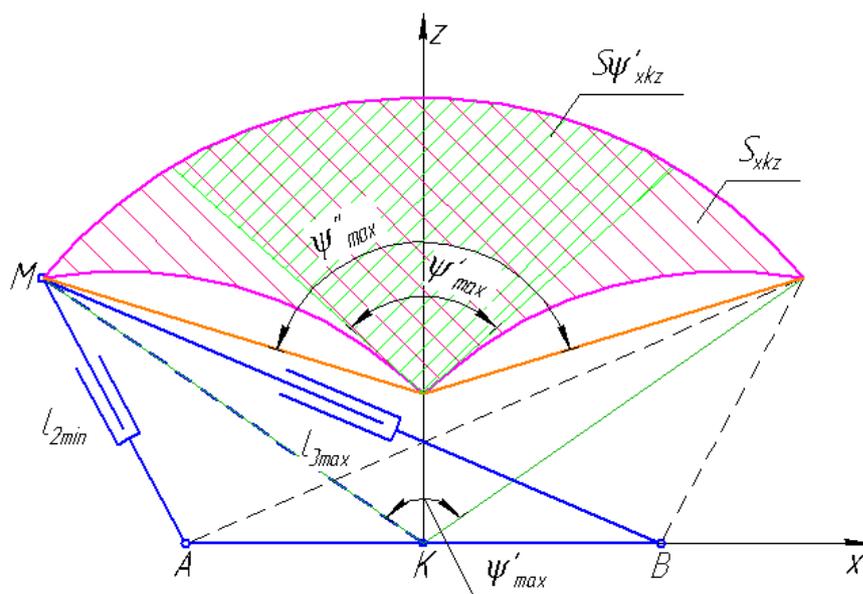


Рисунок 4.27 – К определению площадей сечения сектора манипулирования

Геометрические параметры задающего механизма напрямую связаны с геометрическими параметрами манипулятора-трипода.

Если длины звеньев манипулятора-трипода обозначить за L_i , то длины звеньев задающего механизма устройства управления будут связаны с L_i зависимостью

$$l_i = \lambda L_i, \quad (4.14)$$

где λ – коэффициент подобия (масштабный коэффициент).

Задавшись минимальными l_{min} и максимальными l_{max} значениями длин задающего трипода длина рукояти определится по зависимости (рисунок 4.28)

$$MK = \frac{1}{2} \sqrt{l_{min}^2 + l_{max}^2 + 2l_{min} \cdot l_{max} \cdot \cos(180 - \delta - \beta)} \quad (4.15)$$

угол β определится из выражения (4.16)

$$\sin \beta = \frac{l_{min} \cdot \sin \delta}{0,5 \sqrt{2l_{min}^2 + 2l_{max}^2 - a^2}}. \quad (4.16)$$

Тогда

$$\psi' = \frac{\pi - 2\beta_{min}}{4\pi}. \quad (4.17)$$

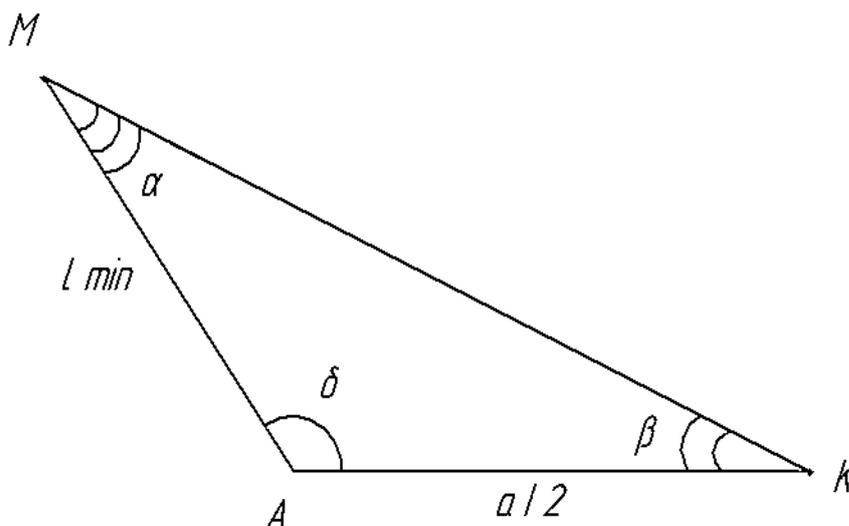


Рисунок 4.28 – К определению геометрических параметров задающего механизма

Таким образом введенное понятие угла манипулирования может служить одним из критериев проектирования задающего механизма управления манипуляторов-триподов. Для предложенной системы управления моделью манипулятора-трипода коэффициент подобия $\lambda=15,2$, при этом угол манипулирования составляет $\psi'=68,5^\circ$.

Выводы по главе

Представлена методика и средства практической реализации позиционной системы управления погрузочного манипулятора-трипода. Разработан алгоритм формирования программы управления актуаторами погрузочного манипулятора в зависимости от заданной погрешности отклонения от воспроизводимой траектории.

Приведены результаты экспериментальных исследований позиционной системы управления погрузочным манипулятором-триподом.

Проведен анализ оценки точности позиционирования и воспроизведения траекторий по парциальным движениям манипулятора.

На основе экспериментальных данных получены зависимости ошибок позиционирования и отклонения от заданной траектории при различных отношениях скоростей управляющего воздействия к скорости исполнительного цилиндра. Также была произведена оценка ошибок позиционирования от опытности оператора. Найдена усредненная ошибка позиционирования и определены режимы управления при скоростях управляющих воздействий, позволяющие обеспечить наибольшую производительность в пределах допустимой ошибки позиционирования груза. Сформулированы рекомендации, позволяющие повысить точность позиционирования и копирования заданной траектории. Получена зависимость скорости исполнительного органа от скорости управляющих воздействий на задающее устройство в зависимости от задаваемого допустимого отклонения от траектории.

Проведена оценка эффективности использования позиционной системы управления на погрузочно-разгрузочных операциях по двум критериям. За первый критерий принята производительность погрузочного агрегата с манипулятором параллельно-последовательной кинематической структуры, а за второй – кинематический показатель удобства управления.

Разработанная система управления позволяет повысить удобство управления и производительность погрузочно-разгрузочных работ со штучными грузами до 11,3% при перемещении по прямолинейным траекториям.

Предложен показатель, характеризующий удобство управления - коэффициент благоприятного управления в пределах телесного угла манипулирования, показывающий эффективность использования объема зоны действия задающего механизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа ранее проведенных исследований и литературных источников обоснована необходимость разработки методов и алгоритмов полуавтоматического управления погрузочным манипулятором с исполнительным механизмом в виде трипода. Обоснована необходимость снижения инерционных нагрузок в исполнительных приводах при перемещении штучных грузов.

2. Разработан метод и алгоритм копирующего управления исполнительными звеньями манипулятора-трипода, обеспечивающие реализацию перемещения груза по заданной траектории.

3. Разработана динамическая модель манипулятора, позволяющая определять энергозатраты исполнительных приводов при перемещении груза по прямой и по криволинейной траекториям. При перемещении груза по прямой при одновременной работе исполнительных цилиндров суммарная работа за цикл операции ниже на 10-12%, чем при перемещении груза из того же начального в то же конечное положение при поочередной работе каждого исполнительного цилиндра.

4. Решена задача динамического синтеза оптимальных программных движений исполнительного органа погрузочного манипулятора-трипода из условия минимума ускорений в процессе перемещения груза и получены законы программных движений исполнительных цилиндров, обеспечивающих минимальные инерционные нагрузки на перемещаемый груз. Полученный закон программного движения исполнительных цилиндров позволяет уменьшить амплитуду колебаний груза на подвесе после его остановки в 1,53...1,85 раз.

5. Разработана структура и построена позиционная система ручного полуавтоматического управления погрузочного манипулятора для реализации движения по заданным законам и траекториям. Получена зависимость скорости исполнительного органа $V_{исп}$ от скорости управляющих воздействий $V_{упр}$ на

задающее устройство в зависимости от задаваемого допустимого отклонения $[\varepsilon]$ от траектории перемещения груза, при этом при $\varepsilon \leq [\varepsilon]$ должно выполняться условие $V_{исн}/V_{упр} \leq 1$.

6. Экспериментальные исследования показали, что отклонение фактической траектории перемещения груза от задаваемой оператором траектории не превышает 3,4%. Ошибки позиционирования груза составляют не более 1,8% при выполнении условий пункта 5 заключения. Разработанная система управления позволяет задавать движение непосредственно груза, тем самым увеличивая производительность погрузочно-разгрузочных работ со штучными грузами до 18% при перемещении по прямолинейным траекториям.

Рекомендации производству

При проектировании предлагаемой эргатической системы управления погрузочного манипулятора-трипода следует учитывать зависимость скорости штоков электроцилиндров от прикладываемой к ним нагрузки. Для задаваемой максимальной ошибки позиционирования до 3,5%, скорость управляющего воздействия не должна превышать номинальную скорость штока электроцилиндра более чем в 1,2 раза.

Перспективы дальнейшей разработки

Следующим этапом совершенствования системы управления погрузочным манипулятором с пространственным исполнительным механизмом является автоматизация погрузки-разгрузки однотипных грузов за счет применения технического зрения и адаптивных алгоритмов управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. №1025541 СССР, МКИЗ В60Р 1/50. Погрузочно-разгрузочное устройство транспортного средства / В.М. Герасун, В.И. Пындак, А.Ф. Рогачёв, В.Л. Строков - Оpubл. 1983. - Бюл. №24. - 3 с.
2. А.С. №555046 СССР, М. Кл.2 В 66F 9/12. Навесное грузозахватное оборудование к погрузчику. / В.М. Герасун, В.И. Пындак, В.Л. Строков. Бюл. №15 от 25.04.77 г.
3. Актуаторы SKF САНВ [Электронный ресурс] : рук–во пользователя, SFK авторизованный дистрибьютор – Режим доступа: http://www.lmotion.ru/actuatorcahb.shtml/САНВ-21_datasheet.pdf. (Дата обращения 23.09.2016).
4. Анискин, В.И. Перспективы технического обеспечения сельского хозяйства // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - №12 - 1999 - с.2-7.
5. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин: Учебник для втузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
6. Баловнев, В.И. Адресное производство дорожно-строительной техники // Строительные и дорожные машины. - №12 – 2003 - С.14-16.
7. Батенко, А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Радио и связь, - 1984. - 160 с.
8. Белов, М.И. Манипуляторы роботов в сельском хозяйстве. / М.И. Белов, Ю.А. Судник, С.В. Сорокин // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С.60-68.
9. Белоусов, И.Р. Формирование уравнений динамики роботов-манипуляторов. Препринт ИПМ им М.В. Келдыша РАН Москва, 2002.
10. Бесекерский, В.А. Робастные системы автоматического управления / В.А. Бесекерский, А.В. Небылов.-М.: Наука, 1983 г.
11. Болтянский, В.Г. Математические методы оптимального управления. Изд-

во «Наука». М., 1966 г.

12. Бохонский, А.И. Динамика манипуляторов с абсолютно твердыми телами и деформируемыми звеньями / А.И. Бохонский, Л.В. Барашова. // Вісник Сев.ДТУ. Вип. 97: Механіка, енергетика, екологія: зб.наук.пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009. – С.23-27.
13. Брянский, Л.Н. О «размерностях» безразмерных единиц / Л.Н. Брянский, А.С. Дойников, Б.Н. Крупин. – Законодательная и прикладная метрология, - 4 - 1999 - с.с. 48-50.
14. Бурьянов, А.И. Тракторные контейнерные перевозки грузов на молочных фермах / А.И. Бурьянов, А.И. Дмитриенко // Техника и оборудование для села. – 1999 – №3-4 – с.13-15.
15. Бурьянов, А.И. Проблемы транспортного обеспечения сельскохозяйственных предприятий различной формы собственности// Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999 - №1 - с.21-25.
16. Валюкевич, Ю.А. Анализ конструктивных параметров манипулятора параллельной структуры с гибкими звеньями / Ю.А. Валюкевич, А.В. Алепко, Д.М. Яковенко // Современные проблемы науки и образования. – 2014 - № 3 - С. 153.
17. Валюкевич, Ю.А. Определение начального положения схвата манипулятора с гибкими связями на основе тензометрических данных / Ю.А. Валюкевич, А.В. Алепко, Д.М. Яковенко // Современные проблемы науки и образования. – 2012 - № 3 - С. 156.
18. Валюкевич, Ю.А. Планирование траектории перемещения манипулятоа с подвесом схвата на гибких звеньях (часть 2) / Ю.А. Валюкевич, А.В. Алепко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2012 - №1 - С. 28-31.
19. Василенко, Н.В. Основы робототехники. / Н.В. Василенко, К.Д. Никитин, В.П. Пономарев, А.Ю. Смолин. Под общ.ред. К.Д. Никитина. - Томск. МГП «РАСКО», 1993. - -475 с.; 3.4.2 – Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 392

с.:ил.

20. Гайворонский, В.А. Система управления работой погрузочных манипуляторов специальной конструкции.// Сб. науч. тр. Волгоградского СХИ, 1984 т.85 С.72-79.
21. Гайдук, А.Р. Интеллектуальное управление мобильными роботами в условиях неопределенности / Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Медведев М.Ю., Дьяченко А.А., Шаповалов И.О. // Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. 2017. С. 253-255.
22. Герасун, В.М. Синтез программных законов движения звеньев манипулятора из условия минимума ускорений / В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева //Материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию Победы в Сталинградской битве: «Интеграция науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО». Том.5. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2013. - С.89-92.
23. Герасун, В.М. Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов / В.М. Герасун, И.А. Несмиянов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. - №2. – С.24-28.
24. Герасун, В.М. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования. Герасун В.М., Пындак В.И., Несмиянов И.А., Дяшкин-Титов В.В., Павловский В.Е. / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. - №44. – 2012. 24 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-44>. (Дата обращения 07.10.2015).
25. Герасун, В.М. Определение зоны обслуживания мобильного манипулятора-трипода / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. - №3. – с.2-8.
26. Герасун, В.М. Сельскохозяйственные грузы как основа создания навесных

- грузоподъемных машин // Сб. науч. тр./ Волгогр. с.-х. ин-т. – 1984. – Т.85.- с.15-25.
27. Герасун, В.М. Синтез программных движений манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // 5-я Российская мультikonференция по проблемам управления. Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах (УТЭОСС-2012)». - Санкт-Петербург, 2012 г.- С. 722-725.
 28. Глазунов, В.А. Синтез и анализ роботов параллельной структуры для работы в экстремальных средах. / Глазунов В.А., Алешин А.К., Шалюхин К.А., Рашоян Г.В., Антонов А.В., Попов А.М., Юдкин В.Ф. // Экстремальная робототехника. – 2017 - № 1 - С. 52-59.
 29. Глазунов, В.А. Перспективы развития механизмов параллельной структуры. / Глазунов В.А., Алешин А.К., Ковалева Н.Л., Скворцов С.А., Рашоян Г.В. // Станкоинструмент. – 2016 - № 3 (4) - С. 86-89.
 30. Глазунов, В.А. Пространственные механизмы параллельной структуры. / В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев. - М.: Наука, 1991. - 96 с.
 31. Годжаев, З.А. Перспективы развития роботизированных технологий в растениеводстве. / З.А. Годжаев, А.П. Гришин, А.А. Гришин. //Тракторы и сельхозмашины. – 2015. - №12. – С.42-45.
 32. Гориневский, Д.М. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. / Д.М. Гориневский, А.М. Формальский, А.Ю. Шнейдер. – М.: Физматлит, 1994. 368 с.
 33. Горитов, А.Н. Сглаживание траектории перемещения рабочего органа робота-манипулятора. / А.Н. Горитов, С.М. Алферов. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т.309. – №8. – С.176-179.
 34. Горнев, В.Ф. К выбору целевой функции адаптивных систем управления. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Изд-е МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 1977. - №10. – с. 169-174.

35. Горюшинский, И. В. Контейнерно-транспортная система поставок сырья и отправок готовой продукции в комбикормовой промышленности//Новая техника и технологии на промышленном транспорте. — М.: АСПРОМТРАНС, Промтрансниипро-ект, 2001.-С. 68...71.
36. Детали и механизмы роботов: Основы расчета, конструирования и технологии производства: Учебюпособие / Р.С. Веселков, Т.Н. Гонтаровская, В.П. Гонтаровский и др.; Под ред. Б.Б. Самоткина. – К.: Выща шк., 1990. – 343 с.:ил.
37. Джолдасбеков, У.А. К исследованию динамики управления роботами. / У.А. Джолдасбеков, С.А. Айсагалиев // Известия АН КазССР, физ.мат., 1985, С.74-79.
38. Дяшкин-Титов, В.В. Задача оптимального управления перемещением схвата манипулятора-трипода/ В.В. Дяшкин-Титов, В.Е. Павловский // Известия нижевоолжского агроинженерного комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград: из-во ВолГАУ, 2014. - № 4(36). - С. 241-247.
39. Дяшкин-Титов, В.В. О программных движениях манипулятора-трипода на поворотном основании. / В.В. Дяшкин-Титов, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева // Управление большими системами (УБС'2015): Материалы XII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – Издательство: Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, 2015 – С. 630-635.
40. Дяшкин-Титов, В.В. Об эффективности программных движений исполнительных звеньев манипулятора-трипода на поворотном основании / В.В. Дяшкин-Титов // Материалы XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2014), 17-19 декабря 2014 г. / г.Москва, ИМАШ РАН, 2015. – С. 413-417.
41. Дяшкин-Титов, В.В. Разработка методов расчёта манипулятора-трипода на поворотном основании: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / Дяшкин-Титов Виктор Владимирович. - Волгоград, 2014.

42. Егоров, И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами: монография / И.Н. Егоров; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. – 192 с..
43. Егоров, О.Д. Особенности расчета преобразователей движения мехатронных и роботизированных систем [Текст] / Егоров О.Д. // Мехатроника, автоматизация, управление. - №10. – 2008. С.33-37.
44. Жавнер, В.Л. Погрузочные манипуляторы / В.Л. Жавнер, Э.И. Крамской. – Л.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
45. Жога, В.В. Динамический синтез оптимальных программных движений манипулятора-трипода. / В.В. Жога, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. - №2. – с.85-92.
46. Жога, В.В. О программных движениях манипулятора-трипода / В.В. Жога, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В. В. Дяшкин-Титов // Материалы Шестой Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2013). – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2013. Т.2. – с.146-150.
47. Жога, В.В. Система управления манипулятора трипода на подвижном основании. / В.В. Жога, И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» (ЭР-2014). // Сборник докладов Международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. - С.339-403.
48. Жога, В.В. Система управления манипулятора-трипода с самотормозящейся передачей. / В.В. Жога, И.А. Несмиянов, В.Н. Скакунов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, сборник докладов. Издательство: Академии наук Республики Татарстан. Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань). - 2015. – С. 1389-1391.
49. Жога, В.В. Система управления манипулятора-трипода. / В.В. Жога, И.А.

- Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // Робототехника и техническая кибернетика. - №4 (5) – 2014. – С.58-62.
50. Завражнов, А.И. Разработка робота-манипулятора для проведения 3D контурной обрезки плодовых деревьев. / А.И. Завражнов, А.А. Завражнов, В.Ю. Ланцев, А.А. Земляной // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С.304-312.
51. Заруднев, А.С. Повышение производительности мехатронных систем лазерной обработки на основе взаимосвязей контурной точности с программными параметрами движения и динамическими свойствами приводов. Автореф. дисс. к.т.н. 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы. Москва, 2009
52. Зенкевич, С.Л. Основы управления манипуляционными роботами. / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 576 с.
53. Зенкевич, С.Л. Параметрический синтез закона управления движением мобильного робота. / С.Л.Зенкевич, П.В. Космачев // Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009). Материалы XX Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. - С.223-225.
54. Каганов, Ю.Т. Многоагентный подход к управлению параллельным многосекционным манипулятором. / Ю.Т. Каганов, А.П. Карпенко. // Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2009). Материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С.344-347.
55. Каргашев, В.А. Управление сборочными движениями манипуляционных систем. Автореф дисс докт ф-м н 01.02.01 – Теоретическая механика, Москва- 2000.
56. Кобринский, А.А. Манипуляционные системы роботов. / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский. - М.: Наука, 1985. 343 с.

57. Кобринский, А.А. Алгоритм обхода препятствий для манипуляторов, управляемых от ЭЦВМ. / А.А. Кобринский, Л.А. Кобринский. // - Сб. Алгоритмы анализа и синтеза механизмов. М.: Наука, 1977. С.79-89.
58. Козырев, Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 392 с.:ил.
59. Колискор, А.Ш. Исследование точности движения схвата промышленного робота в пространстве. / А.Ш. Колискор, Е.А. Правоторова // Машиноведение. – 1989.- №1.- с.56-63.
60. Колмагоров, А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. // Изв. АН СССР: сер. матем. – 1941. – Т.5, №1.
61. Коловский, М.З. Основы динамики промышленных роботов. / Коловский М.З., Слоущ А.В. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1988. – 240 с. - (Науч. основы робототехники).
62. Конструирование роботов: Пер.с франц./ Андре П., Кофман Ж.-М., Лот Ф., Тайар Ж.-П. – М.: Мир, 1986. – 360 с., ил.
63. Корендясев, А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес; отв. Ред. С.М. Каплунов; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 2006. – Кн.1. - 2006. - 383 с.
64. Корендясев, А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес; отв. Ред. С.М. Каплунов; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 2006. – Кн.2. - 2006. - 376 с.
65. Коровкин, П.П. Математический анализ, ч.П. М., "Просвещение", 1974 – 464 с., ил.
66. Красонтович, И.В. Совершенствование конструкции зарубежных колёсных погрузчиков. / И.В. Красонтович, Н.С. Канюка // Строительные и дорожные машины. 1990. №3 с. 12-13.
67. Кривельская, Н.В. Совершенствование сельскохозяйственных шарнирно-

- стержневых гидроманипуляторов с пространственным приводным механизмом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Кривельская Наталья Владимировна. – Волгоград, 2004.
68. Крутько, П.Д. Управление движением манипулятора при выполнении погрузочных операций. / П.Д. Крутько, Д.В. Куьмин. // Проблемы машиностроения и надежности машин. - №3. – 2004. – С.91-98.
 69. Кулешов, В.С. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы. / В.С. Кулешов, Н.А. Лакота. – М.: Машиностроение, 1986.
 70. Лакота, Н.А. Основы проектирования следящих систем. М.: Машиностроение, 1978, 391 с.
 71. Линейные актуаторы SKF. [Электронный ресурс] : рук–во пользователя, SKF. – Режим доступа: <http://www.promshop.info/cataloguespdf/skfj.pdf>. (Дата обращения 09.09.2015).
 72. Малин, А.С. Исследование систем управления: Учебник для вузов. / А.С. Малин, В.И. Мухин. — М.: ГУ 2002. - 400с. - ISBN 5-7598-0192-9
 73. Манипуляционные системы роботов/ А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес и др.; Под общ. ред. А.И. Корендясева. - М.: Машиностроение, 1989. - 472 с. ил.
 74. Махов, А.А. Имитационное моделирование дискретно-позиционной системы управления робота манипулятора в Simulink. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/mahov/immitmodel.asp>. (Дата обращения 23.09.2016)
 75. Медведев, В.И. Автоматизированный синтез регуляторов следящих приводов манипуляторов с целью стабилизации динамических свойств промышленных роботов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Медведев Владимир Игоревич. - Москва, 2006.
 76. Медведев, В.И. Синтез оптимального управления взаимосвязанными приводами манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. – М.: Изд-во Новые технологии. - №9 - 2003 - С.5-10.
 77. Механика промышленных роботов: Учеб.пособие для втузов: В 3-х кн./

- Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн.1: Кинематика и динамика / Е.И. Воробьев, С.А. Попов, Г.И. Шевелева. – М.: Высш.шк., 1988. – 304 с.:ил.
78. Минько, Р. Н. Увеличение эффективности эксплуатации транспортных средств за счёт применения механизации производственного процесса [Текст] / Р. Н. Минько // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). — СПб.: Реноме, 2011. — С. 108-110.
79. Михайлов, Е. П. Позиционное управление мобильным роботом / Е. П. Михайлов, И. К. Короткий, В. С. Онуфриенко // Электротехнические и компьютерные системы. - 2014. - № 13(89). - С. 27-33.
80. Мишин, Б.С. Следящая система рабочего органа для подрезки растений. / Б.С. Мишин, А.С. Гордеев // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С.226-230.
81. Накано, Э. Введение в робототехнику: Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 334 с., ил.
82. Небылов, А.В. Гарантирование точности управления. – М.: Наука. Физматлит, 1998. – 304 с. – ISBN 5-02-015035-5.
83. Несмиянов, И.А. Электрогидравлическая система управления погрузочными манипуляторами. / И.А. Несмиянов, Ю.Г. Лапынин // ИЛ ВолгЦНТИ № 94-99-4 с.
84. Несмиянов, И.А. Антропоморфная система управления погрузочным манипулятором-триподом / И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // Материалы Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем». Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, - 2012.- С.233-236
85. Несмиянов, И.А. Динамический синтез программных движений манипулятора погрузочного робота. / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В.

- Дяшкин-Титов, В.В. Жога // Материалы международной научно-практической конференции "Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях". – Волгоград: Изд-во ИПК ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ «Нива», 2015. – С.11-16.
86. Несмиянов, И.А. Моделирование зоны обслуживания погрузочного манипулятора / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – основа успешного развития АПК и сохранения экосистем». Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, - 2012. – С. 286-290.
87. Несмиянов, И.А. Моделирование эргатической системы управления погрузочным манипулятором / И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, В.И. Токарев // Материалы V Международной научно-практической конференции молодых исследователей, г.Волгоград, 11-13 мая 2011г. Часть I. - Волгоград: ФГОУ НПО Волгоградская ГСХА, 2011. - С.65-68.
88. Несмиянов, И.А. Направления развития роботизированных погрузочных манипуляторов для агропромышленного комплекса [Электронный ресурс]/ И.А. Несмиянов, В.И. Токарев // Современная техника и технологии. – 2012.- №11. – Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2012/11/1382>. (Дата обращения 23.09.2016)
89. Несмиянов, И.А. Программно-аппаратный комплекс мониторинга эксплуатационно-технологических параметров погрузочного агрегата. / Несмиянов И.А., Евдокимов А.П., Токарев В.И., Захаров Е.Н. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. - №4(36). – с.227-231.
90. Несмиянов, И.А. Синтез законов перемещения захватного устройства манипулятора-трипода погрузочного робота. / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, Н.С. Воробьева // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции. - Мичуринск-Наукоград: Издательство Мичуринского госагроуниверситета, 2014. - С.246-256.

91. Несмиянов, И.А. Синтез программных движений манипулятора-трипода на поворотном основании. / И.А. Несмиянов, В.В. Жога. // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. – Ч.2. Юго-Зап.гос.ун-т. – Курск, 2016. - С.219-229.
92. Несмиянов, И.А. Система мониторинга эксплуатационно-технологических параметров работы погрузочного агрегата / И.А. Несмиянов, В.И. Токарев, Е.Н. Захаров // Приборостроение-2014: материалы 7-й Международной научно-технической конференции (19–21 ноября 2014 года, Минск, Республика Беларусь) / ред. колл.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 104 - 106.
93. Несмиянов, И.А. Система управления манипулятора сельскохозяйственного робота / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.Е. Павловский, Н.С. Воробьева // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. - №3(35). – с.226-231.
94. Несмиянов, И.А. Система управления погрузочным манипулятором параллельной структуры / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.И. Токарев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. ФГОУ. Агроинженерия. – 2012. – №3 (54). – с.42-44.
95. Несмиянов, И.А. Системы прямого и позиционного управления погрузочным манипулятором с пространственным исполнительным механизмом. / И.А. Несмиянов, Е.Н. Захаров, В.И. Токарев // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: материалы Международной научно-практической конференции. – Мичуринск-Наукоград: Издательство Мичуринского госагроуниверситета, 2014. – С.239-245.
96. Несмиянов, И.А. Совершенствование систем управления погрузочными манипуляторами / И.А. Несмиянов // Механизация и электрификация

- сельского хозяйства. – 2002. - №4. – С.21-22.
97. Несмиянов, И.А. Частный случай управления погрузочным манипулятором. / И.А. Несмиянов, В.И. Токарев, Д.С. Елисеев.// Материалы международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в науке, образовании и аграрном производстве – залог успешного развития АПК».Том.2 – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградская ГСХА. – 2011. – с.106-108.
 98. Основы робототехники. Василенко Н.В., Никитин К.Д., Пономарёв В.П., Смолин А.Ю. / Учеб.пособие. Томск, МГП «Раско», 1993.
 99. Павлов, И.М. Эффективный быстросъемный погрузчик / И.М. Павлов, А.Г. Давыдов, А.И. Восковцов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2015. №11. С. 8-11.
 100. Паршева, Е.А. Децентрализованное робастное управление многозвенным манипулятором. // Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009). Материалы XX Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. - С.268-270.
 101. Паршева, Е.А. Робастный алгоритм управления манипуляционным роботом. / Е.А. Паршева, Ю.А. Лежнина // Материалы 2-й Российской мультиконференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 258-261.
 102. Паршин, Д.Я. Особенности построения алгоритмов управления штукатурным роботом. / Д.Я. Паршин, О.Л. Цветкова. // Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2009). Материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. - С.354-356.
 103. Паршин, Д.Я. Состояние и концептуальные основы строительной робототехники. / Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2009) // Материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог:

Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С.351-353

104. Патент №2240226 РФ, МПК В25J9/14, В25J9/20, В25J1 13/00. Устройство для управления гидравлическим манипулятором. / Пындак В.И., Кривельская Н.В. Оpubл. 20.11.2004 г.
105. Патент №2476372 РФ, МПК7 В66С23/36 (2006.01), В60Р3/00 (2006.01). Аварийно-спасательная машина. / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, В.Н. Скакунов, А.В. Еременко, П.В. Федченков, В.В. Дяшкин-Титов В.В. – Оpubл. 2013.
106. Патент №2501648 РФ, МПК В25J13/02. Устройство ручного управления манипулятором-триподом. / И.А. Несмиянов, В.М. Герасун, В.В. Дяшкин-Титов, В.В. Жога, В.Н. Скакунов. – Оpubл. 20.12.2013 г.
107. Патент на полезную модель № 140869 РФ, МПК В66F9/06, G01С9/12, В66 F17/00. Бортовая информационная система контроля положения погрузочного агрегата. / И.А. Несмиянов, В.И. Токарев, Е.Н. Захаров – Оpubл. 20.05.2014 г.
108. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 264 с.
109. Погрузчики: Справочник/Г.П. Ефимов, А.Е. Алепин, М.А. Зискинд, Я.Г. Коковский, И.И. Мачульский; Под ред. Г.П. Ефимова.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1989. – 240 с.: ил., табл. – Библиогр.: с. 238.
110. Проектирование и разработка промышленных роботов / С.С. Аншин, А.В. Бабич, А.Г. Баранов и др.; Под общ. ред. Я.А. Шифрина, П.Н. Белянкина. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с. – (Автоматические манипуляторы и робототехнические системы).
111. Промышленная робототехника / Л.С. Ямпольский, В.А. Яхимович, Е.Г. Вайсман и др.; Под ред. Л.С. Ямпольского. – К.: Техніка, 1984. – 264 с., ил. Библиогр.: с.258-261.
112. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация. Костюк В.И., Гавриш А.П., Ямпольский Л.С., Карлов А.Г. – К.: Вища шк. Головное ид-во, 1985. 359 с.

113. Пындак, В.И. Изыскания и исследования мобильных грузоподъемных устройств в виде треугольной пирамиды. Автореф дисс.к.т.н. 05.410 – Механизация сельскохозяйственного производства. Волгоград – 1971
114. Пындак, В.И. Малогабаритный гидравлический погрузчик. / В.И. Пындак, А.Ф. Рогачёв, В.В. Гребенник. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - №8. - 1999. - С.30-31.
115. Пындак, В.И. Обоснование и принципы создания мобильных грузоподъемных средств на базе пространственных механизмов для работы в сельском хозяйстве. Автореф. дисс...доктора техн. наук. Москва, 1991.
116. Пындак, В.И. Теоремы аналитической геометрии и их приложение к исследованию шарнирно-стержневых механизмов и манипуляторов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. - 2011. - №1(21). - С. 166-172.
117. Разоренов, Г.Н. Метод синтеза законов «мягкого» и «сверхмягкого» управления конечным состоянием динамических систем. // Мехатроника, автоматизация, управление. - №4. – 2011. – С.2-11.
118. Робототехнические системы и комплексы: Учеб.пособие для вузов / И.И. Мачульский, В.П.Запятой, Ю.П.Майоров и др.; Под ред. И.И. Магульского. М.:Транспорт. 1999. 446 с.
119. Рогачёв, А.Ф. Обоснование схемы и конструктивных параметров гидроманипулятора для агрегата технического обслуживания. // Ресурсосберегающие технологии и конструкторские решения для машинно-тракторных агрегатов. Сб.научных трудов, т.91 – Волгоград, СХИ, 1985, с.67-72.
120. Рыбак, Л.А. Синтез системы управления одно- и двухсекционного манипуляторов с параллельной кинематикой. / Л.А. Рыбак, А.В. Чичварин, Ю.А. Мамаев, Е.В. Гапоненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2012. - № 2-6 (292).- С. 64-72.
121. Сергеев, С.Ф. Проблемы проектирования сложных эргатических систем./ Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника,

- автоматизация, управление» - СПб.: ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2010. с 23-26.
122. Смагер, К.В. Система автоматического управления для тракторного экскаватора. / К.В. Смагер, С.А. Морозов, В.М. Яценко.
123. Строков, В.Л. Методические указания к расчету и конструированию навесных погрузочных манипуляторов. / В.Л. Строков, В.М. Герасун, В.И. Пындак. - Волгоград. – 1982.- 32 с.
124. Теория механизмов и механика машин: Учеб.для втузов/ К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов и др.; Под ред. К.В. Фролова. – 3-е изд., стер. – М.: Высш.шк., 2001. – 496 с.: ил.
125. Третьяков, Г.М. и др. Контейнерно-транспортные системы в агропромышленном комплексе. / Под ред. докт. техн. наук, чл.-корр. Россельхозакадемии А.А. Артюшина. – М.: Колос-Пресс, 2002. – 224 с.: ил.
126. Троицкий, В.А. Некоторые задачи оптимизации движения манипуляторов. // Машиноведение. - №6. – 1988. – с.31-38.
127. Тывес, Л.И. Особенности регулярных робототехнических структур с цикловым управлением. / Л.И. Тывес, А.П. Сонин //Машиноведение. – 1986. - №1. – с.9-18.
128. Удовкин, А.И. Устойчивость погрузочного гидроманипулятора на основе пространственного исполнительного механизма, агрегатируемого с трактором посредством трехточечной навесной системы. Автореф. дисс...канд. техн.наук. Волгоград, 1988.
129. Фалалеева, Р.В. Основные задачи механики управления манипулятором. / Р.В. Фалалеева, И.В. Паневин. // Вестник КрасГАУ. – 2008. - №4. – С.227-231.
130. Фархатдинов, И.Г. Экспериментальное исследование позиционного, скоростного и комбинированного позиционно-скоростного режимов управления в системах дистанционного управления мобильными роботами / И.Г. Фархатдинов, Ю.В. Подураев, Дж.-Х.Ю. // Мехатроника, автоматизация, управление, №1, 2010 г. с.70-78

131. Фатуев, А.Е. Электроцилиндры – альтернатива гидроприводу / А.Е. Фатуев, В.А. Жук // Строительные и дорожные машины. - №4. – 2009. – С.24-26.
132. Хасанов, З.М. Методика моделирования адаптивной системы управления автоматизированным электроприводом методом эквивалентных структурных преобразований. / Хасанов З.М., Хасанов О.З. // Технология машиностроения. – 2007 - №8 – с.58-67.
133. Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ. / С.В. Хейло, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин. - М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина.2011.153 с.
134. Хинчин, А.Я. Теория корреляции стационарных стохастических процессов. // Успехи матем. наук. – 1938. – В.5.
135. Цветкова, О.Л. Методы разработки, моделирования и управления штукатурным роботом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Цветкова Ольга Леонидовна. – Ростов-на-Дону, 2008.
136. Черноусько, Ф.Л. Манипуляционные роботы. / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий - М.: Наука, 1989.
137. Шипилевский, Г.Б. Автоматизация мобильных сельскохозяйственных агрегатов / Г.Б. Шипилевский, А.И. Викторов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - №3. - 2001. - С.28-29.
138. Юревич, Е.И. Интеллектуальные роботы: Учебное пособие для вузов / под общей ред. Е.И. Юревича / И.А. Каляев, В.М. Лохин, И.М. Макаров и др. – Машиностроение, 2007. – 360 с.: ил.
139. Юревич, Е.И. Основы робототехники: учебное пособие для вузов. -3-е изд. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. 359 с.: ил., табл. + CD.
140. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления. учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. "Системный анализ и упр." / Е. И. Юревич. БВХ - Санкт-Петербург, 2007. (3-е изд.) – 460 с.
141. Юсупова, Н.И. Поиск траекторий движения многозвенного манипулятора в сложном трехмерном пространстве. / Н.И. Юсупова, Г.Р. Шахмаметова,

- А.Р. Камильянов. // Уфа: УГАТУ, 2007 Вестник УГАТУ _ Управление, втии Т. 9, №2 (20). С. 71–75.
142. Ющенко, А.С. Алгоритм управления движением манипулятора вдоль заданной траектории с учетом динамики звеньев. / А.С. Ющенко, А.Б. Малышев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 1984. - № 5. - С. 41.
143. Яцун, С.Ф. Синтез управляющих моментов по заданному закону движения трехзвенного манипулятора экзоскелета. / С.Ф. Яцун, М.Е. Понедельченко, Р.Н. Турлапов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2014. - №2. – С.146-152.
144. Briot Sébastien and Arakelian Vigen. Optimal Force Generation in Parallel Manipulators for Passing through the Singular Positions. The International Journal of Robotics Research 2008; Vol. 27, No. 8, August 2008, pp. 967–983.
145. Dinamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod. V.V. Zhoga, V.M.Gerasun, I.A. Nesmiyanov, N.S. Vorob'eva, and V.V. Dyashkin-Titov. Journal of Mashinery Manufacture and Reliabilitily, 2015. Vol. 44, No. 2, pp 181-186.
146. Filaretov V.F., Zuev A.V Adaptive Force/Position Control of Robot Manipulators// Proc. of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 2-5, 2008, Xi'an, China, pp. 96-101
147. Gradetsky, V. Wall climbing Robot: Evolution to Intelligent Autonomous vehicle // Proc. of the First Int. Symp. on Mobile, Climbing walking Robots, CLAWAR'98, Brussels, Belgian, 1998., pp. 53-60.
148. Guilbert Matthieu, Wieber Pierre-Brice, Joly Luc. Optimal Trajectory Generation for Manipulator Robots under Thermal Constraints. IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems – 2006. pp.1-6.
149. Han-Pang Huang and N. Harris McClamroch. Nime-Optimal Control for a Robotic Contour Following Problem. Center for Research on Intergrated Manufacturing. Clledge of Engineering The University of Michigan. Ann Arbor, Michigan 48109-1109. Oktober, 1986. P.37.

150. Herrera-Aguilar I. and Sidobre D. Soft motion trajectory planning and control for service manipulator robot. 5th International Symposium on Robotics and Automation. August 2006.
151. Kung Y.S. and Shu G.S. Design and Implementation of a Servo Control IC for Vertical Articulated Robot Arm. ICMT 2004, Proceedings of the 8th International Conference on Mechatronics Technology, pp.297-301, November 8-12, 2004. (Hanoi, Vietnam).
152. Nesmiyanov, I. THE CONTROL SYSTEM OF THE MANIPULATOR AGRICULTURAL ROBOT. / I.A. Nesmianov V.V. Zoga, V.E. Pavlovsky, N.S.Vorobieva // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. - №3(35). – с.232-237.
153. Omran A., Bayoumi M., Kassem A., El-Bayoumi G. Optimal Forward Kinematics Modeling of Stewart Manipulator Using Genetic Algorithms. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Vol.3, #4, December 2009 ISSN 1995-6665. Pp. 280-293.
154. On-Line Robotic Trajectory Control Based on Spline Interpolation. Stewart N.F. // INFOF, 1985, 23 #2. pp.159-170.
155. Open-loop minimum-time control of mechanical manipulators and its application. Shin Kaug G. Mckay Neil D. PROC. AMER. CONTR. CONF., San Diego, Calif. 6-8 June, 1984. Vol.3, 1984. pp.1231-1236.
156. Path Tracking Control of Lagrange System with Obstacle Avoidance. Kazunori Sakurama and Kazushi Nakano, vol.10, no.1, pp.50-60, February 2012
157. Processing of Data from the Camera of Structured Light for Algorithms of Image Analysis in Control Systems of Mobile Robots. Vladimir Skakunov, Victor Belikov, Victor Zhoga and Ivan Nesmiyanov. Advances in Mechanical Engineering. Selected Contributions from the Conference «Modern Engineering: Science and Education», June 2014. Springer, pp. 149-158.
158. Rashoyan G.V., Skvortsov S.A., Aleshin A.K., Slavutin M.F., Sheptunov S.A.. Analysis of special positions of parallel structure mechanisms for aggressive

- media// 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies, IT and MQ and IS 2016 2016, pp. 160-163.
159. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod. Ivan Nesmiyanov Victor Zhoga, Vladimir Skakunov, Stanislav Terekhov, Natalia Vorob'eva, Victor Dyashkin-Titov, Farea Ali Hussein Al-hadsha. Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. First Conference, CIT&DS 2015. Volgograd, Russia. Springer, pp 392-404.
160. Tracking control of robot manipulators using sliding mode. Harashima Fumio, Xu Jian-Xin, Hashimoto Hideki. IEEE TRAS. POWER ELECTRON., 1987, #2. Pp.169-176. USA.
161. Wiener, N. The extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. – New York: Wiley, 1949.
162. Zhoga V., Gavrilov A., Gerasun V., Nesmianov I., Pavlovsky V., Skakunov V., Bogatyrev V., Golubev D., Dyashkin-Titov V., Vorobieva N.. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.- Series: Mechanisms and Machine Science.- Springer International Publishing Switzerland.- Volume 22, 2014, pp 463-471.
163. Zoga, V. THE CONTROL SYSTEM OF MANIPULATOR-TRIPOD THE ROTARY BASE. / Victor Zoga, Ivan Nesmiyanov, Victor Dyashkin-Titov, Nataliya Vorobyeva // «ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА» (ЭР-2014). // Сборник докладов Международной научно-технической конференции. - Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2014. - С.404-408.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приводы манипуляторов

Привод	Распространенность в манипуляторах	Грузоподъемность	W (степень подвижности)	Погрешность позиционирования	Скорость	Преимущества	Недостатки
Пневматический	Промышленный манипулятор роботов 20...30%	До 20 кг (легкие)	2...3	±0,1 мм	До 1000 мм/с	Простота конструкции; Низкая стоимость; Надежность в работе	Низкая регулировочная способность
Гидравлический	Погрузочные манипуляторы 30% для различных отраслей экономики	Средние – до 100 кг; Тяжелые – до 1000 кг	3...4	±0,5 мм	0,8...1200 мм/с	Хорошая регулировочная способность	Сложность конструкции; Высокая стоимость изготовления и эксплуатации
Электрический	Промышленный манипулятор 40...50%	Средние – до 300 кг	3...6	До ±0,05 мм	До 1500 мм/с	Высокая экономичность; Высокий КПД; Удобство сборки; Хорошие регулировочные свойства	Высокая стоимость; Невысокая грузоподъемность

Электроцилиндры

Показатели	САНВ-10	САНВ-20	САНВ-21	САТ 32В	САР 40	МАХ-3	МАХ-1
Усилие, Н	До 1000	До 2500	До 4500	До 4000	До 6000	До 8000	До 4000
Скорость (при полной нагрузке), мм/с	45	27	45	52	40	12,7	12,7
Ход, мм	50...300	102...610	102...610	50...700	50...700	50...700	50...700
Напряжение, В	12/24	12/24	12/24	12/24	12/24	12/24	24
Рабочая температура, °С	-40...+85	-40...+85	-40...+85	-20...+50	-20...+70	0...+40	0...+40

Характеристики различных типов гидро- и электроцилиндров

Привод	Марка	Вес, кг	Ход штока, мм	Усилие, Н
Гидроцилиндры	ЦГ-40.25×435,17	8	435	20100
	ЦГ-40.25×243,22	4,6	243	12570
	ЦГ-40.25×60,24	3,8	60	21000
Электроцилиндры	САНВ 21	5	50-700	4500-2500
	САНМ-6525	4	100-700	50000
	САНВ 22	4,8	50-700	14000

Приводы манипуляторов

Показатель	Гидравлический	Пневматический	Электрический
Цена одного цилиндра	Низкая	Очень низкая	Средняя
Дополнительные компоненты	Насосы, клапанно-распределительная и контрольная аппаратура, резервуар, фильтры	Воздушный компрессор, клапанно-распределительная и контрольная аппаратура, фильтры	Силовой и сигнальный кабель, блок управления
Использование при низких температурах	Требуется подогрев РЖ	Требуется влагоотделитель	-
Стоимость монтажных работ	Высокая	Высокая	Низкая
Интервалы обслуживания	Короткие	Длинные	Очень длинные
Требуемое обслуживание	Проверка утечки и замена РЖ	Очистка отложений компрессорного масла, проверка на утечки	Проверка подшипников (если требуется)
Пожаробезопасность	Только при использовании жидкостей на водной основе	Хорошая	Хорошая
Стоимость эксплуатации	Высокая	Высокая	Низкая
Синхронизация нескольких приводов	Сложная	Сложная	Простая
Сложность точного позиционирования при управлении	Высокая	Высокая	Простая
Динамические показатели	Низкие или средние	Средние или высокие	Средние или высокие
Точность (относительного полного хода штока)	Значительно зависит от скорости	Значительно зависит от скорости	Незначительное отклонение
Распределение усилий	Значительно возрастает, особенно в конечных положениях	Значительно возрастает, особенно в конечных положениях	Одинаковое

Анализ погрузчиков

Модель	Назначение	W	Система координат	Система управления	Производитель (страна)
HYTRACK 1760	Многофункциональный: 1)Погрузочно-разгрузочные работы; 2)Пересадка деревьев; 3)Лесозаготовка; 4)Грейферные работы; 5)Вилочный захват.	2	фронтальный	Ручное распределителями	Германия
		4 (при навеске экскаватора)	С поворотной экскаваторной колонной		
Rammer (манипулятор) JBS, GBS, GBM	Разработка карьеров (дробилка)	4	С поворотной колонной	Управление ручное дистанционное электрогидравлическое	Финляндия
Loglift 50LT 102	Грузовой трактор (энергетическое средство + манипулятор); манипулятор для лесного хозяйства с грейфером	4	С поворотной колонной (полноповоротный 360°)	Двойной рычаг ЕНС 35 (ручное)	Финляндия
Ponsse HN 125	Манипулятор харвестера	4	Поворотная колонна (360°)	Двойной рычаг ЕНС 35 (ручное)	Финляндия

Модель	Назначение	W	Система координат	Система управления	Производитель (страна)
ПМН-30	Сельскохозяйственный погрузчик (механизация погрузочно-разгрузочных, землеройных и строительных работ)	4	Поворотная колонна (400°)	Ручное управление из кабины	Россия
КМУ-90	Крано-манипуляционная установка (штучные грузы, лесоматериалы, поддоны)	4	Поворотная колонна (400°)	Ручное распределителями (рядом с манипулятором)	Россия
ПФ-0,5Б (ПС-Ф-0,5)	Скирдование (грабелевая решетка), ковш для погрузки сыпучих материалов	2	Фронтальный	Ручное распределителями из кабины	Россия
ПРМ-0,4	Погрузка рулонов	2	Фронтальный	Ручное распределителями из кабины	Россия
Manitou ML 40	Для сыпучих материалов (ковш)	2	Фронтальный	Электрогидравлическое	Великобритания
СНУ-550	СтогOMETATEль-погрузчик навесной универсальный	2	Фронтальный	Ручное распределителями из кабины	Россия

Модель	Назначение	W	Система координат	Система управления	Производитель (страна)
3CX Super	Экскаватор-погрузчик	4	Поворотная колонна	Традиционное ручное или многофункциональный рычаг погрузчика + два джойстика управления экскаватором	Великобритания
ПФС-0,75	Сельскохозяйственный погрузчик (рулоны, скирдование, складирование, сыпучие материалы, штучных грузов.	2	Фронтальный	Ручное распределителями из кабины	Беларусь
ПУН-0,5	Погрузчик универсальный навесной	2	Фронтальный	Ручное распределителями из кабины	Россия
Komatsu WB97S-2	Экскаватор-погрузчик	3	Поворотная колонна	Рычаг	Япония
860SX Terex-Fermec	Экскаватор-погрузчик	4	Поворотная колонная	Традиционное и рычагами из кабины	Великобритания

Модель	Назначение	W	Система координат	Система управления	Производитель (страна)
ВМЕ-1560 (1565)	Погрузчик (рулоны, штучные грузы)	2	Фронтальный	Джойстиковое управление стрелой	Беларусь
ПКУ-0,8Б (ПКУ-0,8)	Погрузчик-копновоз универсальный (сено, солома, силос, навоз, минеральные удобрения, песок) навесной	2	Фронтальный	Ручное распределителями из кабины	Россия
ПВ 300	Погрузчик (сыпучие грузы)	2	Фронтальный	Ручное распределителями из кабины	Россия
ПБМ-1200	Погрузчик быстросъемный многофункциональный (сено, солома, навоз, минеральные удобрения, песок, бревна)	2	Фронтальный навесной	Ручное распределителями из кабины	Россия
ПГА-Ф-0,6	Погрузчик грейферный автономный	3	Фронтальный	Ручное управление из кабины	Россия
ПВСВ-0,5Б	Погрузчик вилчатый навесной для контейнеров и ящиков	2	Фронтальный	Ручное управление из кабины	Молдова

Определение законов изменения u_1 и u_2 на участке изменения конфигурации манипулятора из начального положения в конечное

$$m := 5 \quad ma := 0.2 \quad OO1 := 20 \quad yb := 310 \quad g := 9.81 \quad xm0 := 0 \quad ym0 := 435.4 \quad zm0 := 155.4$$

$$xmk := 100 \quad ymk := 570 \quad zmk := 230$$

$$k1 := \frac{ymk - ym0}{xmk - xm0}$$

$$k2 := \frac{zmk - zm0}{xmk - xm0}$$

$$k3 := \frac{zmk - zm0}{ymk - ym0}$$

$$Ky := \sqrt{1 + \frac{1}{k1^2} + k3^2}$$

$$Kz := \sqrt{1 + \frac{1}{k2^2} + \frac{1}{k3^2}}$$

$$Ky = 1.364$$

$$Kz = 2.46$$

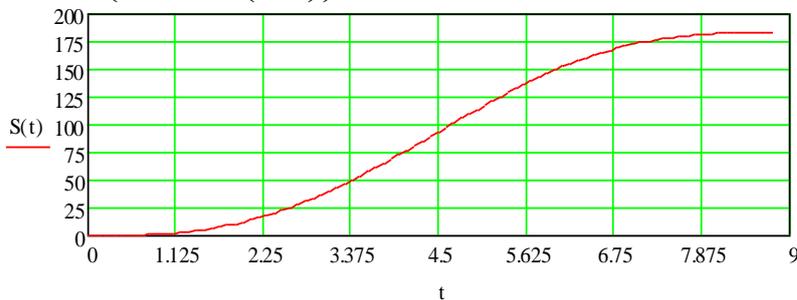
$$T := 8.89$$

$$t := 0, 0.1.. T$$

$$Sk := Ky \cdot (ymk - ym0)$$

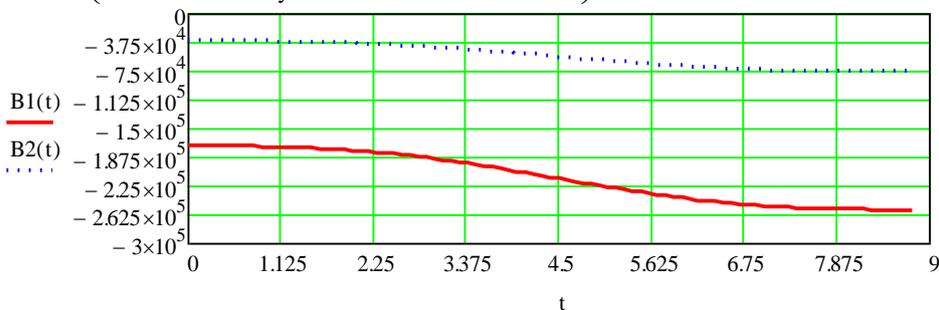
$$Sk = 183.487$$

$$S(t) := Sk \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right)$$



$$B1(t) := \left(yb^2 - 2yb \cdot \frac{S(t) + ym0Ky}{Ky} + \frac{S(t) + ym0Ky}{Ky} + \frac{S(t) + zm0Kz}{Kz} \right)$$

$$B2(t) := \left(yb^2 - yb \cdot \frac{S(t) + ym0Ky}{Ky} + OO1 \frac{S(t) + zm0Kz}{Kz} \right)$$



$$B3 := yb^2 + OO1^2$$

$$u1(t) := \frac{g \cdot \left(\frac{OO1 \cdot B2(t)}{B3} - \frac{S(t) + zm0Kz}{Kz} \right)}{\frac{m}{ma} \cdot \left(B1(t) - \frac{B2(t)^2}{B3} \right)}$$

$$u_4(t) := \frac{\left(\frac{B_1(t) \cdot g \cdot \text{OO}1}{B_2(t)} \cdot -g \cdot \frac{S(t) + z_{m0} K_z}{K_z} \right)}{B_2(t) - \left(\frac{B_1(t) \cdot B_3}{B_2(t)} \right)}$$

$$u_1(0) = 3.425 \times 10^{-4}$$

$$u_4(0) = 2.879$$

$$u_1(T) = 3.048 \times 10^{-4}$$

$$u_4(T) = 3.719$$

$$u_{11}(t) := \frac{g \cdot \left(-\text{OO}1 + \frac{S(t) + z_{m0} K_z}{K_z \cdot B_2(t)} \right)}{\frac{m}{m_a} \cdot \left(B_2(t) - \frac{B_1(t)}{B_2(t)} \right)}$$

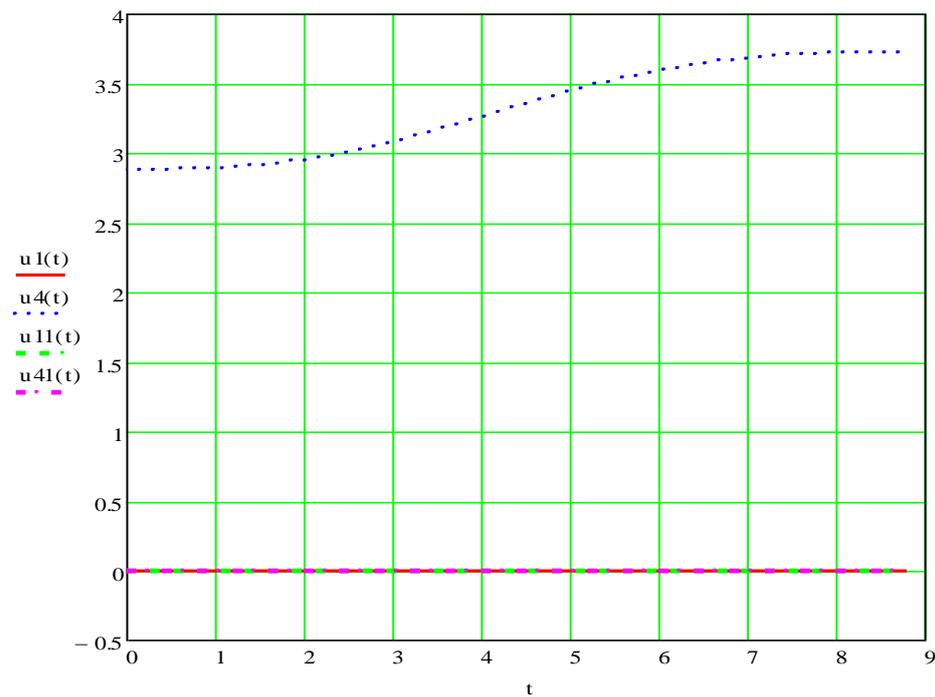
$$u_{41}(t) := \frac{\left(-g \cdot \text{OO}1 + B_2(t) \cdot g \cdot \frac{S(t) + z_{m0} K_z}{K_z \cdot B_1(t)} \right)}{B_2(t) - \left(\frac{B_2(t)^2}{B_1(t)} \right)}$$

$$u_{11}(0) = 2.194 \times 10^{-4}$$

$$u_{41}(0) = -4.177 \times 10^{-3}$$

$$u_{11}(T) = 1.033 \times 10^{-4}$$

$$u_{41}(T) = -8.832 \times 10^{-3}$$



Работа, затрачиваемая на перемещение груза по траектории

прямолинейная траектория

$$t_o := 0$$

$$h_o := h(0) \quad l2_o := l2(0) \quad l3_o := l3(0) \quad l4_o := l4(0) \quad \phi_o := \phi(0)$$

$$h_o = 1400 \quad l2_o = 1500 \quad l3_o = 1352 \quad l4_o = 911.8948391 \quad \phi_o = 0.323$$

$$x_o := x(0) \quad y_o := y(0) \quad z_o := z(0)$$

$$x_o = -297.2507042 \quad y_o = 1129.7067108 \quad z_o = 740.4942717$$

$$ax(t) := \frac{d^2}{dt^2} x(t) \quad ay(t) := \frac{d^2}{dt^2} y(t) \quad az(t) := \frac{d^2}{dt^2} z(t) \quad \varepsilon(t) := \frac{d^2}{dt^2} \phi(t)$$

$$aax := ax(0) \quad aay := ay(0) \quad aaz := az(0) \quad a\varepsilon := \varepsilon(0)$$

$$aax = 13.9980634 \quad aay = 8.678749 \quad aaz = -31.4178345 \quad a\varepsilon = -0.0190992$$

$$g := 9.810 \quad OA1 = 750 \quad OO1 = -40 \quad zd = -40 \quad m := 45 \quad ma := 50$$

$$F1 := 0 \quad F2 := 0 \quad F3 := 0 \quad F4 := 0 \quad AA := 0$$

$$a(t) := \sqrt{\left(\frac{d^2}{dt^2} x(t)\right)^2 + \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t)\right)^2 + \left(\frac{d^2}{dt^2} z(t)\right)^2}$$

Given

$$F1 \cdot \frac{x_o}{m \cdot l1_o} + F2 \cdot \frac{x_o - xb}{m \cdot l2_o} + F3 \cdot \frac{x_o + xb}{m \cdot l3_o} = \frac{aax}{1000}$$

$$F1 \cdot \frac{y_o + OA1 \cdot \sin(\phi_o) - yb}{m \cdot l1_o} + F2 \cdot \frac{y_o - yb}{m \cdot l2_o} + F3 \cdot \frac{y_o - yb}{m \cdot l3_o} = \frac{aay}{1000}$$

$$F1 \cdot \frac{z_o - OA1 \cdot \cos(\phi_o)}{m \cdot l1_o} + F2 \cdot \frac{z_o}{m \cdot l2_o} + F3 \cdot \frac{z_o}{m \cdot l3_o} - g = \frac{aaz}{1000}$$

$$F1 \cdot \frac{(y_o - yb) \cdot \cos(\phi_o) + z_o \cdot \sin(\phi_o)}{OA1 \cdot ma \cdot l1_o} + F4 \cdot \frac{zd \cdot \sin(\phi_o) - yb \cdot \cos(\phi_o)}{OA1 \cdot ma \cdot l4_o} + \frac{g \cdot \sin(\phi_o)}{OA1} = \frac{a\varepsilon}{1000}$$

$$AA(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, x_o, y_o, z_o, \phi_o) := \text{Find}(F1, F2, F3, F4)$$

$$AA(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, x_o, y_o, z_o, \phi_o) = \begin{pmatrix} -520.4253668 \\ 306.4097147 \\ 547.1158928 \\ -78.9097833 \end{pmatrix}$$

$$t := 0 \quad T_{ik} = 16.0127735$$

mmm := for $i \in 1 \dots \text{Tok} - 10$

$$t \leftarrow t + 0.1$$

$$x_o \leftarrow x(t)$$

$$y_o \leftarrow y(t)$$

$$z_o \leftarrow z(t)$$

$$l1_o \leftarrow l1(t)$$

$$l2_o \leftarrow l2(t)$$

$$l3_o \leftarrow l3(t)$$

$$l4_o \leftarrow l4(t)$$

$$\phi_o \leftarrow \phi(t)$$

$$aax_i \leftarrow ax(t)$$

$$aay_i \leftarrow ay(t)$$

$$aaz_i \leftarrow az(t)$$

$$ae_i \leftarrow \varepsilon(t)$$

$$CCC \leftarrow AA(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, x_o, y_o, z_o, \phi_o)$$

$$F1_i \leftarrow \left[\left(CCC^{(0)} \right)_0 \right]$$

$$F2_i \leftarrow \left[\left(CCC^{(0)} \right)_1 \right]$$

$$F3_i \leftarrow \left[\left(CCC^{(0)} \right)_2 \right]$$

$$V1_i \leftarrow \frac{d}{dt} l1(t)$$

$$V2_i \leftarrow \frac{d}{dt} l2(t)$$

$$V3_i \leftarrow \frac{d}{dt} l3(t)$$

$$V4_i \leftarrow \frac{d}{dt} l4(t)$$

$$a1_i \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l1(t)$$

$$a2_i \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l2(t)$$

$$a3_i \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l3(t)$$

$$a_{4i} \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l_4(t)$$

$$N_{4i} \leftarrow \frac{F_{4i} \cdot V_{4i}}{1000}$$

$$N_{1i} \leftarrow \frac{F_{1i} \cdot V_{1i}}{1000}$$

$$N_{2i} \leftarrow \frac{F_{2i} \cdot V_{2i}}{1000}$$

$$N_{3i} \leftarrow \frac{F_{3i} \cdot V_{3i}}{1000}$$

$$A_{1i} \leftarrow \left| \frac{F_{1i} \cdot (h(t) - 1140)}{1000} \right|$$

$$a_{4i} \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l_4(t)$$

$$N_{4i} \leftarrow \frac{F_{4i} \cdot V_{4i}}{1000}$$

$$N_{1i} \leftarrow \frac{F_{1i} \cdot V_{1i}}{1000}$$

$$N_{2i} \leftarrow \frac{F_{2i} \cdot V_{2i}}{1000}$$

$$N_{3i} \leftarrow \frac{F_{3i} \cdot V_{3i}}{1000}$$

$$A_{1i} \leftarrow \left| \frac{F_{1i} \cdot (h(t) - 1140)}{1000} \right|$$

$$A_{2i} \leftarrow \left| \frac{F_{2i} \cdot (l_2(t) - 1140)}{1000} \right|$$

$$A_{3i} \leftarrow \left| \frac{F_{3i} \cdot (l_3(t) - 1140)}{1000} \right|$$

$$A_{4i} \leftarrow \left| \frac{F_{4i} \cdot (l_4(t) - 912)}{1000} \right|$$

$$n_i \leftarrow t$$

(F₁ F₂ F₃ F₄ N₁ N₂ N₃ N₄ V₁ V₂ V₃ V₄ a₁ a₂ a₃ a₄ A₁ A₂ A₃ A₄ n)

$$F_1 := \left(\text{mmm}^{(0)} \right)_0 \quad F_2 := \left(\text{mmm}^{(1)} \right)_0 \quad F_3 := \left(\text{mmm}^{(2)} \right)_0 \quad F_4 := \left(\text{mmm}^{(3)} \right)_0 \quad n := \left(\text{mmm}^{(20)} \right)_0$$

$$F_1 =$$

0	
0	0
1	-520.5264667
2	-520.8281014
3	-521.3278129
4	-522.0231919
5	-522.9118734
6	-523.9915308
7	-525.2598701
8	-526.7146223
9	-528.353536
10	-530.1743692
11	-532.1748798
12	-534.3528166
13	-536.7059092
14	-539.2318571
15	...

$$F_2 =$$

0	
0	0
1	306.4868668
2	306.7169185
3	307.0975989
4	307.6264226
5	308.3006967
6	309.117525
7	310.0738123
8	311.1662665
9	312.3914012
10	313.7455364
11	315.224799
12	316.8251224
13	318.5422459
14	320.3717139
15	...

$$F_3 =$$

0	
0	0
1	547.070529757064
2	546.935178314398
3	546.710913541276
4	546.398770343437
5	545.999745451609
6	545.51479950498
7	544.944859204577
8	544.290819540873
9	543.553546100935
10	542.733877462178
11	541.83262768174
12	540.850588890461
13	539.788534003124
14	538.647219554163
15	...

$$F_4 =$$

0	
0	0
1	-78.9998307
2	-79.2685159
3	-79.7137269
4	-80.3334455
5	-81.1257438
6	-82.0887807
7	-83.220798
8	-84.5201171
9	-85.9851357
10	-87.6143246
11	-89.4062244
12	-91.359443
13	-93.4726522
14	-95.7445854
15	...

$$n =$$

0	
0	0
1	0.1
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.7
8	0.8
9	0.9
10	1
11	1.1
12	1.2
13	1.3
14	1.4
15	...

$$a_1 := \left(\text{mmm}^{(12)} \right)_0$$

$$a_2 := \left(\text{mmm}^{(13)} \right)_0$$

$$a_3 := \left(\text{mmm}^{(14)} \right)_0$$

$$a_4 := \left(\text{mmm}^{(15)} \right)_0$$

$$a_1 =$$

0	
0	0
1	-8.395715
2	-8.2478934
3	-8.0739117
4	-7.8749104
5	-7.652012
6	-7.4063225
7	-7.1389324
8	-6.8509172
9	-6.5433391
10	-6.2172477
11	-5.8736814
12	-5.5136682
13	-5.1382273
14	-4.7483698
15	...

$$a_2 =$$

0	
0	0
1	-14.8619266
2	-14.6437036
3	-14.4064861
4	-14.1510378
5	-13.8780882
6	-13.5883355
7	-13.2824485
8	-12.9610693
9	-12.6248149
10	-12.2742803
11	-11.9100397
12	-11.5326491
13	-11.1426479
14	-10.7405613
15	...

$$a_3 =$$

0	
0	0
1	-9.2281349
2	-9.0734309
3	-8.8948323
4	-8.6933279
5	-8.4698735
6	-8.2253938
7	-7.9607852
8	-7.6769179
9	-7.3746385
10	-7.0547721
11	-6.7181251
12	-6.3654867
13	-5.9976317
14	-5.6153224
15	...

$$a_4 =$$

0	
0	0
1	11.3016805
2	11.1549834
3	11.0059939
4	10.8548093
5	10.7015242
6	10.546231
7	10.3890199
8	10.2299789
9	10.0691941
10	9.9067497
11	9.7427279
12	9.5772095
13	9.4102734
14	9.2419974
15	...

$$A_1 := \left(\text{mmm}^{(16)} \right)_0$$

$$A_2 := \left(\text{mmm}^{(17)} \right)_0$$

$$A_3 := \left(\text{mmm}^{(18)} \right)_0$$

$$A_4 := \left(\text{mmm}^{(19)} \right)_0$$

$$A_1 =$$

0	
0	0
1	135.3148152
2	135.3274332
3	135.3484293
4	135.3778387
5	135.4157508
6	135.4623083
7	135.5177066
8	135.5821942
9	135.6560729
10	135.7396982
11	135.8334803
12	135.9378849
13	136.053435
14	136.1807115
15	...

$$A_2 =$$

0	
0	0
1	110.3122918
2	110.3265167
3	110.3498208
4	110.3817075
5	110.4215426
6	110.4685623
7	110.5218821
8	110.5805047
9	110.6433295
10	110.7091619
11	110.7767223
12	110.8446561
13	110.9115433
14	110.9759085
15	...

$$A_3 =$$

0	
0	0
1	115.9534676
2	115.8488405
3	115.6758356
4	115.4357692
5	115.1301187
6	114.7605141
7	114.3287316
8	113.8366845
9	113.2864165
10	112.6800936
11	112.0199966
12	111.3085132
13	110.5481307
14	109.7414278
15	...

$$A_4 =$$

0	
0	0
1	0.0038055
2	0.0096577
3	0.0321556
4	0.063865
5	0.1050706
6	0.1561598
7	0.2176191
8	0.2900291
9	0.3740611
10	0.4704722
11	0.580102
12	0.7038684
13	0.8427643
14	0.9978532
15	...

неопределенная траектория

$$\begin{aligned}
 t_o &:= 0 \\
 l_{1_o} &:= l_{1n}(0) & l_{2_o} &:= l_{2n}(0) & l_{3_o} &:= l_{3n}(0) & l_{4_o} &:= l_{4n}(0) & \phi_o &:= \phi_n(0) \\
 l_{1_o} &= 1400 & l_{2_o} &= 1500 & l_{3_o} &= 1352 & l_{4_o} &= 911.8948391 & \phi_o &= 0.323 \\
 x_o &:= x_n(0) & y_o &:= y_n(0) & z_o &:= z_n(0) \\
 x_o &= -297.2507042 & y_o &= 1129.7067108 & z_o &= 740.4942717 \\
 a_{xn}(t) &:= \frac{d^2}{dt^2} x_n(t) & a_{yn}(t) &:= \frac{d^2}{dt^2} y_n(t) & a_{zn}(t) &:= \frac{d^2}{dt^2} z_n(t) & \varepsilon_n(t) &:= \frac{d^2}{dt^2} \phi_n(t) \\
 a_{ax} &:= a_{xn}(0) & a_{ay} &:= a_{yn}(0) & a_{az} &:= a_{zn}(0) & a_{\varepsilon} &:= \varepsilon_n(0) \\
 a_{ax} &= 0 & a_{ay} &= -0 & a_{az} &= -0 & a_{\varepsilon} &= 0 \\
 g &:= 9.810 & OA_1 &= 750 & OO_1 &= -40 & z_d &= -40 & m &:= 45 & m_a &:= 50 \\
 F_{1n} &:= 0 & F_{2n} &:= 0 & F_{3n} &:= 0 & F_{4n} &:= 0 & AA &:= 0
 \end{aligned}$$

$$a_n(t) := \sqrt{\left(\frac{d^2}{dt^2} x_n(t)\right)^2 + \left(\frac{d^2}{dt^2} y_n(t)\right)^2 + \left(\frac{d^2}{dt^2} z_n(t)\right)^2}$$

Given

$$F_{1n} \cdot \frac{x_o}{m \cdot l_{1_o}} + F_{2n} \cdot \frac{x_o - x_b}{m \cdot l_{2_o}} + F_{3n} \cdot \frac{x_o + x_b}{m \cdot l_{3_o}} = \frac{a_{ax}}{1000}$$

$$F_{1n} \cdot \frac{y_o + OA_1 \cdot \sin(\phi_o) - y_b}{m \cdot l_{1_o}} + F_{2n} \cdot \frac{y_o - y_b}{m \cdot l_{2_o}} + F_{3n} \cdot \frac{y_o - y_b}{m \cdot l_{3_o}} = \frac{a_{ay}}{1000}$$

$$F_{1n} \cdot \frac{z_o - OA_1 \cdot \cos(\phi_o)}{m \cdot l_{1_o}} + F_{2n} \cdot \frac{z_o}{m \cdot l_{2_o}} + F_{3n} \cdot \frac{z_o}{m \cdot l_{3_o}} - g = \frac{a_{az}}{1000}$$

$$F_{1n} \cdot \frac{(y_o - y_b) \cdot \cos(\phi_o) + z_o \cdot \sin(\phi_o)}{OA_1 \cdot m_a \cdot l_{1_o}} + F_{4n} \cdot \frac{z_d \cdot \sin(\phi_o) - y_b \cdot \cos(\phi_o)}{OA_1 \cdot m_a \cdot l_{4_o}} + \frac{g \cdot \sin(\phi_o)}{OA_1} = \frac{a_{\varepsilon}}{1000}$$

$$AA(l_{1_o}, l_{2_o}, l_{3_o}, l_{4_o}, x_o, y_o, z_o, \phi_o) := \text{Find}(F_{1n}, F_{2n}, F_{3n}, F_{4n})$$

$$AA(l_{1_o}, l_{2_o}, l_{3_o}, l_{4_o}, x_o, y_o, z_o, \phi_o) = \begin{pmatrix} -523.0147833 \\ 309.1439083 \\ 547.3316779 \\ -81.1726618 \end{pmatrix}$$

$$t := 0 \quad T_{1k} = 16.0127735$$

$t := 0$ $T_{1k} = 16.0127735$

mmm := for $i \in 1 .. T_{1k} \cdot 10$

$t \leftarrow t + 0.1$

$x_o \leftarrow xn(t)$

$y_o \leftarrow yn(t)$

$z_o \leftarrow zn(t)$

$l1_o \leftarrow l1n(t)$

$l2_o \leftarrow l2n(t)$

$l3_o \leftarrow l3n(t)$

$l4_o \leftarrow l44n(t)$

$\phi_o \leftarrow \phi n(t)$

$aax_i \leftarrow axn(t)$

$aay_i \leftarrow ayn(t)$

$aaz_i \leftarrow azn(t)$

$a\epsilon_i \leftarrow \epsilon n(t)$

$CCC \leftarrow AA(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, x_o, y_o, z_o, \phi_o)$

$F1n_i \leftarrow \left[\left(CCC^{(0)} \right)_0 \right]$

$F2n_i \leftarrow \left[\left(CCC^{(0)} \right)_1 \right]$

$F3n_i \leftarrow \left[\left(CCC^{(0)} \right)_2 \right]$

$F4n_i \leftarrow \left[\left(CCC^{(0)} \right)_3 \right]$

$V1n_i \leftarrow \frac{d}{dt} l1n(t)$

$V2n_i \leftarrow \frac{d}{dt} l2n(t)$

$V3n_i \leftarrow \frac{d}{dt} l3n(t)$

$$V_{4n_i} \leftarrow \frac{d}{dt} l_{44n}(t)$$

$$a_{1n_i} \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l_{1n}(t)$$

$$a_{2n_i} \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l_{2n}(t)$$

$$a_{3n_i} \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l_{3n}(t)$$

$$a_{4n_i} \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l_{44n}(t)$$

$$N_{4n_i} \leftarrow \frac{F_{4n_i} \cdot V_{4n_i}}{1000}$$

$$N_{1n_i} \leftarrow \frac{F_{1n_i} \cdot V_{1n_i}}{1000}$$

$$N_{2n_i} \leftarrow \frac{F_{2n_i} \cdot V_{2n_i}}{1000}$$

$$N_{3n_i} \leftarrow \frac{F_{3n_i} \cdot V_{3n_i}}{1000}$$

$$A_{1n_i} \leftarrow \left| \frac{F_{1n_i} \cdot (l_{1n}(t) - 1140)}{1000} \right|$$

$$A_{2n_i} \leftarrow \left| \frac{F_{2n_i} \cdot (l_{2n}(t) - 1140)}{1000} \right|$$

$$A_{3n_i} \leftarrow \left| \frac{F_{3n_i} \cdot (l_{3n}(t) - 1140)}{1000} \right|$$

$$A_{4n_i} \leftarrow \left| \frac{F_{4n_i} \cdot (l_{44n}(t) - 912)}{1000} \right|$$

$$n_i \leftarrow t$$

(F_{1n} F_{2n} F_{3n} F_{4n} N_{1n} N_{2n} N_{3n} N_{4n} V_{1n} V_{2n} V_{3n} V_{4n} a_{1n} a_{2n} a_{3n} a_{4n} A_{1n} A_{2n} A_{3n} A_{4n} n)

$$\underline{\underline{F_{1n}}} := \left(\text{mmm}^{\langle 0 \rangle} \right)_0 \quad \underline{\underline{F_{2n}}} := \left(\text{mmm}^{\langle 1 \rangle} \right)_0 \quad \underline{\underline{F_{3n}}} := \left(\text{mmm}^{\langle 2 \rangle} \right)_0 \quad \underline{\underline{F_{4n}}} := \left(\text{mmm}^{\langle 3 \rangle} \right)_0 \quad n := \left(\text{mmm}^{\langle 20 \rangle} \right)_0$$

$$F_{1n} := \left(mmm \langle 0 \rangle \right)_0 \quad F_{2n} := \left(mmm \langle 1 \rangle \right)_0 \quad F_{3n} := \left(mmm \langle 2 \rangle \right)_0 \quad F_{4n} := \left(mmm \langle 3 \rangle \right)_0 \quad n := \left(mmm \langle 20 \rangle \right)_0$$

$$F_{1n} =$$

	0
0	0
1	-523.0167144
2	-523.0302289
3	-523.0668913
4	-523.1382281
5	-523.2557066
6	-523.4307134
7	-523.6745311
8	-523.9983149
9	-524.4130677
10	-524.9296145
11	-525.5585763
12	-526.3103435
13	-527.1950481
14	-528.2225367
15	...

$$F_{2n} =$$

	0
0	0
1	309.1451633
2	309.1539455
3	309.1777696
4	309.2241229
5	309.30045
6	309.4141344
7	309.5724799
8	309.7826894
9	310.0518428
10	310.3868735
11	310.7945435
12	311.281418
13	311.8538381
14	312.5178942
15	...

$$F_{3n} =$$

	0
0	0
1	547.33125549732
2	547.328299549268
3	547.320280520243
4	547.304677106429
5	547.278980595563
6	547.240699409658
7	547.187363806472
8	547.116530727842
9	547.025788778665
10	546.912763320756
11	546.775121663693
12	546.610578332803
13	546.416900394363
14	546.191912817572
15	...

$$F_{4n} =$$

	0
0	0
1	-81.1744287
2	-81.1867938
3	-81.2203392
4	-81.2856149
5	-81.3931237
6	-81.5533056
7	-81.7765234
8	-82.0730482
9	-82.4530454
10	-82.9265614
11	-83.5035101
12	-84.1936604
13	-85.0066242
14	-85.9518439
15	...

$$n =$$

	0
0	0
1	0.1
2	0.2
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.6
7	0.7
8	0.8
9	0.9
10	1
11	1.1
12	1.2
13	1.3
14	1.4
15	...

$$a_{1n} := \left(mmm \langle 12 \rangle \right)_0$$

$$a_{2n} := \left(mmm \langle 13 \rangle \right)_0$$

$$a_{3n} := \left(mmm \langle 14 \rangle \right)_0$$

$$a_{4n} := \left(mmm \langle 15 \rangle \right)_0$$

$$a_{1n} =$$

	0
0	0
1	0.3172719
2	0.6340555
3	0.9498629
4	1.264208
5	1.5766069
6	1.8865787
7	2.1936462
8	2.4973366
9	2.7971824
10	3.0927221
11	3.3835006
12	3.6690703
13	3.9489916
14	4.2228335
15	...

$$a_{2n} =$$

	0
0	0
1	0.1119747
2	0.2237771
3	0.3352349
4	0.4461767
5	0.5564316
6	0.6658299
7	0.7742032
8	0.8813846
9	0.9872091
10	1.0915139
11	1.1941383
12	1.2949243
13	1.3937169
14	1.4903639
15	...

$$a_{3n} =$$

	0
0	0
1	0.3761285
2	0.7516779
3	1.1260701
4	1.4987288
5	1.8690803
6	2.2365544
7	2.6005853
8	2.9606127
9	3.3160824
10	3.6664471
11	4.0111673
12	4.3497125
13	4.6815615
14	5.0062033
15	...

$$a_{4n} =$$

	0
0	0
1	0.3848178
2	0.7690432
3	1.1520847
4	1.5333526
5	1.9122599
6	2.2882234
7	2.6606642
8	3.0290091
9	3.3926908
10	3.7511496
11	4.1038337
12	4.4502
13	4.7897153
14	5.1218571
15	...

$$A_{1n} := \left(mmm \langle 16 \rangle \right)_0$$

$$A_{2n} := \left(mmm \langle 17 \rangle \right)_0$$

$$A_{3n} := \left(mmm \langle 18 \rangle \right)_0$$

$$A_{4n} := \left(mmm \langle 19 \rangle \right)_0$$

$$A_{1n} =$$

	0
0	0
1	135.9846224
2	135.990072
3	136.0048564
4	136.0336263
5	136.0810124
6	136.1516205
7	136.2500256
8	136.3807674
9	136.5483459
10	136.7572171
11	137.0117895
12	137.3164207
13	137.6754143
14	138.0930172
15	...

$$A_{2n} =$$

	0
0	0
1	111.2923165
2	111.2958819
3	111.3055543
4	111.324374
5	111.3553653
6	111.4015298
7	111.4658396
8	111.5512305
9	111.6605943
10	111.7967707
11	111.9625399
12	112.1606133
13	112.3936253
14	112.6641246
15	...

$$A_{3n} =$$

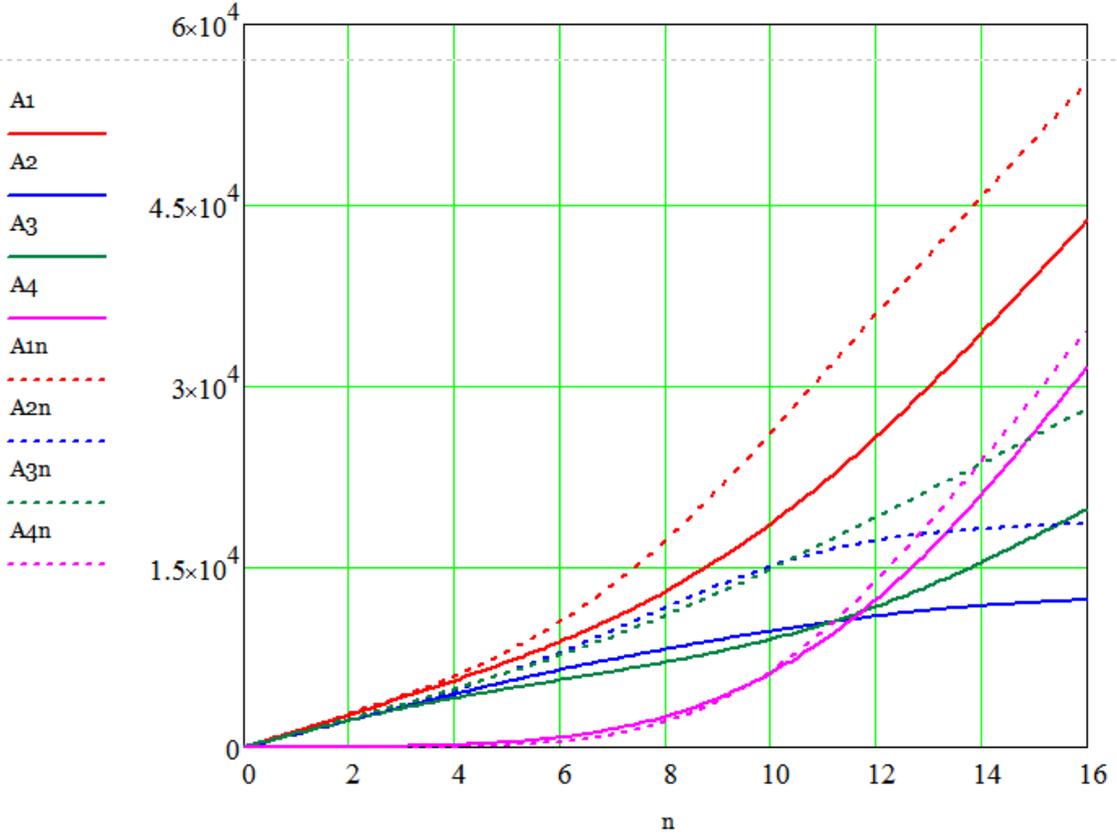
	0
0	0
1	116.0345693
2	116.0363442
3	116.0411593
4	116.0505282
5	116.0659572
6	116.088942
7	116.1209645
8	116.1634903
9	116.2179654
10	116.2858125
11	116.3684283
12	116.4671794
13	116.5833996
14	116.718386
15	...

$$A_{4n} =$$

	0
0	0
1	0.0084843
2	0.0081211
3	0.0071353
4	0.0052148
5	0.0020449
6	0.0026933
7	0.009327
8	0.0181945
9	0.0296505
10	0.044071
11	0.0618589
12	0.0834506
13	0.1093229
14	0.14
15	...

$$\sum A_1 = 43752.0408374 \quad \sum A_2 = 12232.9027169 \quad \sum A_3 = 19768.6846181 \quad \sum A_4 = 31525.1165368$$

$$\sum A_{1n} = 55216.6983737 \quad \sum A_{2n} = 18577.2808674 \quad \sum A_{3n} = 28130.5555209 \quad \sum A_{4n} = 34611.8894392$$



Листинг программы пульта управления манипулятором через радиоканал

```

// Подключение библиотеки для работы с передатчиком FS1000A
#include <iarduino_RF433_Transmitter.h>
// Создание объекта radio для работы с библиотекой iarduino_RF433, указание
номера вывода к которому подключён передатчик
iarduino_RF433_Transmitter radio(12);
// Создание массива для передачи данных
int data[5];
// Инициирование работы передатчика FS1000A (в качестве параметра можно
указать скорость ЧИСЛО бит/сек, тогда можно не вызывать функцию setDataRate)
void setup(){Serial.begin(9600);
  radio.begin();
  // Указание скорости передачи данных (i433_5KBPS, i433_4KBPS, i433_3KBPS,
i433_2KBPS, i433_1KBPS, i433_500BPS, i433_100BPS), i433_1KBPS - 1кбит/сек
  radio.setDataRate (i433_1KBPS);
  // Открытие 5 трубы для передачи данных (передатчик может передавать данные
только по одной из труб: 0...7)
  radio.openWritingPipe (5);
  // Если повторно вызвать функцию openWritingPipe, указав другой номер трубы, то
передатчик начнёт передавать данные по вновь указанной трубе
}
void loop(){
  // считывание показаний Trema слайдера с вывода A1 и запись их в 0 элемент
массива data
  data[0] = analogRead(A1);
  // считывание показаний Trema потенциометра с вывода A2 и записываем их в 1
элемент массива data
  data[1] = analogRead(A2);
  data[2] = analogRead(A3);
  data[3] = analogRead(A0);
  data[4] = analogRead(A4);
  // отправка данных из массива data, указание сколько байт массива отправить
  radio.write(&data, sizeof(data));
  //Serial.println (data[4]);
  delay(10);
}

```

Листинг программы управляемого устройства

```
// Подключение библиотеки для работы с приёмником MX-RM-5V
#include <Servo2.h>
#include <iarduino_RF433_Receiver.h>
// Создание объекта radio для работы с библиотекой iarduino_RF433, указание
номера вывода к которому подключён приёмник (можно подключать только к выводам,
использующим внешние прерывания)
iarduino_RF433_Receiver radio(2);
// Создаём массив для приёма данных
Servo2 servo;
int          data[5];
int in1 = 4;
int in2 = 5;
int in5 = 9;
int in6 = 8;
int in7 = 11;
int in8 = 10;
int in3 = 6;
int in4 = 7;
int a;
int b;
int c;
int d;
int s;
int raw,raw_last,raw_min,raw_max=0;
int raw1,raw1_last,raw1_min,raw1_max=0;

int raw4,raw4_last,raw4_min,raw4_max=0;
int raw5,raw5_last,raw5_min,raw5_max=0;

int raw_6,raw_6_last,raw_6_min,raw_6_max=0;
int raw7,raw7_last,raw7_min,raw7_max=0;

int hysteres=10;
// Создание константы с указанием вывода ШИМ к которому подключён светодиод
//const int pinServo=3;
int angleServo;
/*const uint8_t      pinLED=11;
const uint8_t      pinLED1=10;
const uint8_t      pinLED2=5;*/
void setup(){
  servo.attach(3);
  pinMode(in1, OUTPUT);
  pinMode(in2, OUTPUT);
  // Инициация работы LED индикатора
  Serial.begin(9600);
  // Инициация работы приёмника MX-RM-5V (в качестве параметра можно указать
скорость ЧИСЛО бит/сек, тогда можно не вызывать функцию setDataRate)
  radio.begin();
```

```

// Указание скорости приёма данных (i433_5KBPS, i433_4KBPS, i433_3KBPS,
i433_2KBPS, i433_1KBPS, i433_500BPS, i433_100BPS), i433_1KBPS - 1кбит/сек
    radio.setDataRate (i433_1KBPS);
// Открытие 5 трубы для приема данных (если вызвать функцию без параметра, то
будут открыты все трубы сразу, от 0 до 7)
    radio.openReadingPipe (5);
// Включаем приемник, начинаем прослушивать открытую трубу
    radio.startListening ();
}

void loop(){
// Если в буфере имеются принятые данные
    if(radio.available()){
// Чтение данных в массив data и указываем сколько байт читать
    radio.read(&data, sizeof(data));
//Значение потенциометра с пульта управляющего звена 0
        a=data[1];
//Значение потенциометра с пульта управляющего звена 3
        b=data[0];
//Значение потенциометра с пульта управляющего звена 2
        c=data[2];
//Значение потенциометра с пульта управляющего звена отвечающего за наклон
подвижного основания
        d=data[3];
//Значение потенциометра поворотного основания с пульта
        s=data[4];
//преобразование значения потенциометра в угол поворота сервопривода
        angleServo=map(s,0,1023,0,179);
        //Serial.println (angleServo);
        //servo.write(angleServo);
    }
// получаем текущее значение потенциометра актуатора 0
    int sensorValue = analogRead(A0);
// получаем текущее значение потенциометра актуатора 3
    int sensorValue1 = analogRead(A3);
// получаем текущее значение потенциометра актуатора 2
    int sensorValue2 = analogRead(A2);
    int sensorValue3 = analogRead(A1);
//присваивание переменной x значение разности потенциометра актуатора 1 и
потенциометра пульта 1
    /* int x=(sensorValue-a);
//присваиваем переменной y значение разности потенциометра актуатора 2 и
потенциометра пульта 2
    int y=(sensorValue1-b);
    int z=(sensorValue2-c);
// Если вызвать функцию available с параметром в виде ссылки на переменную типа
uint8_t, то мы получим номер трубы, по которой пришли данные
*/ int v=(sensorValue3-d);

    int x=(sensorValue-a);
    raw=a;
    raw_min=raw_last-hysteresis;

```

```

raw_max=raw_last+hysterese;

if((raw!=raw_last))
{
  if((raw>raw_max)||(raw<raw_min))
  {
    //Serial.print("pult0:");
    // Serial.println(raw);
    raw_last=raw;
  }
}
raw1=sensorValue;
raw1_min=raw1_last-hysterese;
raw1_max=raw1_last+hysterese;

if((raw1!=raw1_last))
{
  if((raw1>raw1_max)||(raw1<raw1_min))
  {
    /* Serial.print("aktuator0:");
    Serial.println(raw1);*/
    raw1_last=raw1;
  }
}
int y=(sensorValue1-b);
raw4=b;
raw4_min=raw4_last-hysterese;
raw4_max=raw4_last+hysterese;

if((raw4!=raw4_last))
{
  if((raw4>raw4_max)||(raw4<raw4_min))
  {
    Serial.print("pult3:");
    Serial.println(raw4);
    raw4_last=raw4;
  }
}

raw5=analogRead(A3);
raw5_min=raw5_last-hysterese;
raw5_max=raw5_last+hysterese;

if((raw5!=raw5_last))
{
  if((raw5>raw5_max)||(raw5<raw5_min))
  {
    Serial.print("aktuator3:");
    Serial.println(raw5);
    raw5_last=raw5;
  }
}

```

```

int z=(sensorValue2-c);
raw_6=c;
raw_6_min=raw_6_last-hysterese;
raw_6_max=raw_6_last+hysterese;

if((raw_6!=raw_6_last))
{
  if((raw_6>raw_6_max)||(raw_6<raw_6_min))
  {
    //Serial.print("pult2:");
    //Serial.println(raw_6);
    raw_6_last=raw_6;
  }
}
raw_6=analogRead(A2);
raw7_min=raw7_last-hysterese;
raw7_max=raw7_last+hysterese;

if((raw7!=raw7_last))
{
  if((raw7>raw7_max)||(raw7<raw7_min))
  {
    //Serial.print("aktuator2:");
    //Serial.println(raw7);
    raw7_last=raw7;
  }
}
actuatorSetValue(x , in1, in2);
actuatorSetValue(z , in5, in6);
actuatorSetValue(y , in7, in8);
actuatorSetValue(v , in3, in4);
}
void actuatorSetValue(int val ,int pin_a, int pin_b)
{
  if (val>20)
  {
    digitalWrite (pin_a, HIGH);// Действие А
    digitalWrite (pin_b, LOW);
  }
  else if (val<-15)
  {
    digitalWrite (pin_a, LOW);
    digitalWrite (pin_b, HIGH);// Действие В
  }
  else
  {
    digitalWrite (pin_a, LOW);
    digitalWrite (pin_b, LOW);// Действие С
  }
}
}

```