

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Волгоградский государственный аграрный университет"

На правах рукописи



Несмиянов Иван Алексеевич

**СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ МАНИПУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ
ТРИПОДА**

Специальность: 05.02.18 – Теория механизмов и машин

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант: доктор
физико-математических наук,
доцент В.В. Жога

Волгоград - 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ.....	31
1.1. Погрузочные манипуляторы как объект роботизации.....	31
1.2. Манипуляторы параллельной структуры и их применение в робототехнических комплексах и технологических процессах.....	39
1.2.1. Промышленные грузоподъемные роботы и манипуляторы на основе параллельных механизмов.....	41
1.2.2. Комбинированные манипуляторы параллельной структуры.....	45
1.2.3. Дельта – манипуляторы.....	49
1.2.4. Применение манипуляторов-триподов в непромышленных отраслях.....	51
1.2.5. Применение триподов в транспортных системах.....	52
1.3. Погрузочные манипуляторы параллельно-последовательной структуры на основе трипода.....	55
1.4. Методы исследования манипуляторов параллельной структуры.....	65
1.4.1 Особенности структурного строения, анализа и синтеза манипуляторов параллельной структуры.....	65
1.4.2. Кинематические параметры манипуляторов на базе трипода.....	76
Выводы по главе.....	80
2. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО- ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА БАЗЕ ТРИПОДОВ	82
2.1. Структурный анализ манипуляторов-триподов.....	82
2.2. Эволюция кинематических схем манипуляторов параллельно- последовательной структуры на базе трипода.....	89

2.3. Структурный синтез механизмов параллельно-последовательных манипуляторов на базе трипода.....	108
2.3.1. Итерационный синтез механизмов манипуляторов.....	108
2.4. Итерационный синтез механизмов манипуляторов с ограничением границ поиска рациональных структурных схем.....	112
2.5. Оптимизационный синтез манипуляторов с дополнительными ограничениями области существования (задача условной оптимизации).....	116
2.6. Геометрический синтез параллельно-последовательных манипуляторов	120
Выводы по главе.....	127
3. ЗАДАЧА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА МАНИПУЛЯТОРА ТРИПОДА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ.....	129
3.1. Кинематика манипулятора-трипода на подвижном основании.....	129
3.2. Алгоритм формирования объема зоны обслуживания манипулятора-трипода.....	132
3.3. Геометрико-статические параметры манипулятора-трипода.....	136
3.4. Кинематическая управляющая матрица.....	145
3.5. Планирование траекторий погрузочного манипулятора	144
3.6. Позиционирование манипулятора параллельно-последовательной структуры.....	151
3.7. Обеспечение требуемой траектории захвата манипулятора-трипода.....	156
3.8. Условия существования оптимальных траекторий в пределах зоны обслуживания	162
3.9. Реализация движения выходного звена манипулятора-трипода по заданным криволинейным траекториям.....	167
Выводы по главе.....	172

4. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ.....	174
4.1. Обоснование расчетной схемы манипулятора.....	174
4.1.1. Расчет приведенных масс.....	176
4.2. Уравнения движения трехмассовой модели манипулятора.....	179
4.3. Динамика привода с упругой самотормозящейся передачей.....	186
4.3.1. Дифференциальные уравнения привода с учетом податливости передаточного механизма.....	186
4.3.2. Условия отсутствия силового и динамического заклинивания.....	189
4.3.3. Устойчивость движения привода исполнительных звеньев манипулятора.....	191
4.3.4. Анализ динамических ошибок.....	193
4.4. Результаты численных экспериментов.....	195
4.5. Динамический синтез оптимальных законов перемещения исполнительных звеньев манипулятора.....	200
4.5.1. Постановка задачи.....	201
4.5.2. Синтез оптимальных программных усилий при заданной конечной конфигурации манипулятора.....	203
4.6. Синтез оптимальных программных усилий при неизвестной конфигурации манипулятора в конечный момент времени.....	210
4.7. Результаты численного моделирования движения захвата по заданным программным законам движения и траекториям.....	213
Выводы по главе.....	219
5. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ.....	221
5.1 Архитектура системы управления.....	223

5.2. Схемная реализация централизованной системы управления манипуляторами.....	224
5.3. Схемная реализация распределенной системы управления манипуляторами.....	227
5.4. Программное обеспечение системы управления	232
5.5 Особенности системного программного обеспечения модулей нижнего уровня.....	235
5.6. Результаты численного и экспериментального моделирования.....	237
5.7. Идентификация параметров математической модели манипулятора.....	240
5.7.1. Динамика парциальных движений манипулятора.....	241
5.7.2. Динамика упругого привода манипулятора при перемещении одной дискретной массы.....	243
5.7.3. Динамика упругого привода манипулятора при перемещении двух дискретных масс.....	246
5.7.4. Результаты численных экспериментов парциальных движений.....	247
5.7.5. Определение собственных частот механизма привода манипулятора.....	253
5.7.6. Спектральный анализ экспериментальных результатов.....	257
Выводы по главе.....	258
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	260
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	262
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	312
Приложение №1. Значения основных параметров структурного строения манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода.....	312
Приложение №2. Листинг программы структурного анализа пространственных механизмов манипуляторов.....	313
Приложение №3. Листинг программы итерационного синтеза	

манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода.....	314
Приложение №4. Листинг и экранная копия программы для построения сечений зоны обслуживания манипулятора координатными плоскостями.....	315
Приложение №5. Листинг и экранная копия программы для построения геометрико-статической характеристики манипулятора-трипода на <i>Visual Basic 6.0</i>	318
Приложение №6. Алгоритм численного моделирования движения захвата манипулятора по различным траекториям и программным законам в среде <i>Mathcad</i>	322

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Работа посвящена решению проблем структурного и параметрического синтеза, механики и управления манипуляторов параллельно – последовательной структуры на основе трипода с поворотным основанием, синтеза и реализации заданных траекторий выходного звена манипуляторов.

В современных технологических процессах машиностроения, строительства, сельского хозяйства, ликвидации техногенных катастроф перемещается большое количество грузов, попадающих под понятие «штучные», работа с которыми наиболее трудоёмкая. Для механизации этих работ создано большое количество разнообразных машин, облегчающих ручной труд и увеличивающих его производительность. Причём, в промышленно развитых странах достигнутый уровень развития техники позволяет перейти от наращивания энергетических мощностей и насыщения техникой к качественно новому этапу – созданию робототехнических систем. Наиболее трудоёмкими являются операции в сельском хозяйстве, где происходит взаимодействие с растительными и животными объектами. Однако современные разработки и опытные модели в области робототехники позволяют судить о принципиальной возможности роботизации многих видов сельскохозяйственных работ, таких как высаживание рассады, сбор товарной фруктовой продукции, прополка овощных культур, сбор бахчевых плодов, обрезка виноградников. Существующие модели промышленных роботов не могут быть непосредственно применены для выполнения указанных технологических операций. Поэтому научные исследования по разработке и использованию роботов в сельском хозяйстве должны проводиться и являются актуальными, так как нет альтернативы в применении роботов для высвобождения человека от монотонного физически тяжёлого труда.

Использование манипуляционных робототехнических систем в агропромышленном комплексе является существенным резервом повышения производительности труда. Сельскохозяйственное производство характеризуется разнообразностью работ и технологических процессов, соответственно и областей применения манипуляторов роботов довольно большое количество [11, 13, 26, 64, 79, 101, 147, 148, 187, 256, 257, 285, 286, 295]. Применение робототехнических манипуляционных систем в сельском хозяйстве в настоящее время находится на низком уровне, хотя доля ручного труда в растениеводстве и животноводстве составляет более 40%. Существующие манипуляционные роботы сельскохозяйственного назначения, как правило, серийно не выпускаются и существуют в единичных экземплярах, как опытные образцы, требующие постоянной доработки. Низкий уровень использования и внедрения манипуляционных систем роботов в агропромышленном комплексе связан с рядом проблем:

- *экономические* – дороговизна манипуляторов и соответственно повышенный срок окупаемости, недостаточно высокая производительность;
- *технические* – существующий уровень разработок сельскохозяйственных манипуляторов не предусматривает унификацию сменного рабочего оборудования, модулей, узлов, к тому же имеющиеся разработки не обеспечивают необходимых требований к качеству выполняемых работ;
- *эксплуатационные* – уровень технического обслуживания в корне отличается от обслуживания традиционных сельскохозяйственных машин, отсутствие сервисных служб, которые необходимо развивать с увеличением роботов в АПК;
- *социальные* – проблемы, связанные с низким кадровым потенциалом на селе.

Сельскохозяйственные манипуляционные роботы можно подразделить на пять основных классов: роботы для растениеводства [26, 79, 253, 256, 257, 370]; роботы для животноводства [101, 187, 285, 286, 391]; роботы для погрузочно-разгрузочных и транспортных складских операций [61, 63, 87, 156, 361]; роботы

для природообустройства, ландшафтных и садово - парковых работ [118, 192]; работы для первичной переработки, сортировки и упаковки сельскохозяйственной продукции [47, 148, 275, 276, 366, 390, 398].

Наиболее трудоёмкими в агропромышленном производстве являются погрузочно-разгрузочные работы с сыпучими грузами (зерно, удобрения, гранулированные комбикорма), работа с контейнерами, пакетированными грузами, мешками и тюками, работа с нестандартными грузами. До настоящего времени в наименьшей степени поддаются механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочные и транспортно-складские работы при переработке сельскохозяйственной продукции: сортировка плодов и овощей, пакетирование и затаривание [64, 187, 226, 265].

Погрузо-разгрузочные и транспортные работы в сельскохозяйственном производстве являются наиболее трудоёмкими процессами, на которые приходится 40-45 % затрат живого труда и 20 % всех материально-денежных расходов на производство продукции (рисунок В.1).

Общая номенклатура перерабатываемых штучных грузов в сельском хозяйстве находится в диапазоне 160-250 наименований и включает продукцию различных отраслей народного хозяйства. Объем грузопереработки при обслуживании машинно-тракторного парка достигает 3,5 тыс. тонн, причем все грузы штучные.

Объем зерновых культур в общем грузообороте равен 37 %, а основная доля штучных и затаренных грузов падает на семенной фонд (мешки) и сено в тюках, следует отметить что на погрузочно-разгрузочные операции с мешками и их укладку уходит 48 % общего времени технологического цикла. Масса одного мешка достигает 80 кг и для погрузки и укладки его требуется не менее двух рабочих. Штучные грузы в животноводстве составляют 7-10 % от общего объема продукции, а масса единицы груза не превышает 100 кг. Значительные объемы перевозок в сельском хозяйстве связаны с транспортировкой минеральных удобрений. Наибольшая часть удобрений поступает в таре, представляющей

бумажные или полиэтиленовые мешки массой 45-50 кг. В настоящее время появился новый вид упаковки - мягкие контейнеры, с массой брутто от 1000 кг.

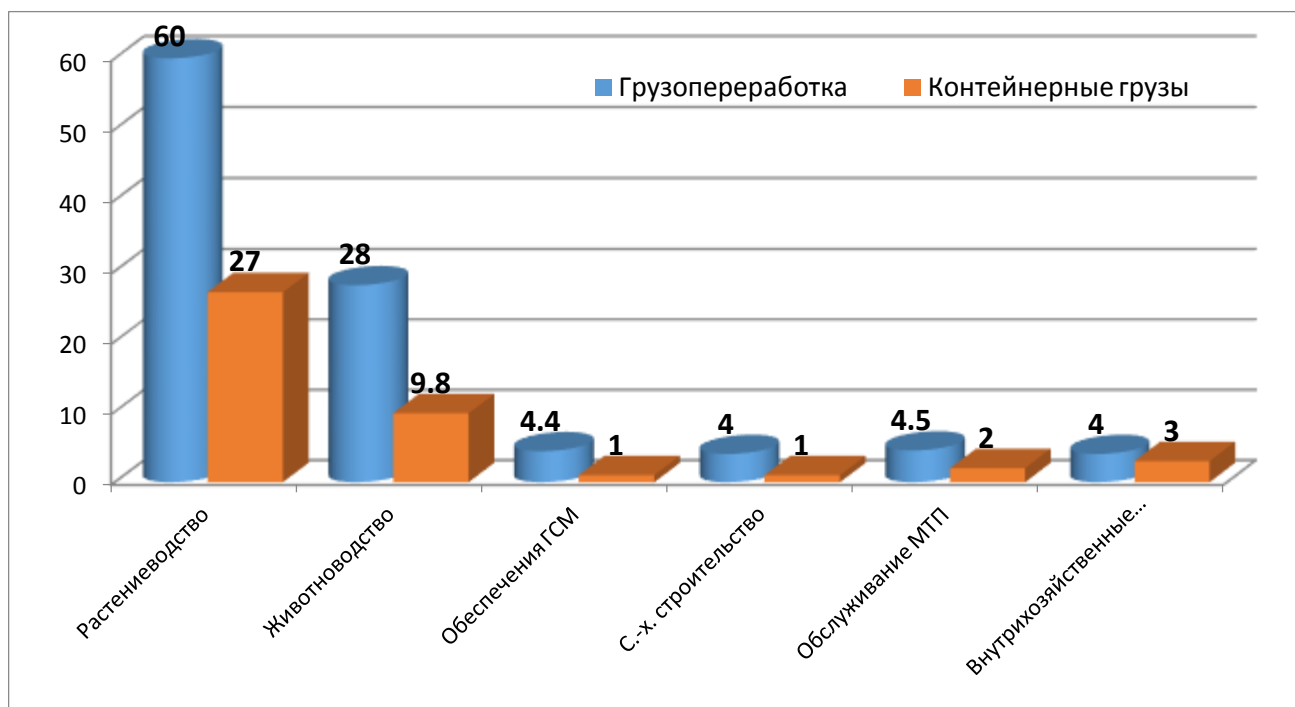


Рисунок В.1. – Распределение грузов сельскохозяйственного производства по отраслям, %

В связи с этим необходимы исследования по созданию специальных манипуляторов, грузозахватных устройств, исполнительных элементов, выполненных в защищённом от внешних воздействий вариантах, оригинальных алгоритмов управления. Кроме того, одним из существенных недостатков, известных манипуляционных робототехнических систем, является низкое отношение массы перемещаемых грузов к массе манипулятора, что снижает диапазон их применения [293, 392].

Сложность ручного управления погрузочными манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов однозначно требует совершенствования и кардинального изменения принципов управления, переходу к автоматизированному и автоматическому управлению.

Неэффективное управление погрузочными манипуляторами приводит к излишним энергозатратам, снижению производительности погрузочных агрегатов, а при ручном управлении к утомляемости оператора и соответственно последующего возникновения ошибок позиционирования груза (ошибок управления), влекущих за собой аварийные ситуации.

Эти обстоятельства ставят задачу обоснования и создания эффективных систем управления погрузочными манипуляторами.

Совершенствование робототехнических систем, предназначенных для выполнения операций по перемещению грузов в промышленности и сельском хозяйстве является актуальной научно-технической задачей. Основным исполнительным механизмом в этих машинах является манипулятор, структура которого имеет весьма широкое конструктивное исполнение.

Степень разработанности темы исследования

Обычно структура манипуляторов представляет последовательность связанных кинематическими парами звеньев. Такие манипуляторы обладают рядом достоинств, однако консольность конструкций не позволяет реализовать перемещения больших масс, особенно на больших скоростях. Поэтому в последнее время находят применение манипуляционные механизмы параллельной структуры (*l*-координатные). Преимущества таких механизмов заключаются в повышенной грузоподъемности и жесткости механической системы, достижении сравнительно высоких скоростей и ускорений выходного звена, высокой степени унификации узлов. К тому же, конструкция таких манипуляторов совмещает функции несущей металлоконструкции и исполнительного механизма, что существенно снижает общую массу устройства.

Функциональные возможности современных механизмов параллельной структуры обуславливают их применение во многих отраслях промышленности: в машиностроении (обрабатывающие центры), приборостроении (измерительные манипуляторы), автомобилестроение (сборочные манипуляторы). К современному машиностроению предъявляются требования по решению задач

создания эффективных многофункциональных манипуляторов и их механизмов, обеспечивающих высокие показатели надежности, производительности и точности.

Проблемами автоматизации и роботизации манипуляционных систем занимались Фролов К.В., Юревич Е.И., Ющенко А.С., Тимофеев А.В., Подураев Ю.В., Каляев И.А., Паршин Д.Я. [37, 121, 177, 196, 197, 198, 262, 294]. Изучению кинематики и динамики манипуляционных устройств параллельной структуры, их функциональных механизмов, разработке методов анализа и синтеза, способам управления движением посвящены работы В.А. Глазунова, В.М. Герасуна, Ф.М. Диментберга, В.Л. Жавнера, С.Л. Зенкевича, А.Ш. Колискова, М.З. Коловского, А.И. Корендясева, А.Ф. Крайнева, В.Е. Павловского, В.И. Пындака, Л.А. Рыбак, Б.Л. Саламандры, А.В. Сергеева, Л.И. Тывеса, Е.И. Юревича, А.С. Ющенко, а также зарубежных ученых *J. Angeles, V. Arakelian, S. Briot, G. Gogu, C. Goselin, X. Kong, J. Merlet.* и др. [8, 15, 17, 35, 54-78, 98, 103, 112, 113, 114, 121, 122, 127, 145, 150, 151, 152, 173, 192, 224, 225, 226, 227, 229, 236, 238, 239, 308, 309, 310, 311, 312, 314, 328, 329, 330, 331, 332, 342, 343, 344, 352, 353].

Исследования механизмов параллельной структуры ведутся во многих странах, на основе результатов исследований создан ряд роботов-манипуляторов параллельной структуры, применяемых в различных отраслях экономики. В подавляющем большинстве параллельные манипуляторы предполагают работу в составе стационарного технологического оборудования, основное направление их использования это стандовое, металлообрабатывающее и распределительно-сортировочное оборудование. Например, зарубежная фирма *Neos Robotics* (Швеция) разработала линейку станков *Tricept*, для обработки сложных поверхностей деталей машиностроения. Среди существующих машин параллельной структуры можно выделить промышленные роботы-станки *PA35 Hitachi Seiki* (Япония), многоцелевой фрезерный станок *OKUMA PM-600* (Япония), станок-робот с параллельной кинематикой *Metrom P1000* (Германия), фрезерный пятикоординатный станок с ЧПУ «ГЕКСАМЕХ-1» (Россия). Среди параллельных роботов-манипуляторов для перерабатывающей и пищевой

промышленности наиболее распространены дельта-роботы *IRB 340 FlexPicker*, *Pack-Placer*, *Line-Placer*, *Top-Placer*, и *Presto* (Швейцария), робот-манипулятор, разработанный компанией *Festo* (Германия) для автоматической сортировки объектов, параллельный робот, специально разработанный для высокоскоростных производственных, упаковочных и погрузо-разгрузочных операций *Adept Quattro s650H*. Наиболее известный и широко применяемый в медицине робот-хирургический комплекс *DaVinci* [308, 361, 393, 394, 398].

Все эти роботы-манипуляторы параллельной кинематики представляют собой стационарное оборудование, работающее в производственных помещениях.

В качестве исполнительных механизмов погрузочных манипуляторов, механизмы параллельной структуры используются значительно реже, однако в Волгоградском государственном аграрном университете разработаны и доведены до опытных образцов ряд погрузочных манипуляторов с неполнопараллельно-последовательной структурой - НПМ-0,6(0,8), НПМ-3(5), БПМ-0,3(0,5), СПМ-0,6 [1, 2, 3, 4, 157, 170, 199, 200, 201, 202, 203]. При непосредственном участии автора разработан и создан опытный образец робота манипулятора с параллельно-последовательной структурой РШ-7 [206].

В настоящее время подобные манипуляторы, установленные на автономных мобильных роботах, могут применяться для выполнения различных задач: мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды, предотвращение и устранение её загрязнения, ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также перспективно их применение при выполнении технологических операций в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности.

К наиболее важным задачам при разработке таких манипуляторов относятся – создание методов структурного и параметрического синтеза рациональных кинематических схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры. Динамический анализ движений манипуляторов. Планирование перемещений рабочего органа в пространстве в зависимости вида технологических операций, выполняемых манипуляторами и их формализация.

Координация движений приводных исполнительных механизмов. Разработка требований к параметрам, обеспечивающим реализацию этих процессов: объем зоны обслуживания, быстродействие, погрешность позиционирования и точность воспроизведения задаваемых траекторий, грузоподъемность, число степеней подвижности, характеристика системы управления и т.д. [42, 43].

Большинство систем управления манипуляторами, разработанных А.Е. Кобринским, М.З. Коловским, А.И. Корендясевым, А.Ф. Крайневым и др. [72, 76, 77, 140, 141, 145, 146, 150, 151, 152, 160], являются системами программного управления различного уровня и реализуют заданные программные движения захвата. Вместе с тем, развитие теории искусственного интеллекта открывают возможности для реализации гибких механизмов планирования действий и управления движением манипуляторов на основе использования современных методов и технологий обработки знаний. Эти подходы реализованы в работах, Е.И. Юревича, А.С. Ющенко, Н.Н. Болотника, И.М. Макарова, Д.А. Пospelова, В.Ф. Филаретова, Т. Тэрano и др. [31, 121, 123, 214, 289, 290, 294, 300, 301, 302, 304, 327]. Однако разработки интеллектуальных систем управления предъявляют высокие требования к быстродействию систем управления, к массовым и габаритным характеристикам аппаратной части встроенных систем, устанавливаемых на мобильных транспортных системах, а также в необходимости развития алгоритмического обеспечения информационно – управляющих систем.

К недостаткам манипуляторов параллельной структуры относятся ограниченность зоны обслуживания, относительно небольшая маневренность и манипулятивность, отсутствие общих методов построения оптимальных алгоритмов управления и сложность систем управления перемещением исполнительного оборудования [130]. Одно из основных требований, определяющих работоспособность манипуляторов, является обеспечение подхода рабочего органа манипулятора к требуемым точкам объекта обслуживания с заданной ориентацией рабочего органа. В связи с этим встает вопрос об оценке функциональных возможностей манипулятора в зоне обслуживания.

Часто число обобщенных координат пространственного механизма манипулятора превышает число обобщенных координат захвата и заданному конечному положению объекта соответствует множество возможных конфигураций механической системы. Такая неопределенность требует формулировки и решения оптимизационной задачи позиционирования манипулятора.

В семействе вариантов структур l -координатных механизмов особого внимания заслуживает частный случай, когда три стержня сходятся в одной точке и соединены специальным шарниром, на котором располагается грузозахватное устройство. Функциональные возможности этих механизмов обусловлены зоной обслуживания рабочего пространства, которое зависит от значения длины каждого стержня. Поэтому, учитывая специфику пространственных структур, возникает задача нахождения особых положений, при которых механизм попадает в мертвое положение.

Исследованием механизмов манипуляторов параллельной структуры с соединением исполнительных звеньев в виде треугольной пирамиды не много, им посвящены работы В.М. Герасуна, В.И. Пындака, В.В. Жоги, А.Ф. Рогачева, В.Е. Павловского, А.С. Горобцова [54-69, 116, 117, 180, 224-227, 233]. В связи с чем, актуальными являются исследования посвященные структурному синтезу, оптимизации геометрических, кинематических и динамических параметров манипуляторов с пространственными механизмами параллельной структуры и разработка методик их расчета и проектирования, а также задача обоснованного выбора конструктивных параметров манипулятора на этапе проектирования и обеспечение воспроизведения требуемых программных движений выходного звена с заданной точностью при выполнении различных технологических операций.

Манипуляторы параллельной структуры обладают высокой точностью позиционирования, жесткостью конструкции, но имеют ограниченную зону обслуживания и относительно небольшую манипулятивность. Манипуляторы последовательной структуры с открытыми кинематическими цепями при более

низкой жесткости конструкции, вследствие их консольности и соответствующей точности позиционирования обладают более расширенной зоной обслуживания.

Следовательно, актуальными являются исследования и разработка методов синтеза и оптимизация параметров управляемого перемещения манипуляционных робототехнических систем параллельно – последовательной структуры.

В связи с этим, синтез программных движений рабочего органа манипулятора с избыточными координатами при совместном решении прямой задачи манипулятора-трипода параллельной структуры, и обратной задачи определения обобщенных координат механизма последовательной структуры по известным абсолютным его координатам с минимальным энергопотреблением и высоким быстродействием, являются актуальными.

В приводных механизмах, с управляемым движением выходного звена, часто используют электроцилиндры с необратимым редуктором. В этом случае отпадает необходимость введения в состав передачи тормоза, необходимого для удержания манипулятора в равновесии от действия внешних нагрузок при неработающем двигателе, что значительно упрощает систему управления [159, 160, 166, 316]. Однако наличие необратимой передачи в приводном механизме требует аналитического описания ее влияния на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания [292, 388].

Таким образом, в области механики роботов параллельно-последовательной структуры необходимо разрабатывать методы исследования и синтез рациональных кинематических схем манипуляционных систем, методы аналитических и численных исследований динамики роботов с учетом динамических характеристик приводов, оптимизации их параметров, создании облегченных конструкций манипуляторов. В области управления манипуляционными роботами параллельно-последовательной структуры необходимо решать задачи формирования требований к системам управления, распространения теории интеллектуального управления для решения задач проектирования управляющих систем.

Анализ известных кинематических схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры показывает, что в основу большинства компоновочных схем составляет модификация трипода с различным числом степеней подвижности.

Поэтому разработка аналитических методов исследования кинематики и динамики приводов манипулятора – трипода с самотормозящейся передачей и упругими звеньями, является дальнейшим развитием методов управления перемещением выходных звеньев.

Целью работы является разработка методов структурного и параметрического синтеза кинематических схем манипуляторов параллельно-последовательной модульной структуры и синтез их оптимальных программных движений.

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

1. Анализ и классификация показателей качества погрузочных манипуляторов параллельно-последовательной структуры, характеризующих маневренность, манипулятивность, мобильность, приемистость. Количественная и качественная оценка технологических операций: объем обслуживаемой зоны; программные траектории рабочего органа; время цикла; точность воспроизведения траекторий и погрешность позиционирования; специальные требования.

2. Разработка методов и алгоритмов структурного и геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода на подвижном основании.

3. Постановка и решение оптимизационной задачи позиционирования захвата манипулятора при его перемещении из начального положения в заданное конечное. Разработка методов формирования траекторий захвата манипуляторов параллельно-последовательной структуры. Вывод условий существования прямолинейной траектории в пределах зоны обслуживания и знакопостоянства

относительных линейных скоростей штоков исполнительных звеньев при движении по прямолинейной траектории.

4. Разработка математических моделей динамики пространственного управляемого движения манипулятора, как многомассовой электромеханической системы с голономными связями и приводом с самотормозящейся передачей с учетом упругости ее звеньев, анализ ее влияния на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания.

5. Разработка аналитических методов динамического синтеза программных движений захвата манипулятора и линейных исполнительных звеньев из условия минимума критерия обобщенной энергии точки крепления подвеса. Вывод аналитических условий устойчивости оптимальных траекторий захвата.

6. Разработка аналитического метода идентификации математической параметров модели манипулятора. Построение системы управления с обратной связью по положению и скорости, решающую задачу контурного управления. Проведение экспериментальных исследований на полномасштабном образце манипулятора с целью проверки полученных теоретических результатов.

Научная новизна работы заключается в развитии теории синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода и аналитическом построении оптимальных программных движений и алгоритмов управления исполнительными звеньями манипулятора-трипода, а именно:

1. Установлены закономерности эволюции структурных схем механизмов погрузочных манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода в зависимости от значений показателей качества и вида технологических операций.

2. Разработаны метод и алгоритмы оптимального синтеза рациональных структурных схем механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода, позволяющие значительно сузить границы поиска целочисленных решений. Развита метод геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов - триподов с четырьмя исполнительными

поступательными механизмами и поворотным основанием, обеспечивающий значения показателей качества, сформулированных в техническом задании на выполнение погрузочно-разгрузочных работ.

3. Решена задача определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно – последовательной структуры, для задаваемого положения захвата, нахождением локального минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев, с ограничениями типа равенств и неравенств, наложенных на значения обобщенных координат. Решена задача формирования траекторий, выведены условия существования прямолинейной траектории в пределах зоны обслуживания и условий знакопостоянства линейных скоростей исполнительных звеньев при движении выходного звена манипулятора-трипода по прямолинейной траектории.

4. Разработаны математические модели динамики манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющие проводить расчеты динамики управляемого движения звеньев манипулятора, на которые наложены голономные нестационарные связи. Математическая модель динамики исполнительного привода с самотормозящейся передачей учитывает податливость звеньев и необратимые потери, позволяет исследовать ее влияние на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания и сформулировать условия отсутствия силового и динамического заклинивания привода.

5. Получено решение задачи динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата. Получены аналитические выражения условий устойчивости оптимальных траекторий захвата. Проведено сравнение кинематических параметров захвата, при его перемещении по синтезированной оптимальной траектории и по траектории, полученной в результате решения уравнений динамики манипулятора при изменении ускорений исполнительных звеньев по синусоидальному закону.

6. Разработана аналитическая методика параметрической идентификации жесткостных параметров привода исполнительных звеньев манипулятора, основанная на спектральном анализе экспериментальных результатов. Спроектированная система управления позволяет определять законы изменения управляющих сигналов, которые обеспечивают реализацию синтезированных законов изменения обобщенных координат манипулятора. Разработаны программные средства для компьютера, оператора и бортовой системы, обеспечивающие позиционирование захвата манипулятора при задании различных программных законов траектории движения, минимизирующих время достижения заданной точки.

Новизна технических решений подтверждается патентами РФ на изобретения и патентами РФ на полезную модель.

Методология и методы исследования основывались на основных положениях теории механизмов и машин, теоретической механики, теории оптимального управления, методах оптимизации, математического, компьютерного и физического моделирования управляемых движений приводных электромеханических систем манипуляторов параллельно-последовательной структуры.

При решении задач на ЭВМ использовался пакет математических вычислений «*Mathcad*», прикладные программы, созданные на *C++*, *Visual Basic*, *Turbo Pascal*.

Для решения конкретных задач применялись следующие методы и подходы:

1. Структурный синтез манипуляторов параллельно-последовательной структуры реализован в виде решения задачи условной оптимизации методами линейного программирования.

2. Движение захвата манипулятора в пространстве в пределах зоны обслуживания определяется решением прямой задачи кинематики. Управляющая кинематическая матрица получена решением обратной задачи кинематики.

3. Решение оптимизационной задачи позиционирования захвата манипулятора реализовано методом Лагранжа постановкой оптимизационной задачи нелинейного программирования.

4. Динамический анализ механизма манипулятора параллельно-последовательной структуры основан на создании математических моделей пространственной структуры с помощью уравнений Лагранжа с неопределенными множителями, ориентированных на задачу синтеза уравнений приводами, обеспечивающими перемещения исполнительных звеньев в соответствии с законами изменения координат захвата манипулятора.

5. Задача синтеза оптимальных законов управления перемещением исполнительных звеньев манипулятора решалась из условия критерия качества с учетом динамических свойств исполнительных механизмов и электроприводов. Решение, поставленной задачи проводилось методами современного вариационного исчисления.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением фундаментальных положений механики, проведением параметрической идентификации по значениям динамических ошибок реальной электромеханической системы и ошибок принятой модели, а также сопоставлением результатов численного и натурного моделирования реализуемых законов программного движения выходного звена манипулятора.

Положения, выносимые на защиту:

- Закономерности эволюции структурных схем пространственных механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода в зависимости от показателей качества. Метод и алгоритмы оптимального синтеза, условия существования рациональных структурных схем механизмов параллельно-последовательной структуры. Метод геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов - триподов с четырьмя исполнительными поступательными механизмами и поворотным основанием.

- Метод решения задачи определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно – последовательной структуры из условия минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев, с ограничениями типа равенств и неравенств, наложенных на значения обобщенных координат.

- Методика решения задачи формирования пространственных траекторий захвата манипулятора-трипода. Условия существования прямолинейной траектории в пределах зоны обслуживания и условия знакопостоянства линейных скоростей исполнительных звеньев при движении исполнительного механизма выходного звена по прямолинейной траектории.

- Математическая модель динамики манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющая проводить расчеты динамики пространственных движений звеньев манипулятора, на которые наложены нестационарные голономные связи, с учетом динамики исполнительных приводов с самотормозящейся передачей, с упругими звеньями звеньями и необратимыми потерями.

- Аналитические условия отсутствия силового и динамического заклинивания привода.

- Методика решения задачи динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата. Аналитические выражения условий устойчивости оптимальных траекторий захвата и результаты сравнения кинематических параметров захвата, при его перемещении по синтезированной оптимальной траектории и по траектории, полученной в результате решения уравнений динамики манипулятора при изменении ускорений исполнительных звеньев по синусоидальному закону.

- Аналитическая методика идентификации упругих параметров механизма приводов исполнительных звеньев манипулятора, основанная на спектральном анализе экспериментальных результатов. Результаты экспериментальных исследований зависимостей изменения длин звеньев

манипулятора от времени при движении захвата по прямой и по произвольной траектории. Характеристики изменения усилий в исполнительных звеньях в условиях возникновения режима динамического и силового заклинивания в самотормозящейся передаче электропривода.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая и практическая значимость заключается в разработанных методах структурного и геометрического синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры, позволяющих на этапе проектирования создавать рациональные конструкции без избыточных связей и лишних подвижностей. Предложенные способы задания траекторий выходного звена манипулятора параллельно-последовательной структуры по синтезированным законам позволяют осуществлять энергоэффективное управление рабочим органом манипулятора по оптимальным траекториям и с минимальными инерционными нагрузками.

Реализация результатов работы.

На основе полученных результатов теоретических исследований разработана конструкция манипулятора-трипода на подвижном основании, представляющая собой пространственный механизм параллельно-последовательной структуры. Разработанный манипулятор-трипод грузоподъемностью 2000 Н испытывался на робототехническом комплексе РШ-7 (рисунок В.2, а) на базе шагающего шасси, а также опытно эксплуатировался на самоходном колесном шасси Т-16МГ (рисунок В.2, б). Использование универсальных шарниров в конструкции манипулятора позволяет использовать широкий спектр сменного рабочего оборудования: крюковая подвеска, позиционируемый захват, различный инструмент. Вследствие чего разработанный манипулятор-трипод на подвижном основании, снабженный распределенной системой управления, реализующей разработанные методы синтеза управляющих движений, может использоваться в различных отраслях народного хозяйства:

сельское хозяйство, строительство, коммунальное хозяйство, перерабатывающая промышленность, транспортно-складские работы и др.



а)



б)

Рисунок В.2 - Манипулятор – трипод на поворотном основании, установленный на мобильном шагающем роботе (а) и на колесном самоходном шасси (б)

Апробация работы

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

- Научно-практическая конференция «Агроинженерная наука – сельскохозяйственному производству», г. Москва, 9-11 октября 2001 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Современные технологии и средства механизации и технического обслуживания в АПК», г. Саранск, 24-27 сентября 2002 г.;
- Simpozion stiintific international "70 ani ai Universitatii Agrare de Stat din Moldova". Chisinau, 7-8 octombrie 2003;
- Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию образования Волгоградской государственной сельскохозяйственной академии «Основы достижения устойчивого развития сельского хозяйства», г. Волгоград, 2-4 февраля 2004 г.;
- XXI Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника-2010», г. Москва, 18-20 мая 2010 г.;

- Международная научно-практическая конференция «Интеграционные процессы в науке, образовании и аграрном производстве – залог успешного развития АПК», Волгоград, 25-27 января 2011 г., (диплом I степени);
- 4-я всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2011), с. Дивноморское, 3-8 октября 2011 г.;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника-2012», г. Санкт-Петербург, 25-26 сентября 2012 г.;
- 5-я Российская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2012), г. Санкт-Петербург, 9-11 октября 2012 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки и производства – стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО», Волгоград, 30 января – 1 февраля 2013 г.;
- Международная конференция «Прогресс транспортных средств и систем-2013», г. Волгоград, 24-26 сентября 2013 г.;
- 6-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2013), с. Дивноморское, 30 сентября-5 октября 2013 г.;
- 7-й Международный симпозиум 7th IARPRISE-ER'2013 «Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды», г. Санкт-Петербург, 2-3 октября 2013 г.;
- V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект», г. Железногорск, 9 ноября 2013 г.;
- Международная научно-практическая конференция: Научные основы стратегии развития АПК и сельских территорий в условиях ВТО. Волгоград, Волгоградский ГАУ, 28-30 января 2014 г.;
- 4-я Международная научно-практическая конференция. Современное машиностроение: наука и образование. Санкт-Петербург, 19-20 июня 2014 г.;
- XX CISM-IFTOMM SYMPOSIUM ON Theory and Practice of Robots and Manipulators - RoManSy 2014/ June 23-26, 2014 Moscow, Russia;

- Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». (ЭР-2014). Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК, 1-2 октября 2014 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Робототехника в сельскохозяйственных технологиях». 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.;
- 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. Волгоград, ВолГАУ, 3-5 февраля 2015 г., (диплом);
- XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань, 20-24 августа 2015 г.;
- XII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами (УБС'2015)». Волгоград, 07-11 сентября 2015 г.;
- Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. First Conference, CIT&DS 2015. Volgograd, Russia, September 15-17, 2015.;
- 8-ая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2015), 28 сентября – 03 октября 2015 г., с. Дивноморское, Краснодарский край, Россия;
- Международная научно-практическая конференция "Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях". Волгоград, ВолГАУ, 3-5 февраля 2016 г.;
- XII Международная научно-техническая конференция «Вибрация-2016. Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины». Курск, Юго-Зап. гос. ун-т, 18-20 мая 2016 г.
- “Dynamics of Strongly Nonlinear Systems”, the 22-nd International Conference on VIBROENGINEERING held in Moscow, Russia, 4-7 October, 2016.

– Доклад на заседании научно-технического совета отдела «Механика машин и управление машинами» ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, 8 ноября 2016 г.

Участие в научно-исследовательских проектах

Под руководством автора реализован проект РФФИ №13-08-00387-а «Исследование кинематических и динамических характеристик робота-манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами», 2013 – 2015 гг.

Автор принимает участие в качестве исполнителя в проектах: РФФИ №15-01-04577-а «Разработка интеллектуальных методов автоматического управления функционированием шагающего робота в недетерминированной внешней среде» и РФФИ 16-48-340395 р_а «Исследования и разработка манипулятора параллельной структуры с управляемым захватным устройством для технологических операций сельскохозяйственного производства».

Публикации.

Основные положения диссертации отражены в 79 публикациях, в том числе в 18 статьях в журналах по перечню ВАК, 6 в иностранных изданиях, 8 патентах на изобретения, 1 патенте на полезную модель, 1 свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы отражены в отчетах по грантам РФФИ №13-08-00387-а и №15-01-04577-а. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 23,38 п.л., в том числе лично автора – 7, 46 п.л.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы, приложений. Общий объем диссертации 311 страниц, в тексте имеется 5 таблиц и 129 рисунков. Список литературы представлен на 50 страницах из 398 наименований.

В первой главе выполнен анализ опыта применения манипуляторов параллельной структуры в промышленности, сельском хозяйстве, непромышленных отраслях, а также анализ и классификация показателей качества погрузочных манипуляторов параллельной и параллельно-последовательной структуры. Выделено семейство манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода и показана необходимость развития теории структурного синтеза и оптимизации законов управления для таких манипуляторов.

Во второй главе предложено семейство структурных схем параллельно-последовательных манипуляторов для погрузочных роботов на основе трипода, выполнен структурный анализ манипуляторов-триподов. На основе структурного анализа предложена эволюция механизмов параллельно-последовательных манипуляторов. Разработан алгоритм оптимального синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода, позволяющий значительно сузить границы поиска рациональных структурных схем манипуляторов, при этом задача структурного синтеза формулируется как задача условной оптимизации и решается методами линейного программирования. Представлена методика и алгоритм геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода.

В третьей главе решена прямая и обратная задачи кинематики манипуляторов параллельно-последовательной структуры, представлен формализованный алгоритм формирования объёма зоны обслуживания. Проведен силовой анализ параллельно-последовательных манипуляторов на базе трипода, по разработанной методике определены коэффициенты нагруженности исполнительных линейных приводов манипулятора в зависимости от положения захвата в пределах зоны обслуживания, построены геометрико-статические характеристики в сечениях зоны обслуживания. Представлена общая постановка задачи формирования и планирования траекторий, решена оптимизационная

задача позиционирования манипулятора последовательно-параллельной структуры по заданной конфигурации из условий принадлежности траектории зоне обслуживания, условий существования оптимальной траектории. Предложены законы программных движений по прямолинейной траектории при заданном законе изменения обобщенных координат манипулятора и по заранее неизвестной траектории при заданном законе движения. Выведены условия знакопостоянства относительных скоростей исполнительных звеньев манипулятора параллельно-последовательной структуры при движении выходного звена – захвата по прямой. Выполнен параметрический синтез программных движений по криволинейным траекториям: по дуге окружности и по параболической траектории при заданном законе движения.

В четвёртой главе представлена математическая модель манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода на поворотном основании с сосредоточенными массами, приведена методика определения приведенных масс на парциальных движениях. Разработана математическая модель динамики привода исполнительных звеньев с самотормозящейся передачей с учетом упругостей, получены условия возникновения силового и динамического заклинивания передачи. Представлены разработанные двухмассовая и трехмассовая математические модели параллельно-последовательного манипулятора, решены оптимизационные задачи траекторного синтеза и синтеза программных движений исполнительных звеньев методами современного вариационного исчисления. Проведено сравнение результатов численного и натурного моделирования, полученных методом параметрического задания траектории и закона программных движений по оптимальным законам.

В пятой главе разработаны архитектуры централизованной и распределенной систем управления манипулятором-триподом на подвижном основании для реализации синтезированных траекторий и программных движений исполнительных звеньев. Разработано программное обеспечение системы управления. Описан метод идентификации математической модели по

результатам экспериментальных исследований парциальных движений манипулятора. Определены собственные частоты приводов манипулятора на основе спектрального анализа экспериментальных результатов. Приведены результаты численных и экспериментальных исследований динамики привода манипулятора и их сравнение.

1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

1.1. Погрузочные манипуляторы как объект роботизации

Технологические особенности сельскохозяйственного производства накладывают существенные ограничения на внедрение средств робототехники, в т.ч. и манипуляторов, в связи с этим, как уже отмечалось, внедрение промышленных роботов в аграрное производство невозможно. Производство сельскохозяйственной продукции, как растениеводческой, так и животноводческой происходит чаще всего в неопределённых временных режимах и при различных объёмах и качестве продукции. Например, урожай овощей на разных полях одного хозяйства может отличаться в широких пределах. Автоматизация погрузки сельскохозяйственной продукции одним и тем же робототехническим комплексом в этих условиях требует либо применения адаптивных систем управления и контроля, либо перенастройки роботизированного погрузочного агрегата. В обоих случаях это приводит к удорожанию или конструкции, или обслуживания агрегата [11, 64, 79, 295].

Различные виды погрузочно-разгрузочных работ в АПК подразумевают не только различные по конструктивному исполнению, зоне обслуживания, автономности погрузочные машины, но и различные по грузоподъемности. В работах [54, 87, 226, 254, 265] обоснован рекомендательный ряд грузоподъемности для универсальных погрузочных манипуляторов, работающих со штучными грузами (контейнерами, тюками и т.п.). Грузоподъемность погрузочного манипулятора является важным показателем, от которого зависит его производительность при выполнении конкретных операций. Анализ номенклатуры погрузочных манипуляторов, используемых в сельскохозяйственном производстве, позволил получить распределение

погрузочно-разгрузочных машин и агрегатов по грузоподъемности. Как видно из диаграммы (рисунок 1.1), наиболее востребованы погрузочные средства с грузоподъемностью от 500 до 1000 кг.

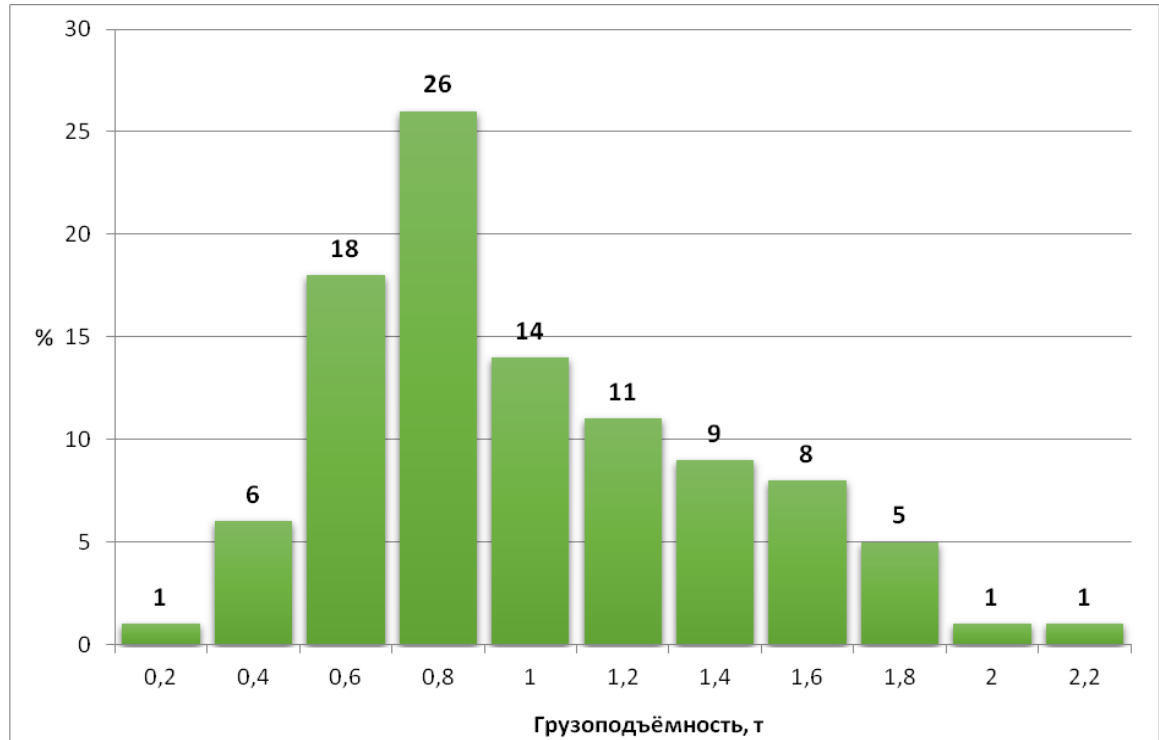


Рисунок 1.1 – Распределение моделей сельскохозяйственных погрузчиков и манипуляторов по грузоподъемности

Известно большое количество схем манипуляторов, но в сельскохозяйственном производстве наибольшее распространение нашли погрузочные манипуляторы, работающие в ангулярной (угловой) системе координат, реже встречаются погрузчики с полярной (сферической) системой координат (рисунок 1.2). Для погрузчиков манипуляторного типа различают глобальные движения (перемещение мобильного шасси манипулятора или погрузочного агрегата), региональные движения (перемещение рабочего органа в различные зоны обслуживания) [260] и локальные перемещения рабочего органа непосредственно в объеме рабочей зоны для небольших установочных перемещений и для выполнения технологических операций [112, стр.14, 110, 276].

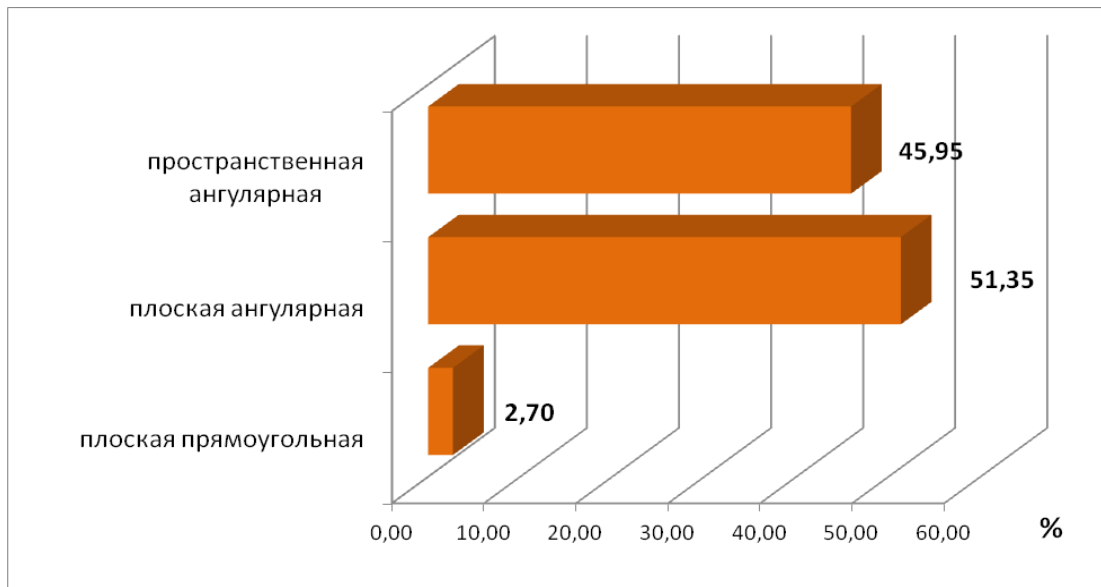


Рисунок 1.2 – Распределение номенклатуры мобильных погрузчиков и погрузочных манипуляторов от вида системы координат исполнительного органа

Для сравнения, на рисунке 1.3 приведено распределение моделей промышленных роботов в зависимости от вида системы координат исполнительных звеньев механической системы.

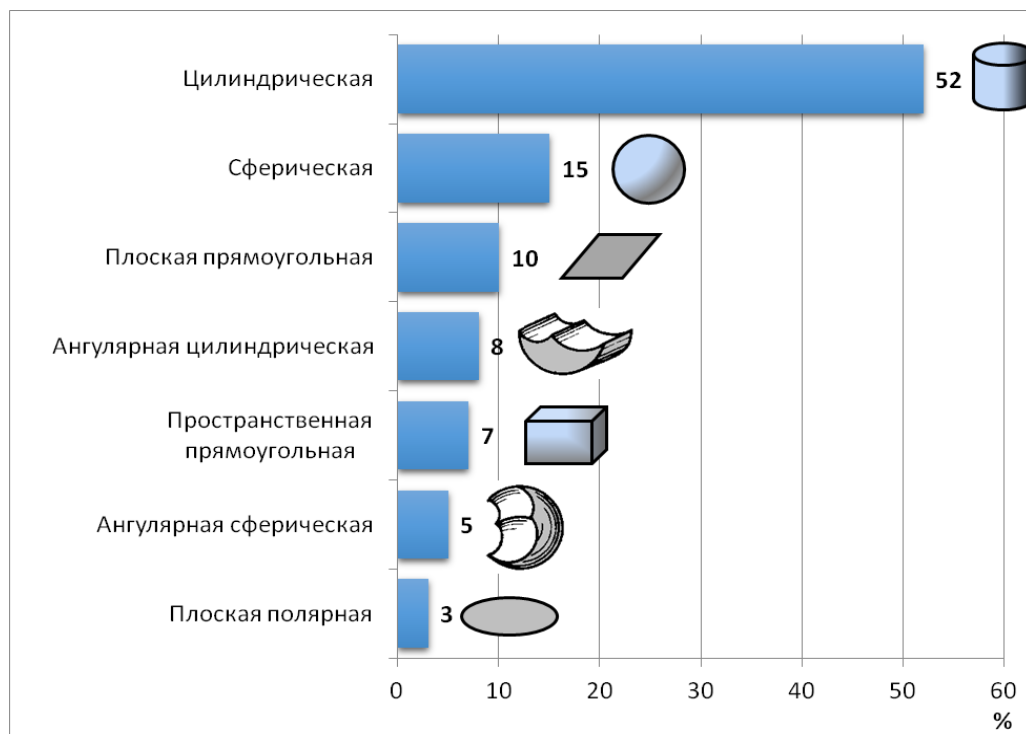


Рисунок 1.3– Распределение моделей промышленных роботов в зависимости от вида системы координат исполнительных звеньев механической системы

Погрузочные роботизированные манипуляторы для сельского хозяйства, строительства, коммунальной сферы и перерабатывающей отрасли относятся к сервисным роботам. Широкое развитие сервисной робототехники по отношению к промышленной получило в Японии и США [115, 196]. У нас в стране среди промышленных роботов, погрузочные роботы занимают почти четверть от всей номенклатуры (рисунок 1.4) [223].

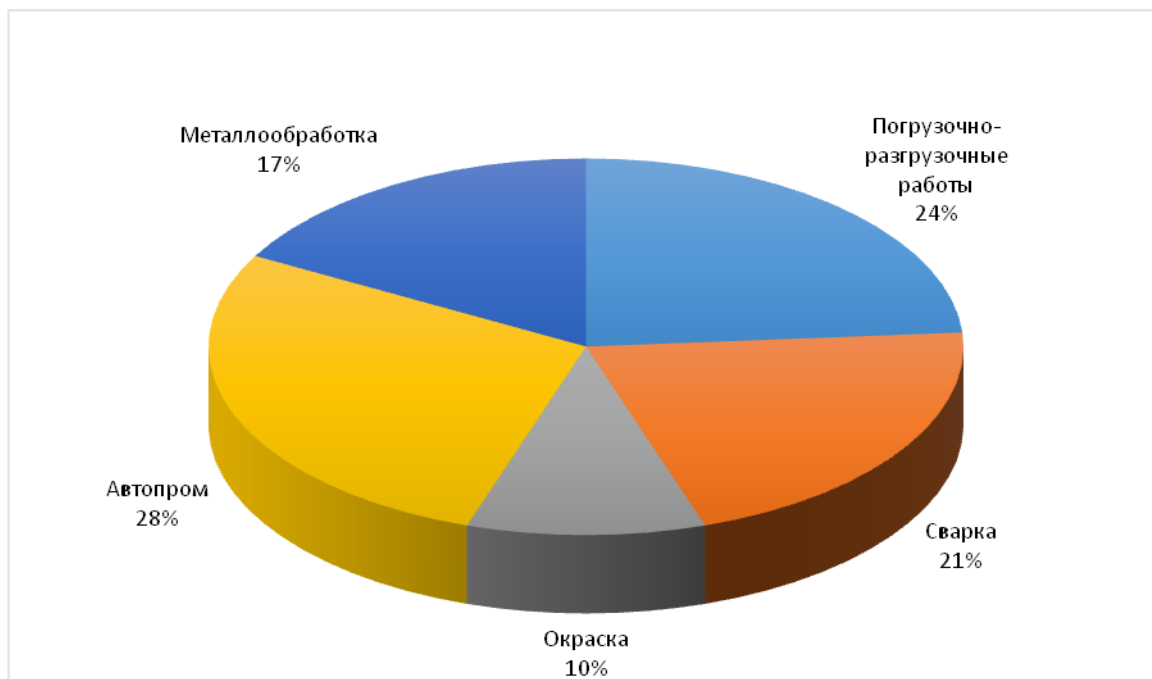


Рисунок 1.4 – Распределение промышленных роботов по секторам промышленности в России по состоянию на 2014 г.

По быстродействию погрузочные манипуляторы разделяют на малого быстродействия, с исполнительными скоростями захватного устройства менее 0,5 м/с, среднего быстродействия – от 0,5 до 1 м/с и высокого быстродействия – свыше 1 м/с. В сельскохозяйственных погрузочных манипуляторах скорость захватного устройства, как правило, не превышает 0,5 м/с.

Подавляющее большинство погрузочных манипуляторов являются гидравлическими. Наряду с неоспоримыми преимуществами гидропривод имеет и недостатки. Более низкий по сравнению с электромеханическим приводом КПД, завышенная мощность двигателей в 1,5-2 раза и меньший на 15-20% коэффициент

использования мощности. Один из наиболее актуальных недостатков – применение неэкологичных рабочих жидкостей с ограниченным ресурсом. К тому же использование рабочих жидкостей требует дополнительного оборудования: насосных установок, масляных баков, систем фильтрации масла, распределителей и т. п., что влечет повышение массы погрузочных манипуляторов. Поэтому в последнее время в приводах различных манипуляторов всё шире применяются электрические приводы, это обусловлено появлением высокомоментных электродвигателей, широкому спектру серийно выпускаемых линейных приводов (актуаторов), постоянному снижению их стоимости. Современные электроцилиндры являются альтернативой гидроцилиндрам и имеют ряд преимуществ перед гидроприводом [274, 396, 397].

Важными характеристиками погрузочных манипуляторов являются маневренность, манипулятивность, приемистость и мобильность [126, 140, 315].

Маневренность манипулятора – число степеней подвижности его механизма при неподвижном захвате.

Манипулятивность механической системы робота в некоторой точке рабочего пространства измеряется «свободой движения», какую имеет захват (рабочий орган) относительно этой точки, или телесным углом, в пределах которого он может относительно нее двигаться.

Мобильность характеризуется предельно допустимыми скоростями перемещения захвата в рабочей зоне.

Приемистость связывают с величинами ускорений в момент трогания исполнительных звеньев для обеспечения в заданной точке рабочей зоны необходимого вектора ускорения при известных начальных значениях обобщённых координат и скоростей $q(0)$ и $\dot{q}(0)$ [140].

От количества степеней подвижности W манипулятора зависит его маневренность - чем больше W , тем меньше требуется глобальных перемещений шасси, и соответственно снижается энергопотребление агрегата. С другой стороны, увеличение степеней подвижности манипулятора ведёт к усложнению системы управления манипулятором.

В результате проведенного анализа (рисунок 1.5) видно, что чаще всего в агропромышленном комплексе и других сферах народного хозяйства (дорожное и коммунальное хозяйство, строительство) применяются погрузочные манипуляторы со степенью подвижности $W=2$.

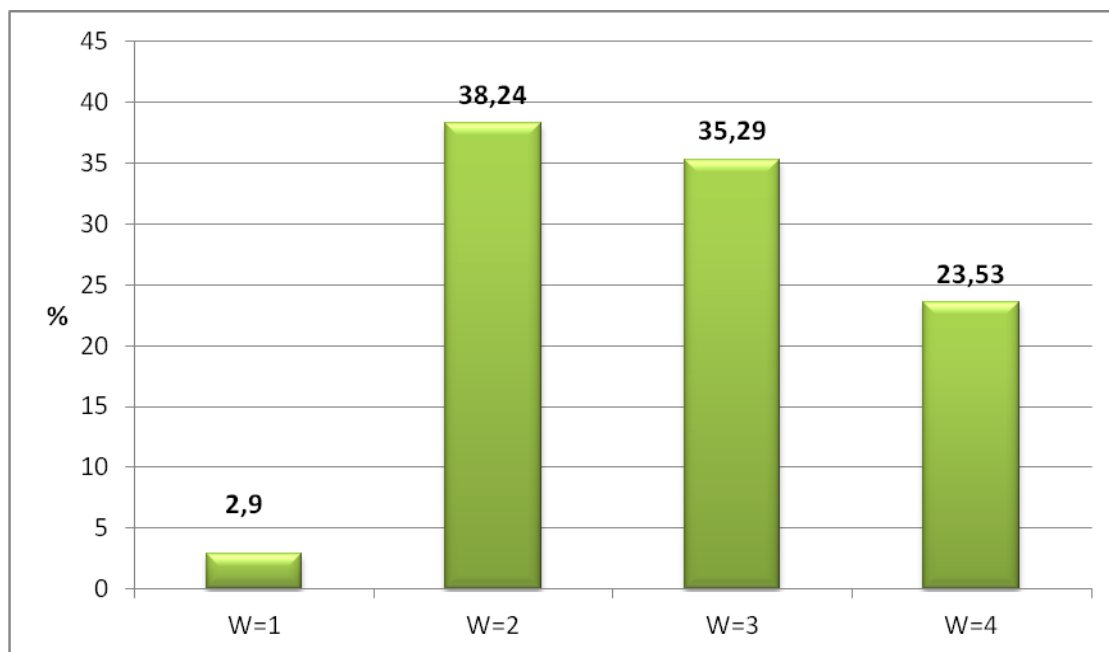


Рисунок 1.5 - Распределение моделей сельскохозяйственных погрузчиков по степени подвижности W (без учёта глобальных перемещений шасси и дополнительных подвижностей рабочего органа)

Погрузочные манипуляторы с $W=2$ – это, как правило, фронтальные, работающие в плоской системе координат. Для реализации пространственной объемной зоны обслуживания количество степеней манипуляционного механизма должно быть 3 и выше. Однако управление манипуляторами с 3-мя и более степенями подвижности становится затруднительным для оператора, поэтому для погрузочных манипуляторов с числом степеней подвижности рабочего органа более трёх необходимо использование автоматических или комбинированных систем управления [112]. Количество степеней подвижности четыре и более имеют, как правило, манипуляторы, устанавливаемые на мобильных транспортных платформах.

Погрузочно-разгрузочные работы, выполняемые манипулятором, которым управляет оператор, несмотря на их трудоёмкость, часто бывают однообразными и монотонными. Повторяющиеся операции снижают производительность труда, так как при ручном управлении оператор является звеном цепи управления, снижающим быстродействие всей системы вследствие запаздывания его 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 [44].

В погрузчиках фирмы *Liebherr* (Германия) в конце 80-х годов XX века управление рабочим оборудованием осуществлялось от одного многофункционального рычага (джойстика), уменьшить усилия на нём позволяют сервосистемы [156].

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.

Современные погрузочные агрегаты должны развиваться в соответствии с принципом интеграции в технологический процесс: «технология – управляемая механическая система – погрузочный агрегат» [333]. Из анализа номенклатуры погрузчиков и манипуляторов, применяемых в АПК, только около 18% оснащены электронными датчиками грузоподъёмности и системами безопасной эксплуатации [154, 179, 295]. В подавляющем большинстве это зарубежные погрузчики и манипуляторы. Причем, даже если модель погрузчика может оснащаться дополнительными средствами мониторинга технологического процесса, системами оповещения нестандартных и предаварийных ситуаций, то

российский покупатель не желает переплачивать за эти системы, отказываясь от их приобретения [185, 267].

В зависимости от области применения определяются основные функциональные показатели качества манипуляторов, к которым относятся грузоподъемность, объем зоны обслуживания, скоростные характеристики, погрешность позиционирования. Для выполнения транспортно – погрузочных работ манипуляторы монтируют на мобильных роботизированных платформах. Обычно на манипуляционных роботах устанавливают традиционные манипуляторы, представляющие собой незамкнутую кинематическую цепь последовательно соединённых друг с другом звеньев с помощью одноподвижных кинематических пар пятого класса. Манипуляторы с не замкнутыми кинематическими цепями, как правило, не удовлетворяют требованиям кинематической и динамической точности позиционирования, особенно при высоких скоростях перемещения груза, вследствие остаточных колебаний конструкции. Одним из способов преодоления указанных недостатков является использование манипуляторов, имеющих замкнутую кинематическую цепь. Конструкция манипуляторов с замкнутой кинематической структурой более жесткая и лишена этого недостатка. Особое место в разнообразии погрузочных манипуляторов занимают манипуляторы с пространственными l -координатными исполнительными механизмами, которые в силу своих особенностей называют механизмами параллельной структуры (МПС). Манипуляторы параллельной структуры являются альтернативой традиционным манипуляторам с незамкнутыми кинематическими цепями, и несмотря на то, что имеют меньший объем зоны обслуживания, требуют более сложных систем управления, они имеют высокую точность позиционирования рабочего органа и выдерживают высокие нагрузки наряду с высокими параметрами маневренности и приемистости [20, 235, 353].

Место манипуляторов и механизмов параллельной структуры в общей номенклатуре сельскохозяйственных погрузчиков довольно незначительно. Это объясняется сложностью проектных работ, отсутствием общепринятых методов

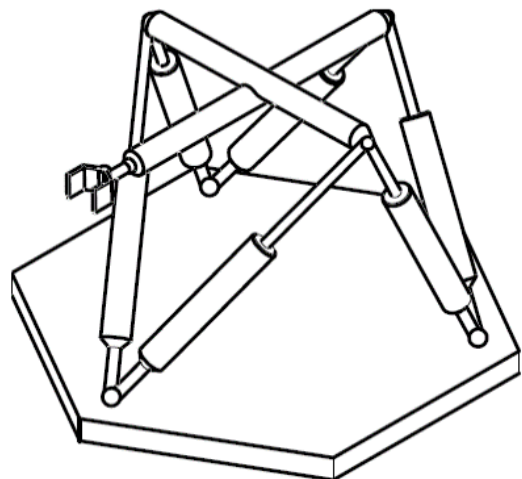
расчетов и изготовления. В последнее время интерес к параллельным механизмам из-за их достоинств интенсивно растет, в XXI веке очень стремительно разрабатываются и создаются новые опытные образцы параллельных манипуляторов, растет и доля манипуляторов параллельной структуры в промышленности. Особенно такие механизмы хорошо себя зарекомендовали на прецизионных работах, в робототехнических комплексах автоматизированных производств. Все интенсивнее увеличивается разработка сервисных роботов параллельной структуры [72, 250, 353].

1.2. Манипуляторы параллельной структуры и их применение в робототехнических комплексах и технологических процессах

Классическими примерами 1 - координатных механизмов являются платформа Стюарта и манипулятор Данилевского (рисунок 1.6). Механизмы параллельной структуры имеют замкнутые кинематические цепи, вследствие чего обладают повышенной жёсткостью подобно фермам [205, 208, 213, 235, 307, 362, 381, 383, 386, 389].



а)



б)

Рисунок 1.6. Механизмы параллельной структуры:

а) тренажер на базе платформы Стюарта; б) манипулятор Данилевского

С 60-х по 80-е годы прошлого столетия манипуляторы параллельной структуры начали интенсивно использоваться в робототехнике и станкостроении. С появлением больших возможностей вычислительной техники и серийно выпускаемых линейных приводов высокоточного позиционирования, наблюдается вторая волна повышенного интереса к МПС. Большой вклад в исследования МПС внесли Д. Стюарт, В.Гауф, А.Ш. Колискор, В.А. Глазунов, А.Ф. Крайнев, М.З. Коловский, У.Ч. Гохман, А.А. Кобринский, А.И. Корендясев, Л.А. Рыбак, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес, *X.Kong, C.Gosselin, J.Angeles, C.Ceccarelli* и др. [15, 17, 35, 70-78, 140, 145, 150, 151, 152, 173, 236, 238, 239, 308, 309, 317, 318, 319, 331, 332, 338, 342, 343, 344, 345, 346, 348, 351, 360, 375].

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.

Основоположниками теории структурного анализа и синтеза механизмов параллельной кинематики являются Г. Стюарт [375], разработавший стенд-тренажёр и Гауф, создавший машину для испытания покрышек колёс.

Манипуляторы параллельной структуры применяются в робототехнике, испытательных стендах, тренажёрах, манипуляционных системах, измерительных приборах. [90].

В таблице 1.1. приводится качественное сравнение параметров рычажных манипуляторов с манипуляторами параллельной структуры.

Таблица 1.1

Сравнение манипуляторов различных компоновок

Показатель	Рычажные манипуляторы	Манипуляторы параллельной структуры	Оценка МПС
Рабочая зона обслуживания	Большая	Малая	-
Жесткость конструкции	Низкая	Высокая	+

Показатель	Рычажные манипуляторы	Манипуляторы параллельной структуры	Оценка МПС
Число обобщённых координат	Соответствует подвижностям	Соответствует подвижностям или избыточно	-
Грузоподъёмность	Низкая	Высокая	+
Инерционные нагрузки	Большие	Малые	+
Структурное строение	Простое	Комплексное	-
Ошибки позиционирования	Накапливаемые	В пределах заданной погрешности	+
Скорость перемещения	Средняя	Высокая или средняя	+
Решение прямой задачи кинематики	Простое	Трудное	-
Решение обратной задачи кинематики	Трудное	Простое	+
Описание динамики	Сложное	Очень сложное	-
Управление	Простое	Сложное	-
Стоимость	Высокая	Низкая	+
Материалоёмкость	Высокая	Низкая	+

1.2.1 Промышленные грузоподъемные роботы и манипуляторы на основе параллельных механизмов

Манипуляционные механизмы параллельной структуры находят широкое применение в промышленных роботах. Например, промышленный робот линейки *Tricept* (рисунок 1.7, а), выпускаемый серийно, обладает высокой жесткостью конструкции, при малой массе исполнительного механизма, обеспечивает высокие скорости перемещений. Не менее важным фактором является равномерное распределение усилий по всей структуре. Широкое распространение механизмы параллельной структуры получили в металлообрабатывающих роботах-станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

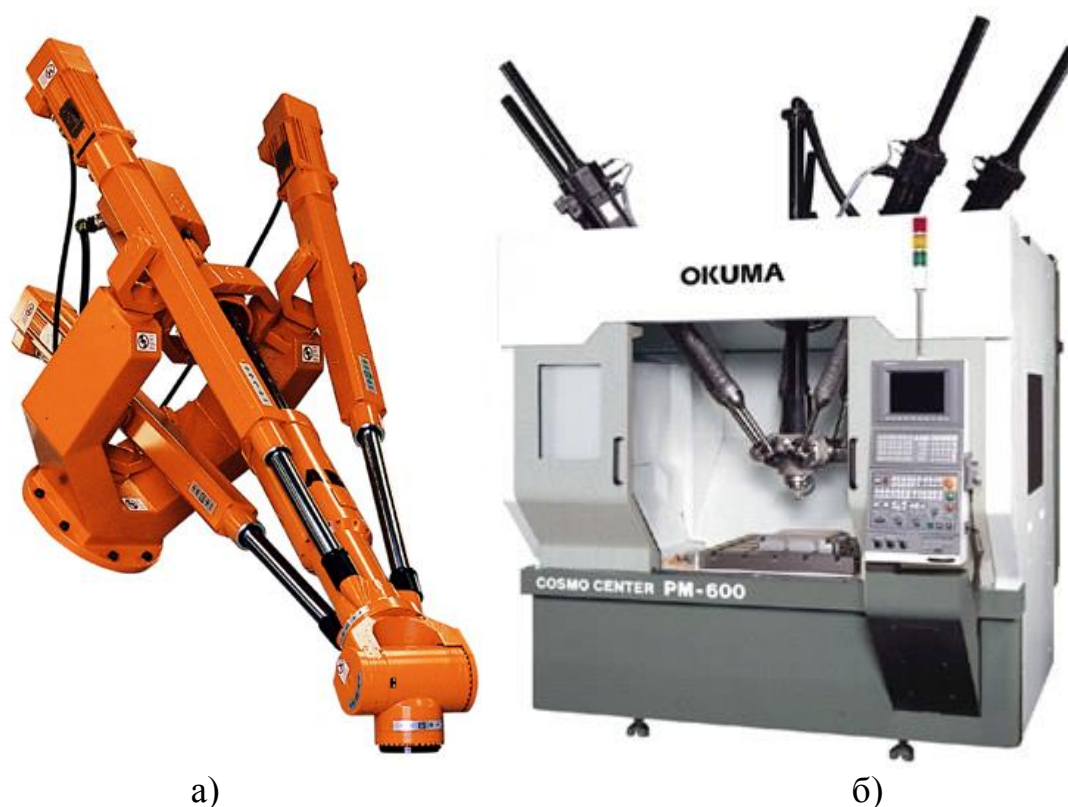


Рисунок 1.7 - Промышленные роботы на основе МПС: а) промышленный робот *Tricept IRB 940*, б) японский обрабатывающий центр *OKUMA PM-600*

Особенностью манипуляторов с параллельной структурой является отсутствие в линейных приводах изгибающей нагрузки вследствие того, что они работают только на растяжение – сжатие, обеспечивается жесткость конструкции и высокая точность позиционирования [241]. Поэтому механизмы параллельной структуры часто применяют в манипуляторах погрузочных машин и системах позиционирования [21, 363, 364].

Известна конструкция грузоподъемного крана, предназначенного для установки на транспортных средствах, грузовых автомобилях, прицепах, используемого для самопогрузки и разгрузки. Корпусы исполнительных гидроцилиндров опираются на основание с помощью сферических шарниров, а штоки гидроцилиндров шарнирно присоединены к головной траверсе укосины [4]. На рисунке 1.8, а) показан кран-манипулятор робота, основание которого приводится в действие механизмом параллельной структуры [367]. Для работы с объектами, требующими повышенной точности позиционирования и ориентации

при перемещении, применима конструкция кран-балки с механизмом позиционирования захвата в виде МПС (рисунок 1.8, б) [106].

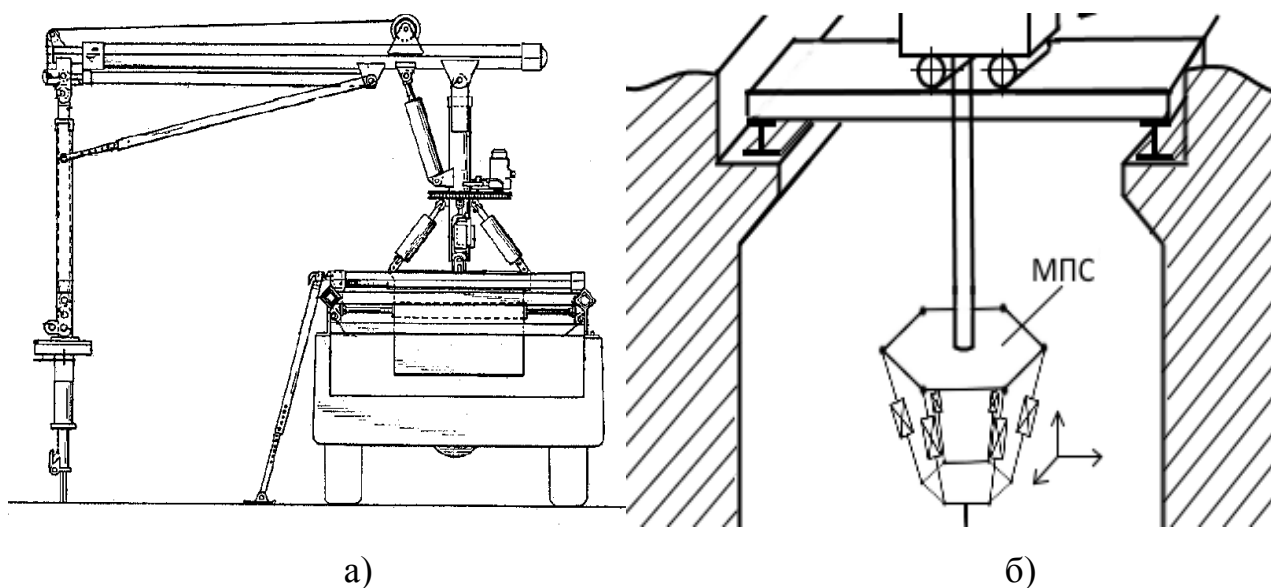


Рисунок 1.8 – Грузоподъемные средства на основе МПС

Примером использования механизма параллельной структуры в тракторостроении может служить патент США [343] (рис.1.9).

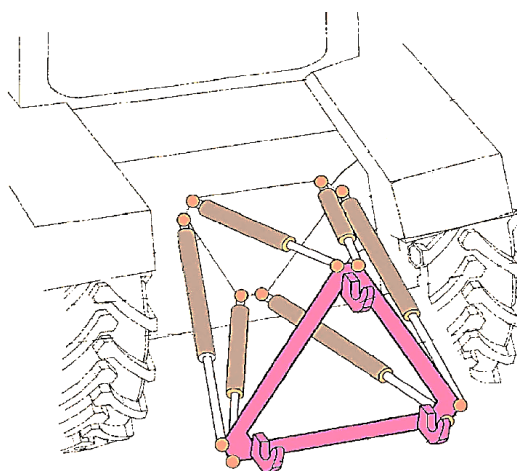


Рисунок 1.9 – Навесная система трактора с механизмом параллельной структуры в виде платформы Стюарта

Несмотря на кажущуюся сложность конструкций l - координатных манипуляторов, они обладают высокой технологичностью и простотой при

высоком значении создаваемых усилий и воспринимаемых нагрузок. В работе [133] отмечается: «На практике l - координатные механизмы используются сравнительно редко, что можно объяснить только несоответствием направления вектора входного воздействия и вектора скорости исполнительного механизма и вследствие этого кажущейся трудностью в управлении». В той же работе [133] предлагается система управления, которая построена таким образом, что оператор задаётся требуемые скорость и направление перемещения в декартовой системе координат. Система производит перерасчёт декартовых координат с помощью матрицы конструктивных коэффициентов в координаты исполнительного механизма (l -координаты). Пульт управления представляет собой шестикоординатный задатчик сил и моментов. Возможно автоматическое управление, при этом оператором задаётся посредством измерителя координат (рисунок 1.10), конечная точка перемещения груза, и весь процесс позиционирования выполняется автоматически.

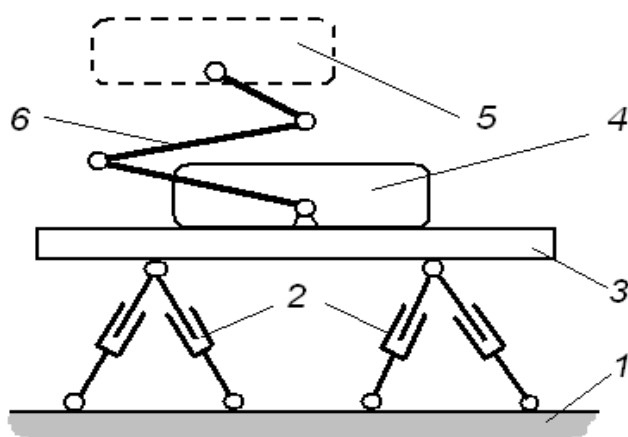


Рисунок 1.10 – Платформа с l -координатным механизмом позиционирования груза: 1 – основание; 2 – актуаторы; 3- платформа; 4- груз; 5 – требуемое положение груза; 6 – измеритель координат

Известен пространственный l -координатный манипулятор на основе гибких механических связей [40, 41], положение объекта P (рисунок 1.11) в пространстве изменяется путём изменения длин канатов. При управлении таким устройством необходимо учитывать упругие свойства канатов, которые будут проявляться в

изменении длины за счёт растяжения и сжатия под действием как гравитационных, так и инерционных сил. Также следует учитывать изменение фактической зоны обслуживания по отношению к геометрической за счёт упругости звеньев [263].

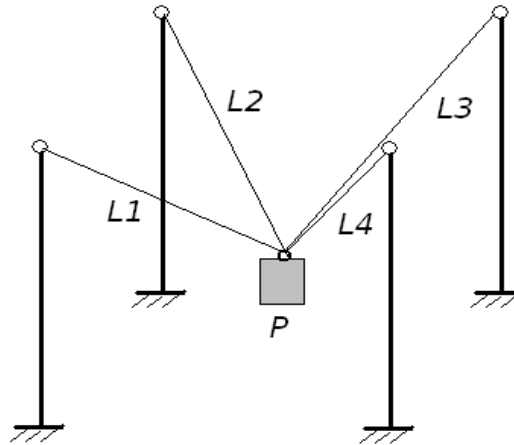


Рисунок 1.11 – Параллельный манипулятор на основе гибких связей

1.2.2. Комбинированные манипуляторы параллельной структуры

Уникальные возможности манипуляционных механизмов параллельной структуры воспринимать большие нагрузки при высокой точности позиционирования в последнее время заслуживают всё большего внимания учёных, однако, l - координатные механизмы параллельной структуры имеют ограниченный объём рабочего пространства. Вследствие чего все чаще используют комбинированные схемы, представляющие собой последовательность механизмов с МПС, как например платформа на базе двух триподов (рисунок 1.12, а), вершины которых соединяются в точке O , или механизм позиционирования радиотелескопа [382].

Разновидностью манипуляторов параллельной структуры являются многосекционные манипуляторы типа «хобот» (рисунок 1.13) [16, 128, 365]. Исследованию динамике подобных манипуляторов посвящена работа [26].

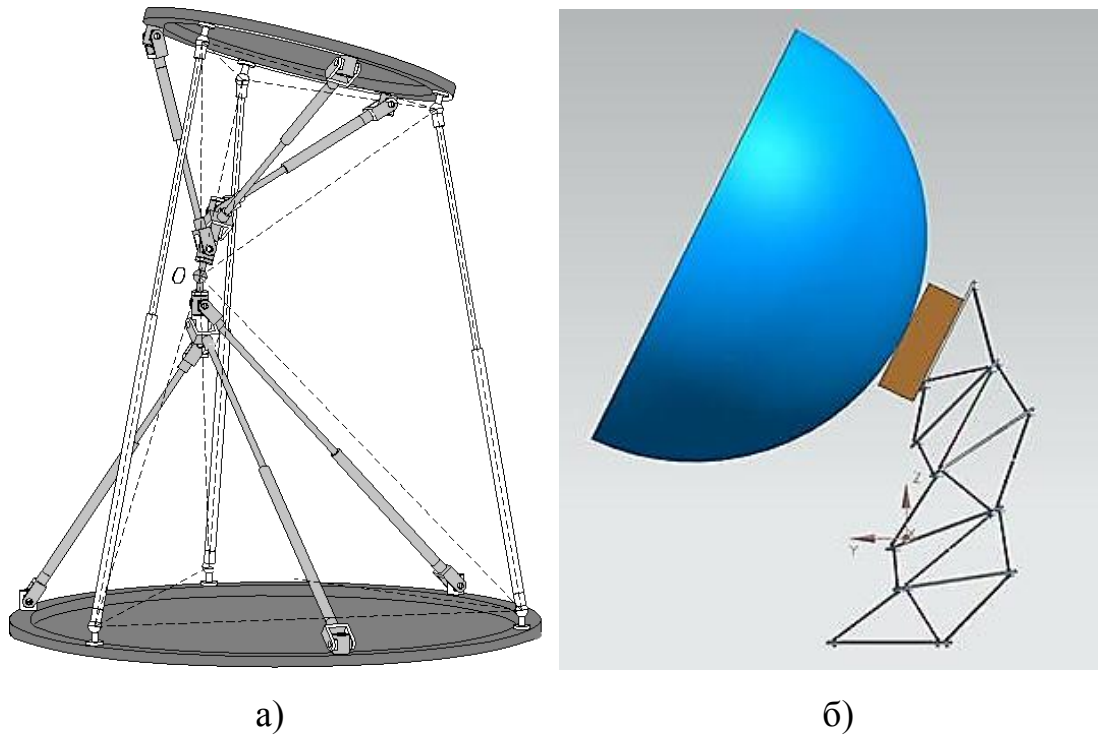


Рисунок 1.12 – Комбинированные механизмы параллельной структуры

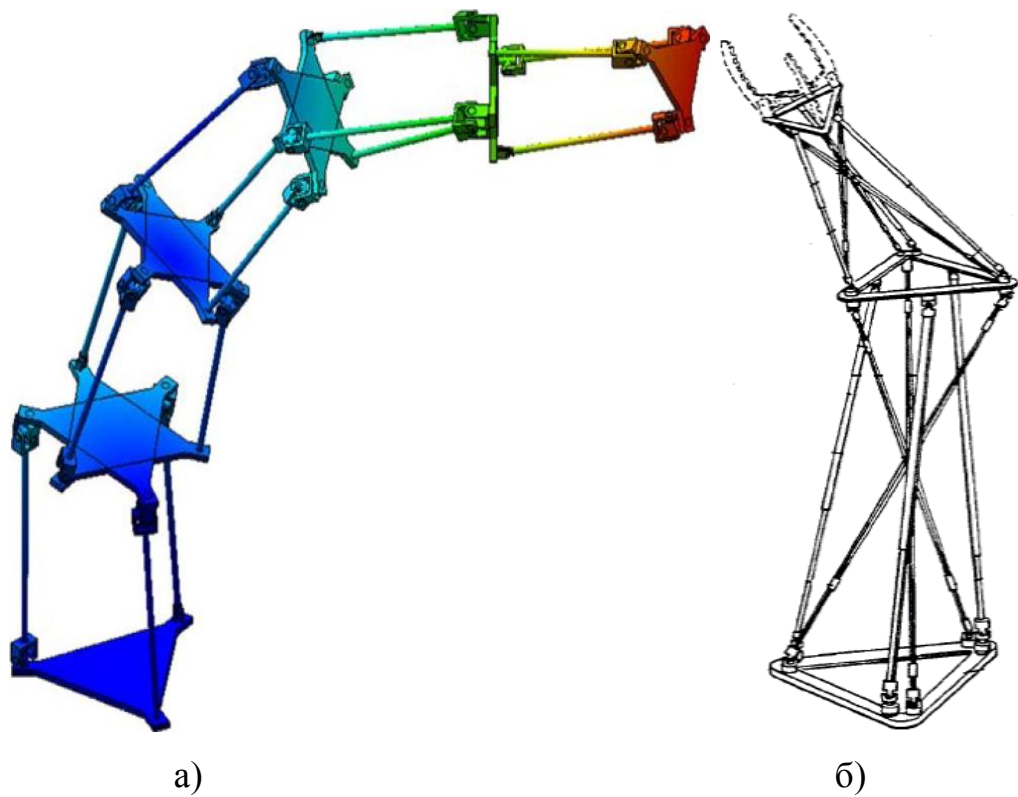


Рисунок 1.13 – Многосекционные манипуляторы параллельной структуры типа «хобот»: а) с секциями из триподов; б) с секциями из гексаподов

В работах [15, 78] рассматриваются механизмы манипуляторов параллельно-перекрёстной и параллельно-переменной структуры, которые отличаются увеличенным объёмом зоны обслуживания, способностью избегать особых положений и уменьшенным размером основания (рисунок 1.14 а, б). По утверждению авторов работы [78] имеется 118 базовых схем таких механизмов, имеющих кинематические цепи с последовательным расположением звеньев, а также взаимном соотношении между количеством кинематических цепей, расположенных перекрёстно или параллельно. При этом для всех рассмотренных вариантов базовых схем степень подвижности выходного звена $W=6$. [78].

Изменения порядка присоединения звеньев классической платформы Стюарта позволяет получать новые пространственные механизмы, например, так называемые *Flagge Parallel Manipulators* (рисунок 1.15), отличающиеся способом позиционирования подвижной платформы. Кинематическая схема (рисунок 1.15, а), состоит из треугольного основания и треугольной платформы, которые соединены между собой шестью приводными звеньями, скомпонованными следующим образом: к точке *a* платформы присоединены три приводных звена, к точке *b* одно и к точке *c* два приводных звена [106, 299].

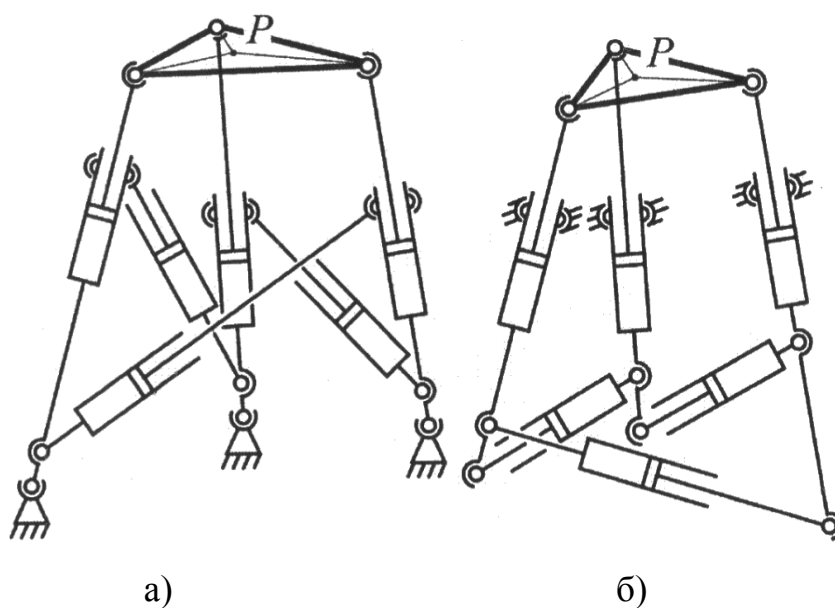


Рисунок 1.14 – *l*-координатные механизмы параллельно-перекрёстной (а) и параллельно - переменной (б) структур

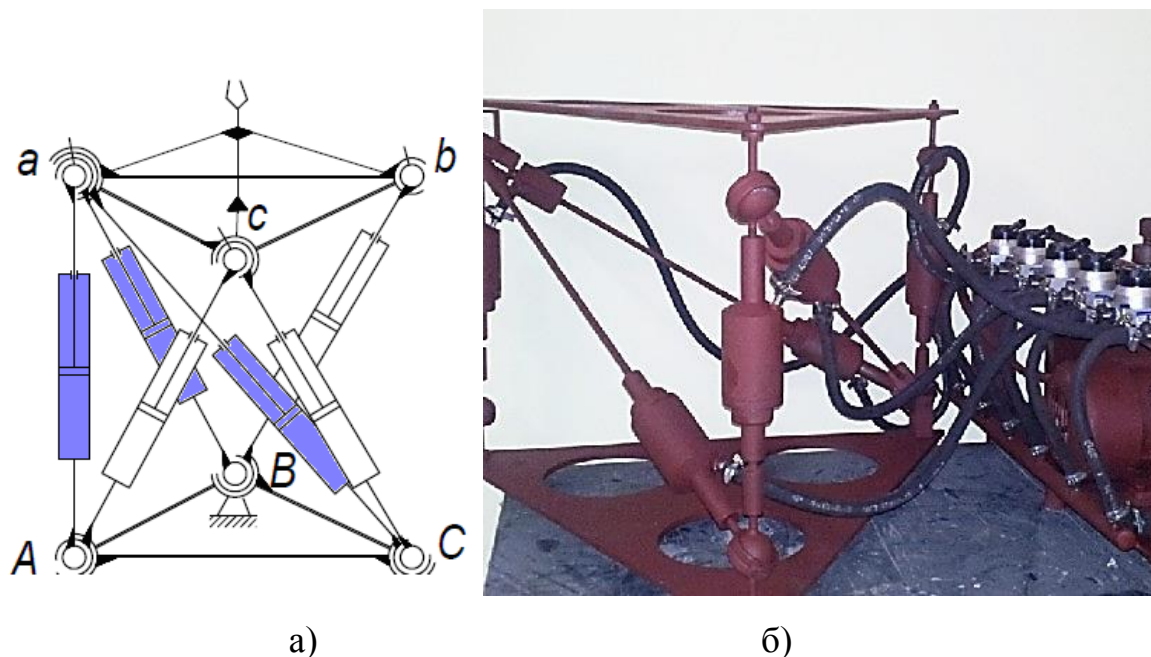


Рисунок 1.15 – Манипулятор параллельной структуры типа *Flagge*: а) структурная схема; б) опытный образец

Недостатком платформы Стюарта и многих механизмов параллельной структуры является ограниченность перемещений платформы из-за потери управляемости в особых положениях и возможности соприкосновения звеньев.

Причинами, объясняющими малое использование манипуляторов параллельной структуры в манипуляционных системах для погрузки-разгрузки штучных грузов, является ограниченная зона обслуживания и маневренность, недостаточная проработка методик, определяющих рациональные варианты структуры и конструкции пространственных l - координатных механизмов, и отсутствие универсальных алгоритмов автоматизированного управления приводами манипулятора [249]. Как отмечается в работе [255]: «Несмотря на то, что это оборудование уже выпускается, многие задачи структурного и параметрического синтеза, возникающие в процессе проектирования, до сих пор не решены».

1.2.3. Дельта – манипуляторы

Разновидностью параллельных механизмов являются дельта - роботы (рисунок 1.16) наиболее часто применяющиеся в роботах - упаковщиках и роботах-сортировщиках на конвейерах перерабатывающих и пищевых производств. Дельта-манипуляторы, как правило, представляют собой пространственные параллельные механизмы со степенью подвижности исполнительного органа (захвата, инструмента) $W=3$ (рисунок 1.16, а) или $W=4$ (рисунок 1.16, б) Основное преимущество дельта-манипуляторов, это высокие скорости перемещения рабочего органа при повышенной жесткости конструкции и, соответственно высокая точность позиционирования. К примеру, дельта-робот *ABB IRB340 FlexPicker* может перемещать объекты грузоподъемностью до 1 кг при рабочих скоростях захвата до 10 м/с и обеспечивая точность позиционирования 0,1 мм [204, 322, 373, 390].

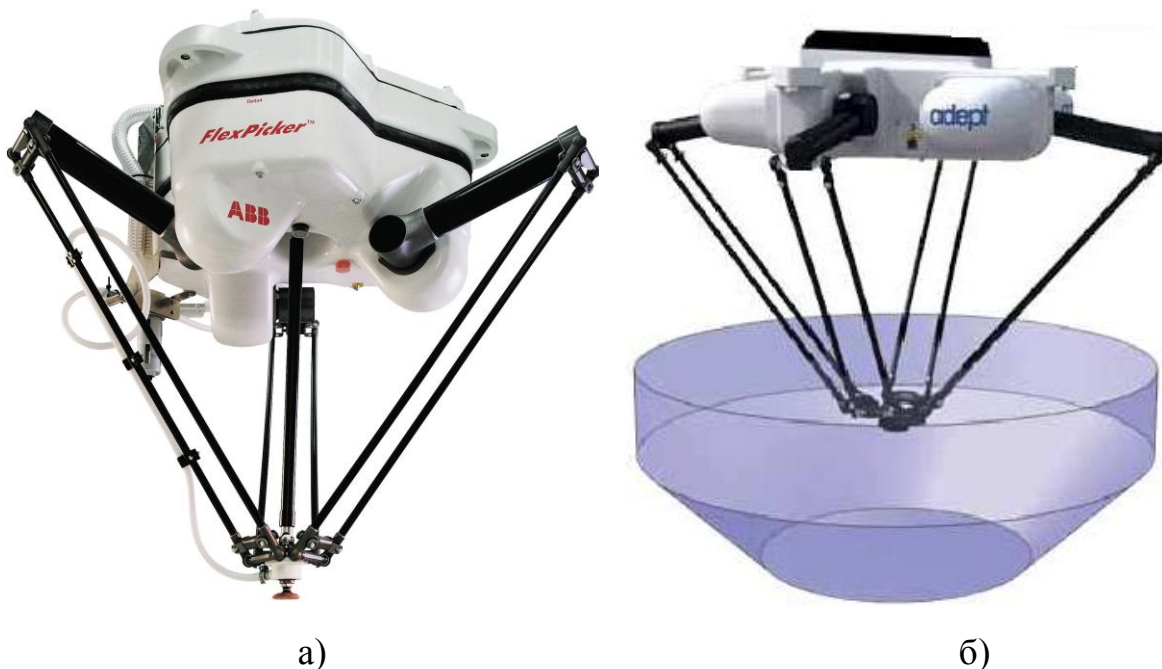


Рисунок 1.16 – Манипулятор параллельной структуры типа *Flagge*: а) дельта-робот *ABB IRB340 FlexPicker* (Швеция); б) дельта-робот компании *Festo* (Германия)

Типичным применением дельта-манипуляторов для пищевых производств является процесс упаковки и укладки объектов манипулирования в лоток или коробку, при этом одновременно выполняется контроль продукции системой технического зрения и при необходимости проводится отбраковка (рисунок 1.17, а). Помимо упаковки такие манипуляторы могут использоваться на сортировке объектов. Высокие скорости манипулирования позволяют применять дельта-манипуляторы на непрерывных производствах при работе с объектами, движущимися на транспортере или конвейере. Система технического зрения и современные аппаратно-программные средства позволяют в режиме реального времени формировать траекторию движения захвата манипулятора, захватить нужный объект «на лету» и уложить в заданную позицию [25].

Довольно часто дельта-манипуляторы используются для упаковки готовой продукции, например, для нанесения клея по контуру упаковки (рисунок 1.17, б), или для установки крышек-дозаторов многоразового использования.

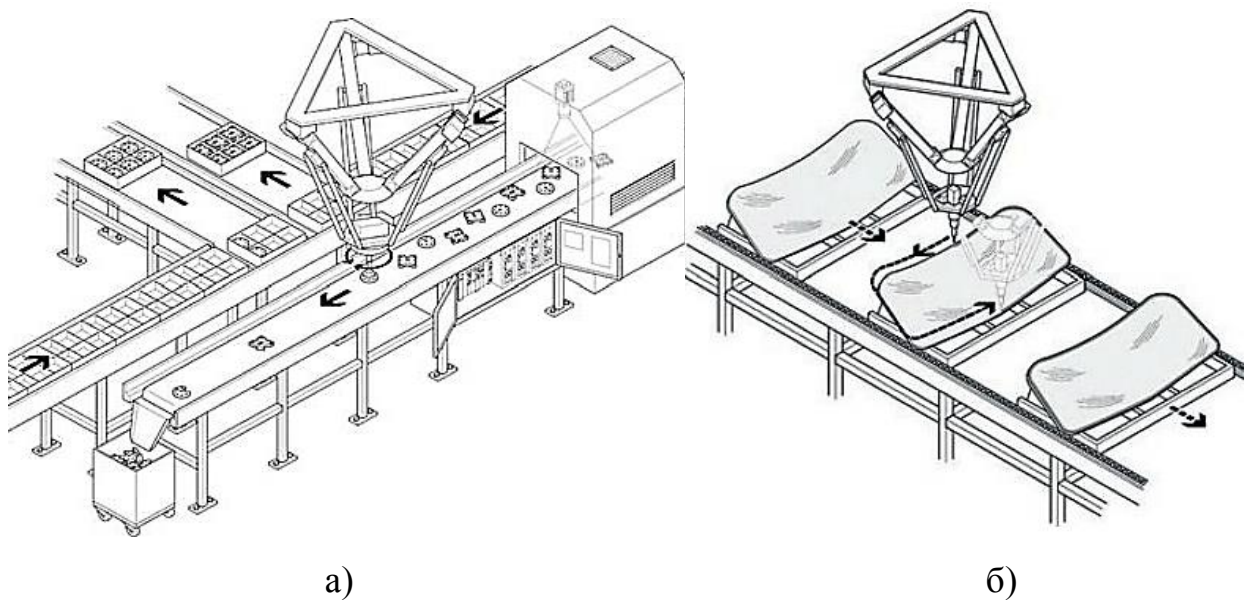


Рисунок 1.17 – Дельта-манипуляторы в технологическом процессе: а) сортировка, отбраковка и упаковка готовой продукции; б) процесс нанесения клея по контуру упаковки

1.2.4. Применение манипуляторов-триподов в непромышленных отраслях

Особое место в семействе параллельных манипуляторов занимают манипуляторы-триподы. В последнее время к ним все больше проявляют внимание. Это связано с тем, что при практически той же жесткости конструкции в триподе, в отличие от гексаподов, используется всего три звена переменной длины, задающих конфигурацию объекта позиционирования [49]. Для многих высокоточных технологических операций степени подвижности $W=3$ вполне достаточно, к тому же триподы по сравнению с гексаподами обладают меньшей материалоемкостью, энергопотреблением и что важно, более простым управлением объектом позиционирования [326, 350].

Высокая точность позиционирования и вышеперечисленные преимущества манипуляторов-триподов позволяют их все более часто применять в высокоточной технике: в 3D-принтерах (рисунок 1.18, а) и 3D-сканерах (рисунок 1.18, б). Триподы применяются также в качестве измерительных приборов, для оценки точности позиционирования инструмента.

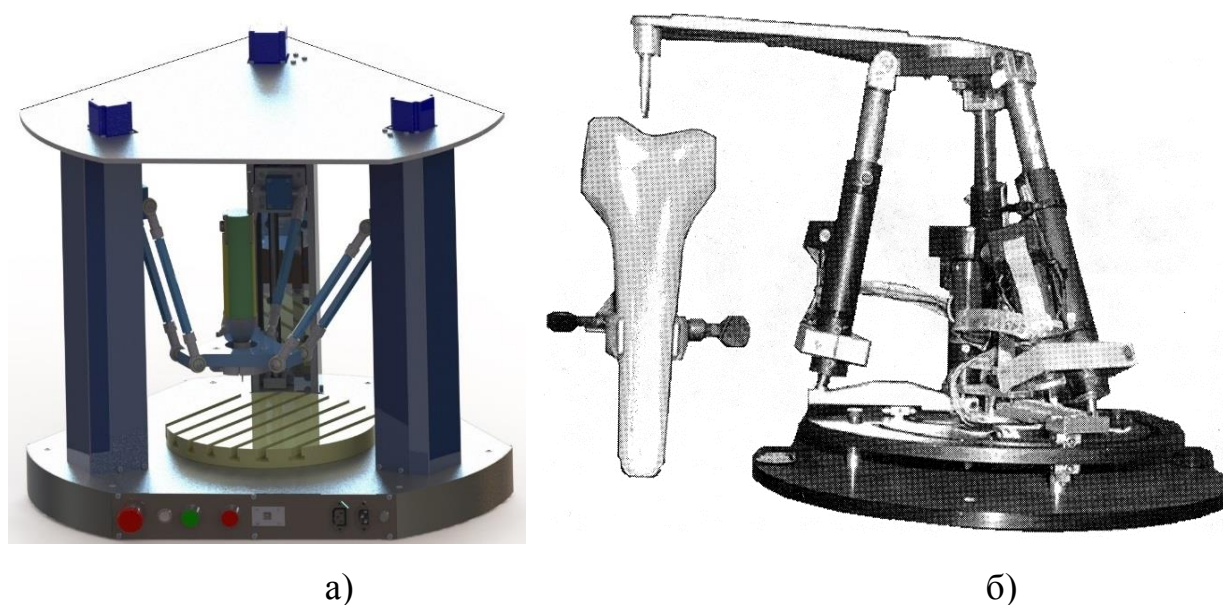


Рисунок 1.18 – Манипуляторы-триподы для 3D – технологий: а) 3D – принтер; б) 3D – сканер

Преимущества манипуляторов-триподов позволили им найти свое применение и в медицине для выполнения операций и диагностики (рисунок 1.19) [306, 361].



Рисунок 1.19 – Манипуляторы-триподы с линейными приводами для кардиохирургии

1.2.5. Применение триподов в транспортных системах

Одним из новых направлений применения механизмов параллельной структуры являются шагающие машины, в которых в качестве движителя могут применяться триподы. К примеру, в работе [180] исследовался манипулятор-трипод в качестве движителя (рисунок 1.20). Основание трипода прикреплено к трехлапной раме, вершина трипода является нижней точкой соединения шарниров и образует стопу шагающего движителя. Основание обеспечивает статическую устойчивость конструкции во время движения. Кинематическая избыточность трипода компенсируется упругими элементами, препятствующим вращению одного из приводов вокруг своей оси.

Шагание осуществляется за счет изменения конфигурации трипода, подвижная платформа-стопа имеет возможность за счет кинематической избыточности самоустанавливаться на опорной поверхности.

Другой оригинальный способ использования трипода в качестве транспортного средства приведен в работе китайских ученых [337] (рисунок 1.21), где ставится задача горизонтального позиционирования и выравнивания подвижного основания на трех опорах переменной длины. Причем опорное основание как таковое отсутствует, а свободные концы трех звеньев переменной длины имеют автономные колесные движители. В процессе движения по пересеченной местности решается задача удержания подвижной платформы в горизонтальном положении.

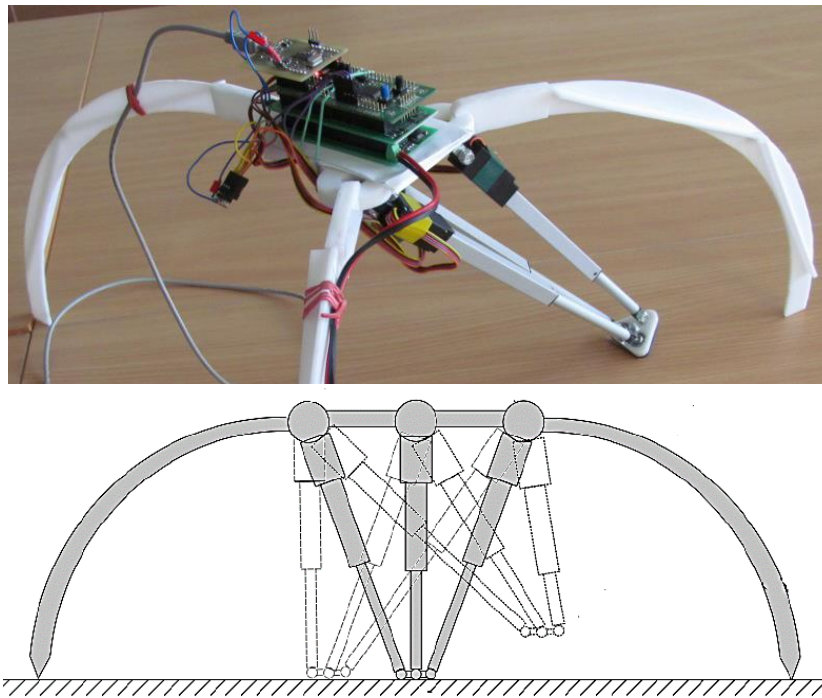


Рисунок 1.20 – Шагающее устройство с двигателем на основе трипода

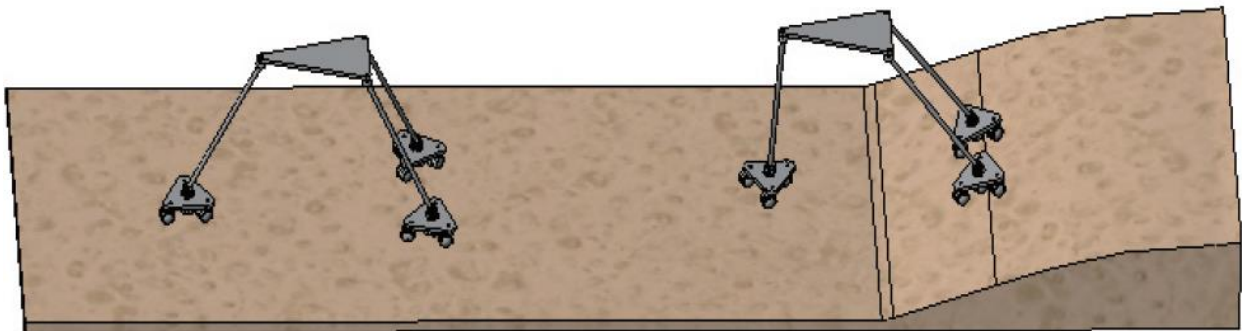
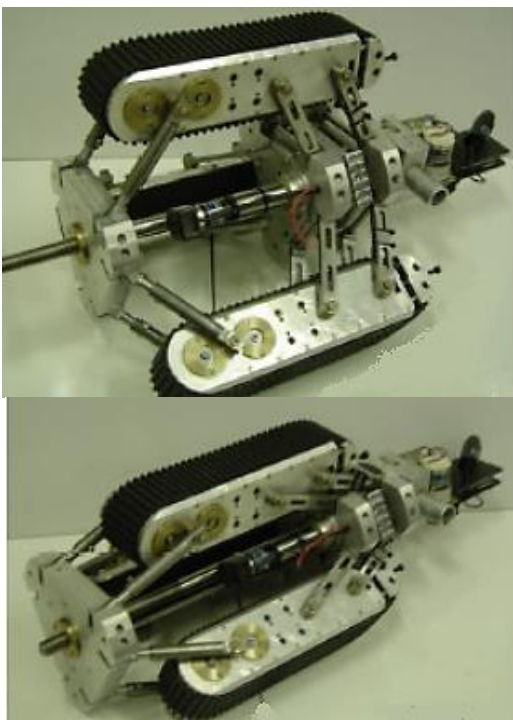
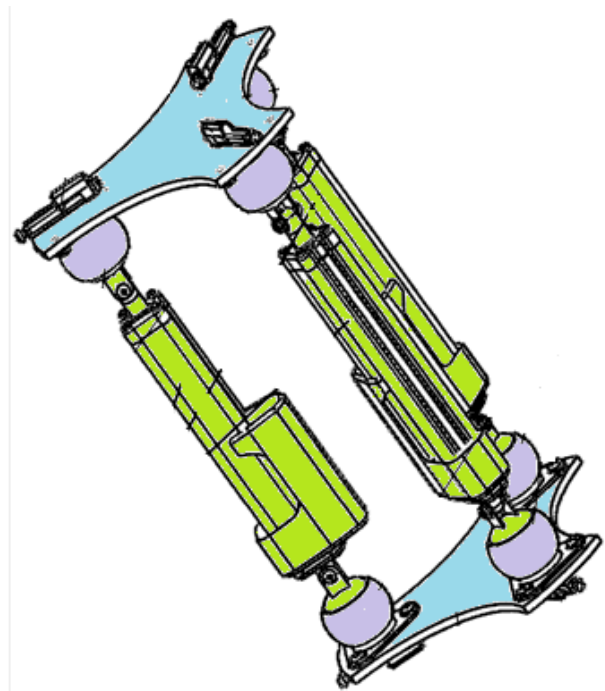


Рисунок 1.21 – Транспортное средство – трипод

Интенсивное развитие робототехники в XXI веке распространяется на все сферы деятельности. Помимо систем передвижения по открытым поверхностям существуют задачи перемещения инструмента и диагностического оборудования в ограниченных пространствах: канализационных люках, вентиляционных и технологических шахтах, трубопроводах. Среди большого количества устройств и приспособления для передвижения по трубопроводам следует выделить роботов, построенных на основе параллельных механизмов. Это гусеничный робот с изменяемой конфигурацией за счет параллельного механизма, подобного дельта-механизмам (рисунок 1.22, а.). Такой робот может перемещаться по трубопроводам разных диаметров за счет системы передвижения *Crawler* [106]. Другой робот для перемещения по трубопроводам (рисунок 1.22, б) представляет собой платформу-трипод. Перемещение по трубопроводам осуществляется дискретно, за счет изменения длин актуаторов. Такой робот может преодолевать изгибы трубопроводов большого радиуса кривизны [209].



а)



б)

Рисунок 1.22 – Роботы-триподы для перемещения по трубопроводам: а) гусеничный робот; б) робот-трипод

1.3. Погрузочные манипуляторы параллельно-последовательной структуры на базе трипода

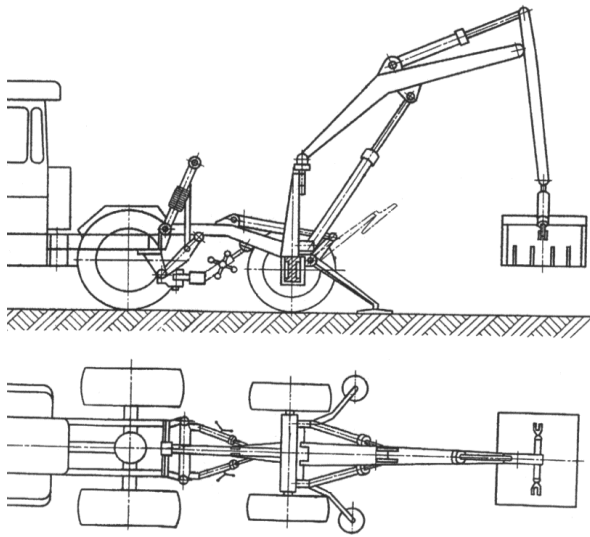
Трипод является трехосевым пространственным механизмом, реализующим линейные перемещения исполнительного звена по трем осям. Исполнительными звеньями (внутренними входами) могут быть как гидроцилиндры, так и электроцилиндры (линейные актуаторы) с поступательной и вращательной местной подвижностью или только поступательной местной подвижностью. От количества внутренних входов, а соответственно, и степени подвижности зависит максимальное число возможных одновременно действующих управляющих воздействий на звенья манипулятора.

Отличительной особенностью погрузочных манипуляторов с пространственным исполнительным механизмом, разработанных учеными Волгоградского ГАУ, от традиционных манипуляторов параллельной структуры (триподов, гексаподов) является наличие дополнительной подвижности выходного звена или подвижности основания, увеличивающая его количества степеней подвижности на одну и более единиц. Также эти манипуляторы являются примером применения МПС в разомкнутых кинематических цепях манипуляторов [254].

Примерами механизмов параллельно-последовательной структуры могут служить прицепной манипулятор (рисунок 1.23, а), навесной погрузочный манипулятор НПМ-0,8 (рисунок 1.23, б), навесной погрузочный манипулятор НПМ-0,63 (рисунок 1.23, в) и навесной погрузочный манипулятор НПМ-3(5) (рисунок 1.23, г) [2, 225].

Основой манипуляторов, представленных на рисунке 1.23, является неполнопараллельный трипод со степенью подвижности $W=2$, неизменяемое звено трипода (одно из ребер пирамиды) является стрелой манипулятора, к которой присоединяются дополнительные открытые (незамкнутые)

кинематические цепи – рукоять с цилиндром поворота, добавляющие дополнительную степень подвижности до 3-х или 4-х.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.23 – Погрузочные манипуляторы с пространственным исполнительным механизмом параллельно-последовательной структуры с тремя степенями подвижности: а) прицепной манипулятор; б) навесной погрузочный манипулятор НПМ-0,8; в) навесной погрузочный манипулятор НПМ-0,63; г) навесной погрузочный манипулятор НПМ-3(5)

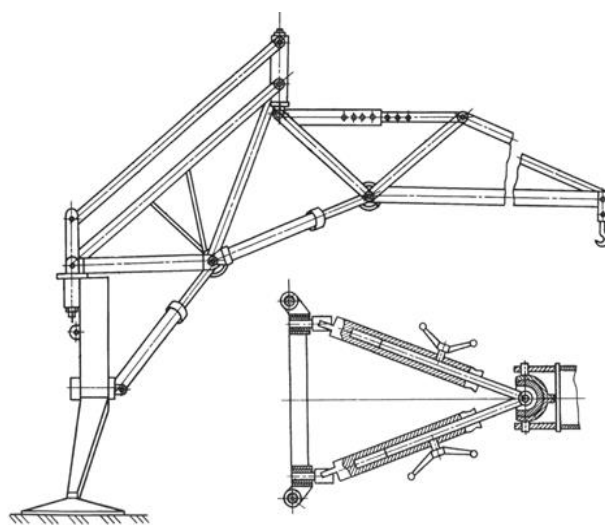
Все звенья переменной длины (внутренние входы), являющиеся гранями треугольной пирамиды, работают на сжатие. Звенья переменной длины в

последовательных кинематических цепях по рисунку 1.23 а) и б) работают на растяжение, а в конструкциях на рисунке 1.23 в) и г) эти звенья работают на сжатие.

Разновидность погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом с 4-мя степенями подвижности представлена на рисунке 1.24, а). За основу этого манипулятора взята конструкция НПМ-0,8 [1], но с подвижностью основной стрелы, установленной непосредственно на раме самоходного шасси.



а)



б)

Рисунок 1.24 – Погрузочные манипуляторы с пространственным исполнительным механизмом комбинированной структуры с четырьмя степенями подвижности: а) непараллельно-последовательный стреловой погрузочный манипулятор СПМ-0,6; б) навесной погрузочный манипулятор (проект)

Учеными кафедры «Механика» Волгоградского ГАУ предложен манипулятор с четырьмя степенями подвижности, основанный на последовательном соединении двух механизмов непараллельной структуры, являющимся примером агрегатно-модульного построения манипуляторов параллельно-последовательной структуры и позволяющим увеличить зону действия в горизонтальной плоскости (рисунок 1.24, б) [202]. Ими же в работах

[157, 203] предложена электрогидравлическая система управления погрузочным манипулятором с пространственным исполнительным механизмом в виде пирамиды. Предполагается, что предложенная схема позволит обеспечивать независимое и автоматизированное управление гидроцилиндрами, однако алгоритм реализации автоматического управления отсутствует.

Применение в мобильных роботах манипуляторов параллельной структуры позволяет снизить материалоемкость, повысить жесткость конструкции, обеспечить достаточно высокие динамические характеристики наряду с упрощением исполнительной части манипулятора. К недостаткам таких механизмов, как уже отмечалось, относятся ограниченность и относительно небольшая манипулятивность, а также сложность системы управления, что препятствует широкому применению таких манипуляторов, особенно при ручном управлении.

При разработке манипулятора мобильной роботизированной системы, предназначенного для осуществления технологических операций сельскохозяйственного производства, необходимо выполнять следующие основные требования:

- поиск и использование новых конструктивных схем и кинематических структур;
- синтез программных траекторий, обеспечиваемых кинематикой механизма и программных законов движения по этим траекториям;
- реализация технических решений на принципах модульного построения.

В достаточной степени этим требованиям удовлетворяют пространственные механизмы параллельной структуры в частности, в виде трёхгранной пирамиды (трипод) [63]. Анализ технологических процессов в сельскохозяйственном производстве показывает, что значительный объём операций можно выполнять с помощью манипуляторов, в которых движение захвата обеспечивается механизмом в виде трипода [64].

В таких манипуляторах функции металлоконструкции и приводов совмещены. Поэтому они воспринимают нагрузку подобно пространственным

фермам, и как следствие, обладают высокой точностью позиционирования при повышенных значениях скорости грузозахватного устройства. Манипулятор с механизмами параллельной структуры, по сравнению с манипулятором с последовательно соединёнными звеньями, характеризуется высоким показателем грузоподъемности, сравнительно небольшой металлоемкостью [65].

Как уже отмечалось, к недостаткам манипуляторов параллельной структуры относятся ограниченность рабочей зоны, сравнительно небольшая манипулятивность, отсутствие оптимальных алгоритмов управления [59]. Для увеличения зоны обслуживания манипулятор – трипод может устанавливаться на поворотном основании [69]. Варианты компоновки манипулятора – трипода с поворотным основанием на мобильных транспортных системах представлены на рисунке 1.25 [3].



а)



б)

Рисунок 1.25 - Манипулятор – трипод с поворотным основанием: а) с электроцилиндрами; б) с гидроцилиндрами

Разработанный и изготовленный в Волгоградском ГАУ на кафедре «Механика» кран-манипулятор смонтирован на тракторном самоходном шасси Т-16МГ (рисунок 1.25). Основу конструкции погрузочного манипулятора составляют три исполнительных силовых цилиндра, образующие треугольную пирамиду, штоки которых посредством специального шарнирного узла соединены между собой и с крюковой подвеской. Силовые цилиндры

скомпонованы на поворотном основании, приводимым во вращение дополнительным (четвертым) цилиндром. Поворотное основание монтируется на поперечной балке, закрепленной к раме шасси. Кроме того, в конструкцию шасси введены винтовые упоры, ограничивающие поворот рамы и всего крана относительно переднего моста шасси, что повышает жесткость системы, работающей без выносных опор. Манипулятор с максимальной грузоподъемностью 500 кг, имеет массу 300 кг [63, 127].

Существует ряд запатентованных учеными Волгоградского ГАУ манипуляторов - триподов с различной компоновкой исполнительного механизма и с различными способами агрегатирования: параллельно-последовательный манипулятор с четырьмя степенями подвижности на колесном шасси [199] (рисунок 1.26, а), манипулятор для погрузочно-разгрузочных работ с пятью степенями подвижности на мобильной тележке [170, 200, 201] (рисунок 1.26, б), на колесном шасси (рисунок 1.26, в), на шагающем шасси (рисунок 1.26, г) [96].

Грузовой манипулятор - трипод, установленный на платформе высокой проходимости, может успешно применяться при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера; при внедрении интенсивных машинных технологий в сельскохозяйственном производстве. Этот высокоманевренный манипулятор облегченной конструкции в состоянии обеспечить широкий ряд погрузочно-разгрузочных и транспортно-технологических и вспомогательных работ в аграрном производстве.

Мобильный робот с манипулятором - триподом может использоваться для позиционирования инструмента, датчиков, приборов на мобильном информационном роботе [61] для поиска подземных электрических и коммуникационных кабелей, магистралей тепло - и водоснабжения, схемы прокладки которых утрачены. Другое актуальное направление использования мобильного информационного робота с манипулятором - триподом, это обследование состояния заброшенных ирригационных каналов сельскохозяйственных угодий и других мелиоративных сооружений на предмет

обрушений, провалов, заиления, наличия зарослей кустарников, с целью последующего планирования восстановительных работ.

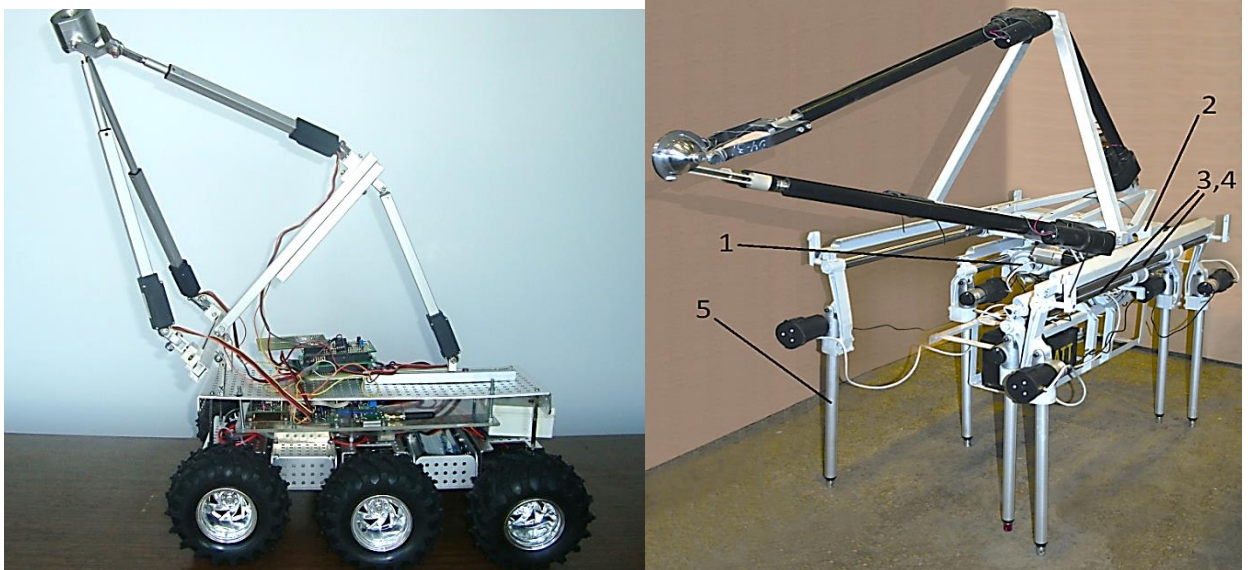
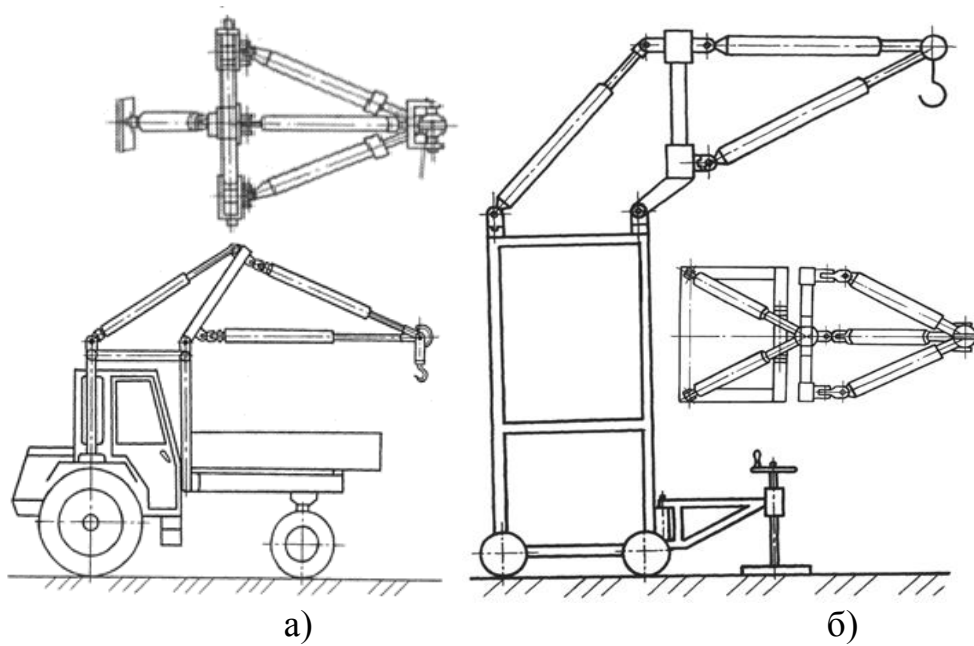


Рисунок 1.26 – Варианты компоновок и агрегатирования манипуляторов - триподов: а) вариант размещения манипулятора на СШ Т16-МГ; б) манипулятор БПМ-0,3; в) манипулятор - трипод в качестве приборонесущего оборудования на колесном шасси; г) манипулятор - трипод с четырьмя линейными приводными звеньями на шагающем роботе РШ-7

Основу манипулятора составляет пространственный приводной трёхстержневой механизм в виде треугольной пирамиды с управляемыми звеньями переменной длины в качестве исполнительных звеньев.

Конструкция манипулятора – трипода может агрегатироваться на мобильных роботах (рисунок 1.27). Механизм состоит из трех звеньев 1, 2, 3, концы которых закреплены с помощью специальных двух - подвижных шарниров на поворотном основании 5, что позволяет увеличить зону обслуживания. Противоположные концы исполнительных звеньев соединены специальным шарниром 6 (рисунок 1.28), обеспечивающим пересечение геометрических осей этих звеньев в одной точке, что исключает появление изгибающих моментов в механизме манипулятора от внешних нагрузок [61, 63]. В результате образуется пространственная структура повышенной жёсткости с высокими динамическими характеристиками. Основание 5 имеет возможность поворачиваться вокруг горизонтальной оси за счёт изменения длины звена 4. Перемещаемый груз с помощью захвата крепится на жестком подвесе, который с помощью цилиндрического шарнира прикреплен к узлу 6. Ось шарнира во все время движения остается горизонтальной и перпендикулярной продольной оси первого звена.

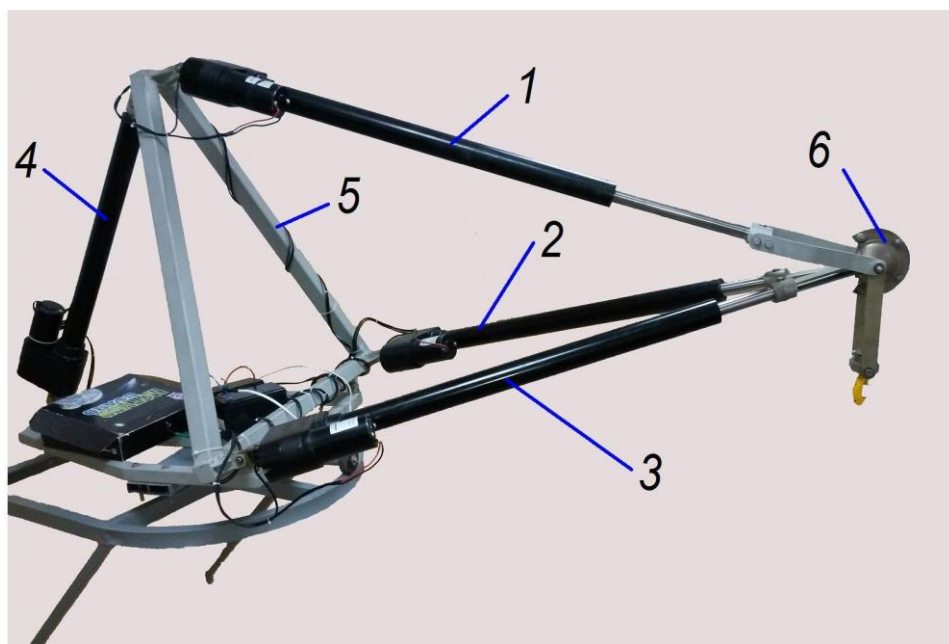


Рисунок 1.27 – Манипулятор – трипод на подвижном основании

Механизм обладает тремя степенями свободы (без учета поворота основания 5), точка вершины пирамиды является единственной ведомой точкой. При изменении длины хотя бы одного звена изменяется геометрическая форма "пирамиды" и её вершина, несущая грузозахватный орган, начинает перемещаться в пространстве. Парциальные движения звеньев обеспечивают перемещение захвата по дуге окружности. Работой одного, двух или всех четырех звеньев грузозахватный орган перемещается в заданную точку пространства, лежащую в пределах зоны обслуживания манипулятора.



а)



б)

Рисунок 1.28 - Пятиподвижный сферический шарнирный узел: а) шарнирный узел в сборе; б) вид шарнирного узла со стороны основания трипода

В качестве исполнительных звеньев манипулятора используются линейные актуаторы фирмы *SKF* (электроцилиндры с приводным механизмом, состоящим из двигателя постоянного тока, червячного редуктора и винтовой передачи) *САНВ-21*, позволяющие развивать усилие на штоке до 2,3 кН при скорости штока 45 мм/сек., напряжение питания 24 В, потребляемый ток 8,5 А. Электроактуаторы оснащены потенциометрическими датчиками положения штока. Преимущества

электроактуаторов (электроцилиндров) – экологичность и безопасность, способность работать в широком диапазоне температур от -40° до $+80^{\circ}\text{C}$, что несомненно важный фактор для использования в различных экстремальных условиях [283]. Основными достоинствами электроцилиндров являются простота их обслуживания, стабильность развиваемых усилий, быстродействие не ниже чем у гидроцилиндров и высокая точность позиционирования. К тому же, автоматизация однотипных и часто повторяющихся операций при использовании электропривода реализуется проще по сравнению с гидроприводом.

Начальная длина звена 1 равна 1160 мм, ход 610 мм, начальная длина 2-го и 3-его звеньев 1140 мм, ход 610 мм, начальная длина 4-го звена 843 мм, а ход 457 мм. Максимальная нагрузка толкания и втягивания равна 2300 Н. Скорость при полной нагрузке 45 мм/с, в отсутствии нагрузки 65 мм/с.

В зависимости от вида технологического процесса, представленная конструкция манипулятора-трипода на подвижном основании может агрегатироваться с различными мобильными платформами (на колесном, гусеничном, шагающем шасси) [61, 206]. Конструкции шарнирных узлов в геометрической точке пересечения исполнительных звеньев позволяют использовать различные варианты грузозахватных устройств (крюковая подвеска, захват).

Отмеченные выше условия работы, требуют индивидуального подхода к созданию таких манипуляторов, однако вопросы их теории разработаны недостаточно [61, 65]. Поэтому исследования, посвященные выбору рациональных геометрических, кинематических и силовых параметров предлагаемой конструкции манипулятора, являются актуальными. Для определения параметров манипулятора и разработке системы управления необходимо разработать динамическую модель его функционирования.

В связи с этим актуальны задачи построения рациональных структурных схем, оптимизации геометрических, кинематических и силовых параметров манипуляторов параллельной кинематической структуры и разработка методик их расчета и проектирования.

1.4. Методы исследования манипуляторов параллельной структуры

Исследованиям механизмов параллельной структуры посвящено большое количество работ российских и зарубежных ученых. Возрастающий интерес к плоским и пространственным параллельным механизмам обоснован востребованностью таких механизмов в различных отраслях деятельности человека из-за ряда их положительных свойств.

Можно выделить основные направления исследования механизмов параллельной структуры: структурное строение, структурный анализ и синтез механизмов, геометрический синтез, исследование особых положений (сингулярности) плоских и пространственных параллельных структур, решение прямой и обратной задачи кинематики, решение задач позиционирования выходного звена, траекторный синтез, силовой анализ, динамическое исследование и динамический синтез, синтез законов перемещения выходного звена, исследование вибраций в механизмах параллельной структуры, исследование параллельных механизмов с упругими звеньями и другие. Из всего многообразия решаемых задач, их круг определяется, как правило, исследованием конкретного механизма под заданные цели и технологические процессы [164].

1.4.1 Особенности структурного строения, анализа и синтеза манипуляторов параллельной структуры.

Несмотря на относительную новизну механизмов параллельной структуры, они образуют обширный класс.

Классификацией механизмов параллельной структуры впервые провел К. Хант, дальнейшее развитие классификации l – координатных механизмов нашло в работах В.А. Глазунова, А.Ф. Крайнева, А.И. Корендясева, Б.Л. Саламандры, Л.И. Тывеса, И.И. Артоболевского и многих др. [15, 17, 18, 35, 70-78, 150, 151, 152, 173, 309]. На основе анализа существующих кинематических структур манипуляционных систем предлагается для погрузочных роботов-манипуляторов

на основе МПС следующая классификация, представленная на рисунке 1.29 [93, 106, 215, 259, 260].

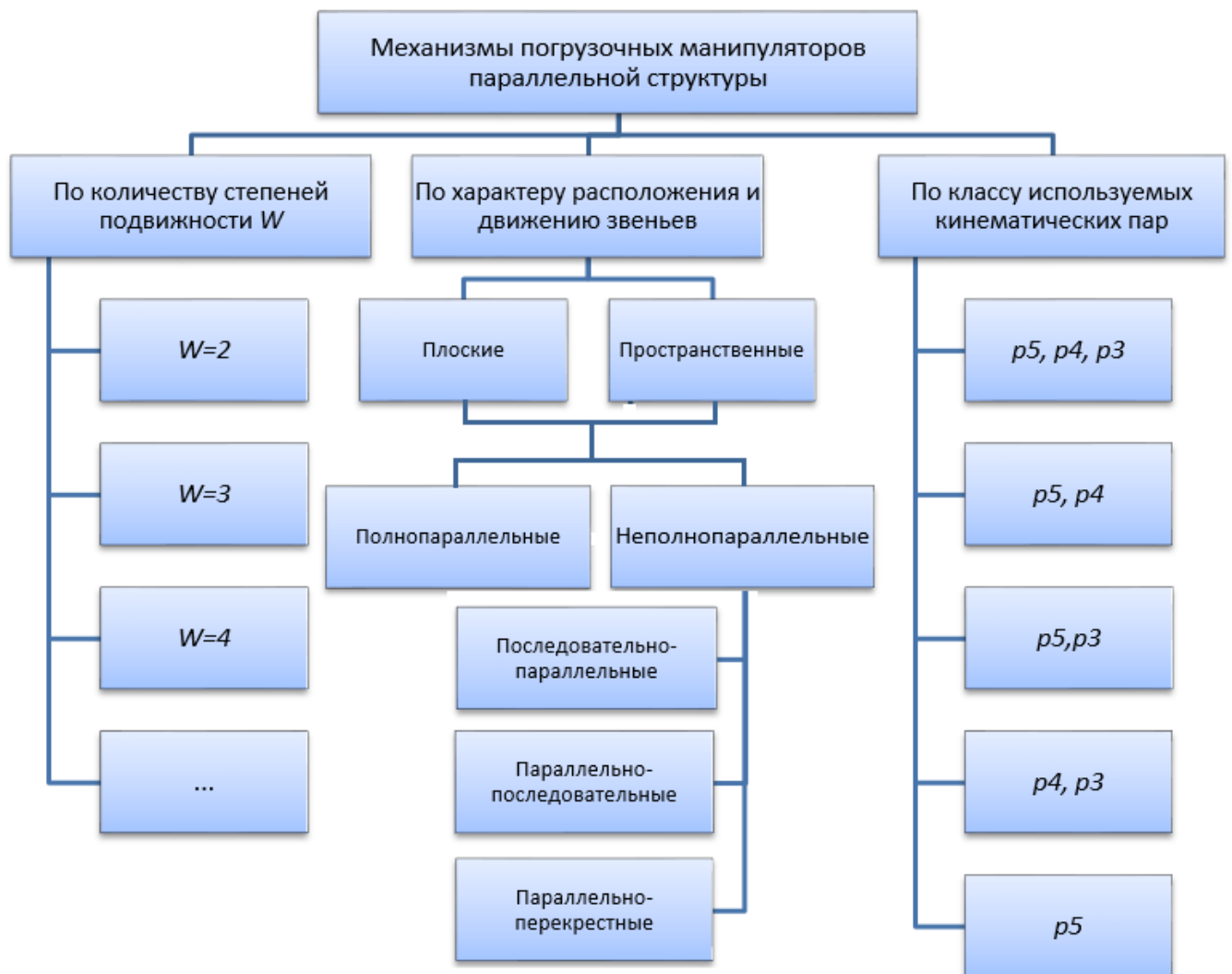


Рисунок 1.29 – Классификация погрузочных роботов-манипуляторов на основе МПС

Методами классификации механизмов, структурным анализом и синтезом начиная с XIX века и до настоящего времени занимались многие ученые, из них такие как П.Л. Чебышев, П.О. Сомов, Л.В. Ассур, А.П. Малышев, И.И. Артоболевский, В.В. Добровольский, О.Г. Озол, С.Н. Кожевников, Э.Е. Пейсах. Структурному и геометрическому анализу и синтезу механизмов параллельной структуры посвящены работы В.А. Глазунова, В.М. Базрова, А.Ф. Крайнева, Ю.А. Семенова, А.В. Слоуща, В.И. Пындака, Г.В. Рашояна, Л.А. Рыбак, С.В. Хейло и

иностранных *Angeles J., Wang J. Gosselin C., Chen W.J.* и др. [10, 15, 17, 18, 35, 70-78, 102, 132, 136, 142, 145, 168, 181, 191, 210, 211, 218, 227, 239, 240, 246, 251, 259, 260, 279, 280, 281, 297, 308, 309, 320, 321, 325, 328, 330, 331, 332, 344, 378, 379].

Степень подвижности манипулятора W , есть число независимых обобщенных координат, однозначно определяющих положение исполнительного органа в пространстве

Для определения степени подвижности существует ряд формул:

Формула П.Л. Чебышева [18, 109, 142: стр.48]

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (1.1)$$

n – число подвижных звеньев; p_i – количество кинематических пар i -ого класса.

Формула В.В. Добровольского [18, 109]

$$W = (6 - m)n - \sum_{k=5}^{k=m+1} (k - m)p_k, \quad (1.2)$$

m – количество общих связей положенных на движение звеньев механизма $m=0, 1, 2, 3, 4, 5$; k – номер класса кинематической пары $k=5, 4, 3, 2, 1$.

Формула Л.Н. Решетова [109] $W_0 = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i + s$ – число степеней

подвижности основной структурной схемы (без избыточных кинематических связей и лишних подвижностей); S – число избыточных контурных связей всего механизма; W_0 и S два неизвестных параметра, при расчетах обычно значение S или W_0 принимают из конструктивных соображений.

Все известные формулы для определения количества степеней подвижности могут быть приведены к одному обобщенному виду [136, 240]

$$W = \mu \cdot n - \sum_{i=1}^{\mu-1} (\mu - i) \cdot p_i \quad (1.3)$$

где μ – количество степеней свободы того пространства, в котором работает механизм ($\mu=6$ – для пространственного движения); n – число подвижных звеньев механизма; p_i – число кинематических пар механизма i – класса.

Избыточные связи q могут служить причиной снижения надёжности механизма, так как могут вызывать заклинивания и чрезмерный износ из-за появления дополнительных реакций связей [7, 216].

Число избыточных связей можно определить по формуле О.Г. Озола [142] $q = W + 6k - (5p_5 + 4p_4 + 3p_3 + 2p_2 + p_1)$, k – число независимых контуров механизма, $k = m - n + 1$ (m – число кинематических пар, n – число подвижных звеньев). Для механизма, свободного от дублирующих звеньев, при $q > 0$ система статически неопределима, что отражается на работоспособности кинематических пар; при $q < 0$ система приобретает местную подвижность; при $q = 0$ механизм статически определим.

Если структурная схема механизма обладает избыточными звеньями и кинематическими парами, то такой механизм обладает конструктивной избыточностью.

Определение избыточных контурных связей и лишних степеней подвижностей является основной задачей структурного анализа, причем одна из основных задач структурного анализа, это указание способов их устранения [109].

Число замкнутых контуров механизма можно найти по формуле Гофмана

$$K = \sum_{i=1}^5 p_i - n \quad (1.4)$$

n – число подвижных звеньев.

При структурном анализе пространственных механизмов манипуляторов возникает парадокс, заключающийся в получении степени подвижности $W = 0$, тем не менее из механизма явно видно, что он подвижен, это объясняется наличием избыточной связи в механизме [282]. В работе Корендясева А.И., Саламандры Б.Л., Тывеса Л.И. [152] также отмечено, что число кинематических пар манипулятора неоднозначно определяет число его степеней подвижности и W зависит от конфигурации механизма.

Отсутствие и недостаточную проработанность методик получения оптимальных параметров манипуляторов параллельной структуры отмечается в работе [291].

Число степеней подвижности W манипулятора не всегда равно числу степеней свободы S захвата (рабочего органа), в общем случае при любом W число степеней свободы захвата $S \leq 6$, текущее значение S можно получить при исследовании матрицы Якоби частных передаточных отношений $S = \text{rank} J$ [150]. Если определитель матрицы J не равен 0, то в данной точке пространства $S=6$, в противном случае какие-то степени свободы захвата теряются или становятся зависимыми от других степеней свободы.

Обращение определителя матрицы Якоби в нуль является признаком особого положения механизма. В работе [152] предложен метод структурного анализа механизма, основанный на информации о нулевых или ненулевых элементах матрицы Якоби, позволяющий делать вычисления без элементов матрицы. Данная методика позволяет получать максимальное число нулевых элементов в строках матрицы J .

В работе [110] отмечается, что особые положения механизма могут приводить к исчезновению некоторых степеней свободы, либо к появлению неуправляемой подвижности, нарушающей определённость управляемого движения. Особые положения механизмов характеризуются вырождением матрицы Якоби, однако для пространственных механизмов параллельной структуры, имеющих замкнутые кинематические цепи этот метод не позволяет однозначно описать особые положения. За критерий особых положений в плоских механизмах принимают нулевое значение определителя матрицы Якоби [76, 95, 234, 326]. Кстати, в работе [9] сделан вывод о том, что никакой метод решения прямой задачи геометрического анализа механизма платформы Стюарта в окрестности особого положения не позволяет получить точный результат.

Геометрической интерпретацией особого положения пространственного l -координатного механизма параллельной структуры является вырождение структуры тетраэдров в плоскость [65, 174].

Одной из форм структурного исследования механизмов параллельной структуры является генетико-морфологический подход основанный на принципах структурообразования в системах естественного и антропогенного

происхождения [162]. Механизмы параллельной кинематики основаны на замкнутых кинематических цепях и построены на основе бесконсольных конструкций, в связи с чем, структурный синтез и анализ на основе генетико-морфологического подхода вполне применим к манипуляторам параллельной структуры.

Квалификационным признаком механизма является не только число степеней подвижности W , количество кинематических пар p_i , но и взаимное расположение кинематических цепей. Глазуновым В.А., Аракелян В и Брио С. [15] предложен и рассмотрен новый класс механизмов параллельной кинематики – механизмы параллельно-перекрестной структуры.

Параллельные манипуляторы по структурному строению предлагается разделять на полнопараллельные и неполнопараллельные, как например, в работе [354]. К последним следует отнести погрузочные манипуляторы НПМ-0,6; НПМ-5 (раздел 1.3, рис.1.23).

Определение структуры механизма относится к задачам комбинаторной (дискретной) математики, большинство которых решается перебором [189, 231: стр.119].

Структуру манипуляторов представляют в виде структурных и топологических схем [358, 359, 380], неориентированных графов [136, 149], матриц смежности и инцидентности [19, 139].

Топологию кинематических связей манипуляторов параллельной структуры принято описывать рядом букв, кодирующих тип и последовательность кинематических пар, начиная с основания (стойки) (R – вращательная пара, P – поступательная пара, S – шаровая пара, U или (RR) карданное соединение). Если данная кинематическая пара активная, ее буква подчеркивается. Тогда топология любого механизма параллельной кинематической структуры (МПКС) с n идентичными кинематическими связями может быть записана в виде: $n - JJJJ$, где $J = \{R, P, S\}$. В данной работе также используется общепринятая топология. В ряду параллельных механизмов с шестью степенями свободы, наиболее известными

является 6-*UPS* параллельный механизм, обычно называемый платформой Гафа-Стьюарта (Гью-Стьюарта) [375].

Геометрический анализ пространственных механизмов параллельной структуры применим для пространственных *l*-координатных манипуляторов в том случае, если в последних используются кинематические пары V класса и такие манипуляторы можно представить в виде квазиплоского механизма [45, 59, 313].

При использовании в манипуляторах кинематических пар V класса число различных вариантов кинематических структур равно 2^W . [220]. Для манипулятора-трипода при $W=3$ число вариантов кинематических структур составляет $2^3=8$, а для манипулятора параллельно-последовательной структуры с $W=4$, соответственно $2^4=16$. При произвольном взаимном ориентировании кинематических пар количество вариантов компоновок манипулятора становится бесконечно большим.

Для подавляющего большинства подобных пространственных механизмов число внутренних входов $n_{ц}$ (исполнительных цилиндров) равно числу степеней подвижности W , от количества которых зависит максимальное число возможных одновременных управляющих воздействий. Например, для рассмотренных выше пространственных манипуляторов (рис. 1.22, а, б, в) количество степеней подвижности относительно основания и, соответственно, число независимых обобщённых координат $q=n_{ц}=W=3$. Это равенство является условием нормальности механизма [136, 240].

При проектировании новых механизмов погрузочных манипуляторов с числом степеней подвижности, необходимым для обеспечения заданной зоны обслуживания, требуется решать задачу структурного синтеза. Механизмы пространственных манипуляторов с избыточными связями и (или) лишними подвижностями могут вырождаться в особых положениях, что приводит к потере управляемости [296, 312]. Поэтому создание механизмов без избыточных связей и лишних подвижностей является актуальной задачей синтеза механизмов.

Как правило, при синтезе механизмов задаются требуемой степенью подвижности W и определяют число подвижных звеньев n , сумму подвижностей f_{Σ} и число кинематических пар p_i i -ой подвижности [215, 323, 339, 384].

В настоящее время известно достаточно много моделей структурного синтеза плоских механизмов, однако для пространственных механизмов параллельной структуры, однозначных методов синтеза до сих пор не разработано [93, 245, 252].

Структурный синтез механизма манипулятора направлен не только на обеспечение необходимых степеней подвижности, но и на обеспечение необходимой зоны обслуживания, и что не мало важно – на удобство программирования управляющих степенями подвижности движений.

Задача структурного синтеза – получение механизмов с заданной степенью подвижности W без избыточных связей и лишних подвижностей при минимальном количестве подвижных звеньев [215].

Например, структурный синтез строительных роботов манипуляторов [196] проводится посредством пооперационного анализа с целью поиска оригинальных структурных решений, учитывающих технологические особенности операций и условия рабочей среды. Формализация структуры манипулятора осуществляется в виде матриц взаимосвязей и параметров.

Критериями оптимальности при структурном синтезе таких манипуляторов могут выступать [197, 198]:

- сложность структуры (влияющая в первую очередь на технологичность изготовления манипулятора и его стоимость);
- манёвренность;
- коэффициент сервиса;
- коэффициент нагрузки звеньев;
- рабочий объём манипулятора;
- коэффициент эффективности использования рабочего пространства.

В работе [198] при синтезе манипулятора использовались критерии сложности структурной схемы, маневренность, геометрические параметры зоны

обслуживания. В качестве критерия эффективности соотношения длин звеньев использовался критерий минимизации суммарной работы, которая выполняется при обработке технологических траекторий

$$A(l) = \sum_{j=1}^n \left(\int_0^t |P_j(l)| dt \right) \rightarrow \min, \text{ где } P - \text{ мощность привода.}$$

Синтез структурных схем механизмов представляет собой многокритериальную задачу. Математическая модель такой задачи подразумевает как использование линейных уравнений и неравенств, так и логических условий [252].

Процедура оптимизационного структурного синтеза пространственных манипуляторов – триподов, как правило, начинается с решения задачи выбора критерия оптимальности структурного строения [23]. В качестве такого критерия оптимальности может выступать число избыточных связей в механизме. Такой критерий напрямую связан с одной стороны с технологичностью изготовления изделия, ведь избыточные связи усложняют изготовление механизма и его сборку, а с другой стороны влияют на его надежность в процессе эксплуатации.

Структурному синтезу манипуляторов параллельной структуры посвящено много работ российских (Глазунов В.А., Базров В.М., Дворников Л.Т., Рашоян Г.В., Семенов Ю.А, Степанов А.В. и др.) и зарубежных учёных (*Zhang.D., Chen. Y., Yang G.* и др.). Например, итерационный метод синтеза механизмов параллельной структуры с целью определения количества и класса кинематических пар при минимизации значений реакций в них описан в работе [323].

Однако следует отметить, что в настоящее время не существует окончательно сформулированной теории, которая позволяла бы эффективно проводить синтез механизмов параллельной структуры для заданных целей.

Задачи структурного синтеза механизмов с четырьмя степенями подвижности рассматривались Глазуновым В.А., Ширинкиным М.А., *Angeles J.* [206, 207]. А в работе Крохмаль О.Н. рассмотрен метод создания алгоритмов

синтеза механизмов на основе теории графов, направленный на выявление изоморфных графов синтезированных механизмов [158].

Исследование графов на изоморфизм методом Мрютхюнджайа основан на сравнении матриц смежности вершин графа, однако в некоторых случаях [139] этот метод даёт некорректные результаты.

В работах Чена и Гупты [288, 321] предложен синтез механизмов методом наименьших квадратов – итеративный и прямой, причём итеративный метод отличается своей простотой.

При синтезе механизмов параллельной структуры следует учитывать, что кинематические пары являются стационарными голономными связями. При отсутствии в механизме избыточных связей и лишних степеней подвижности задача определения усилий в звеньях механизма статически определяемая [10]. Число возможных уравнений кинестатики пропорционально числу подвижных звеньев n пространственного механизма $j=6n$, где 6 получается суммой 3-х уравнений проекций сил на оси координат и 3-х уравнений моментов относительно координатных осей.

Задача синтеза пространственных механизмов манипуляторов может быть сведена к задаче линейного программирования [47].

Новый метод синтеза кинематических цепей основанный на универсальной структурной системе предложен в 1993 г. [91, 92, 94] Л.Т. Дворниковым.

Дворников Л.Т. использовал для структурного синтеза критерий сложности звена. Система уравнений для синтеза механизмов с учетом критерия выглядит следующим образом [91, 92]

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^5 p_k = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1, \\ W = 6n - \sum_{k=1}^5 p_k, \end{cases} \quad (1.5)$$

где W - подвижность систем; n - число подвижных звеньев; τ - максимальная сложность используемых звеньев; k - класс кинематических пар, привносящих в цепь i – кинематических пар; p_k - число кинематических пар k -класса.

Наиболее сложный этап структурного синтеза, это получение вариантов соединения звеньев между собой, которых может быть довольно много. На этом этапе необходимо решать задачу выбраковывания неработоспособных механизмов. В настоящее время отсутствуют научные рекомендации по рациональному выбору структур вновь разрабатываемых роботов и манипуляторов. В работе [245] отмечено: «Окончательный выбор перспективной структурной схемы манипулятора можно сделать только с учетом кинематических, динамических, потребительских и технологических свойств».

В целом, задача структурного синтеза механизма манипулятора сводится к проектированию структурной схемы его исполнительного механизма (W, n, i, p_i). Решение задачи структурного анализа и синтеза механизмов, как правило, осуществляется в два этапа [158]:

1. Генерация всех возможных кинематических цепей в соответствии с заданными условиями.
2. Отбор работоспособных механизмов из ряда полученных комбинаций структур.

Задача структурного синтеза механизмов, это целочисленная задача, а как доказал еще в 1970 г. математик Матияевич Ю.В., общего способа целочисленного решения диофантовых уравнений за конечное число шагов не существует [175]. К тому же, рациональные результаты решения задач структурного синтеза должны быть представлены не только в виде целых чисел, но и целых положительных.

Анализ исследований показывает, что в подавляющем большинстве задачи структурного синтеза чаще всего решаются вариационными методами с помощью алгоритмов с итерационными процедурами. Этот метод отличается простотой постановки и реализации, и приемлем лишь для несложных механизмов с малым числом подвижных звеньев и кинематических пар. В противном случае решение

может быть представлено огромным количеством вариантов, большинство из которых будут просто выбракованы из-за невозможности сборки работоспособного механизма. При этом для проверки вариантов на работоспособность синтезированных механизмов могут использоваться как методы графов, так и матричные методы с составлением матриц смежности и инцидентности, что является довольно трудоемкой и монотонной работой [139].

Величина рабочего объёма манипулятора в значительной степени зависит от кинематической структуры манипулятора [220], точность позиционирования манипуляторов определяется их структурой (числом, типом и порядком расположения кинематических пар) и значением обобщённых координат [189].

1.4.2. Кинематические параметры манипуляторов на базе трипода

Зона обслуживания является важнейшей кинематической характеристикой погрузочного манипулятора. Как правило, зона обслуживания задаётся через максимальные значения линейных и угловых координат перемещения рабочего органа (груза) погрузочного манипулятора. Однако, как утверждается в работе [168] максимальных значений координат недостаточно для учёта реальных перемещений в пределах зоны действия манипулятора и не определяется характер изменения площадей объёмов обслуживания манипулятором.

Объём зоны обслуживания погрузочного манипулятора полностью определяется кинематическими параметрами исполнительного механизма. Практика применения погрузочных манипуляторов в производстве показывает, что эффективность их зависит от зоны обслуживания.

Продолжительность цикла операции [173] и затраты энергии определяются траекторией движения перемещаемого груза.

С точки зрения технологических процессов грузопереработки в АПК формализацию рабочей зоны обслуживания погрузочного манипулятора можно разделить на несколько этапов:

- Анализ технологических схем погрузки-разгрузки штучных грузов на объектах АПК.
- Ограничения на перемещения отдельных звеньев погрузочного манипулятора.
- Структурный синтез и анализ исполнительного механизма.
- Оптимизация параметров манипулятора по критериям, удовлетворяющим большинству погрузочно-разгрузочных технологических процессов.

Особое значение следует уделять ограничениям, накладываемым на зону обслуживания, которые можно разделить на ограничения, накладываемые подвижностью кинематических пар и ограничения в виде препятствий - производственных объектов. Причем препятствия могут быть как стационарными (колонны и стены складов и ангаров), так и не стационарными по времени (мобильные средства, штабеля).

Оптимизация кинематических параметров манипуляторов параллельной структуры, как правило, приводит к множеству решений, и не все кинематические параметры в одинаковой степени влияют на показатели качества. Особенностью поиска оптимальных параметров пространственных манипуляторов является большое число оптимизируемых параметров, нелинейность, наличие локальных и глобальных экстремумов [243, 244].

Для пространственных l -координатных механизмов в некоторых случаях хотя и удается находить аналитические решения, но в большинстве случаев задачу нелинейной многомерной оптимизации приходится решать итерационными методами. Для погрузочных манипуляторов одной из основных характеристик является зона обслуживания, поэтому желательно оптимизировать параметры манипулятора исходя из условия обеспечения максимальной площади рабочего пространства при заданных ходах линейных приводов.

Теоретическая зона возможных перемещений для манипуляторов на мобильном шасси может складываться из трех движений, а именно:

- за счет изменения длин звеньев переменной длины;

- поворота основания;
- за счет перемещения самого шасси в продольном направлении.

Далее рассмотрены региональные движения манипулятора для геометрического и кинематического обоснования структуры и параметров манипуляторов, обеспечивающих максимальную зону рабочего пространства. Следует отметить, что рабочая зона – пространство, в котором может находиться рабочий орган и элементы конструкции манипулятора, зона обслуживания – пространство, в котором рабочий орган выполняет функции в соответствии с технологической операцией [114].

В работе [264] приведены результаты исследования на компьютерной модели расчёта зоны обслуживания пространственного манипулятора с гибким подвесом, в результате которых получено, что относительная величина зоны обслуживания составляет 92,6% от общего объёма зоны действия.

В работах [157, 170, 224, 227] рассматривались вопросы расширения зоны обслуживания пространственных исполнительных механизмов погрузочных манипуляторов. Как отмечается в работе [233]: «...выбор параметров пространственных механизмов, обеспечивающих заданную зону обслуживания, представляет определённые сложности в тех случаях, когда накладываются дополнительные требования по оптимальности».

Точность позиционирования манипуляторов определяется их структурой и значением обобщённых координат. Наиболее высокая точность позиционирования в положениях звеньев с минимальным изменением обобщённых координат, при наибольших вылетах рабочего органа точность позиционирования уменьшается в 2 и более раза.

В работе [341] моделируется рабочее пространство параллельного плоского манипулятора с двумя степенями подвижности, но данная методика применима и для определения сечений зоны обслуживания пространственного манипулятора координатными плоскостями. Визуализация зоны обслуживания пространственного манипулятора возможна в различных средах математического проектирования, например, в пакетах *Mathcad*, *Matlab* и др. [171, 324].

Выявление характера изменения площадей обслуживания погрузочным манипулятором горизонтальных (или вертикальных) сечений позволяет оптимально выбрать такие конструктивные параметры, как расположение средней точки зоны обслуживания относительно опор манипулятора.

Сечения зоны обслуживания погрузочного манипулятора дают ее качественную и количественную характеристику, являющуюся исходным материалом для проектирования систем дистанционного управления [168].

Площадь зоны действия плоских манипуляторов может определяться путем последовательного суммирования и вычитания площадей геометрических фигур, образующих зону действия манипулятора.

Если граница фигуры сечения зоны обслуживания задана параметрическими уравнениями $x=x(t)$, $y=y(t)$, то площадь фигуры вычисляется по формуле

$$S = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} (xy' - yx') dt \quad (1.6)$$

где, α и β – значения параметра t , соответствующие началу и концу обхода контура в положительном направлении (при котором фигура остается слева).

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

Для сравнительной оценки рабочих возможностей различных манипуляторов используется понятие среднего коэффициента сервиса, вычисляемого для всей рабочей зоны, по всему ее объему V [44, 143, 232]

$$K_{\Theta} = \frac{1}{V} \int_V K_v dV \quad (1.7)$$

Коэффициент сервиса характеризует качественную оценку кинематических свойств погрузочного манипулятора и в некоторых случаях может выступать критерием синтеза манипуляторов при выборе структурной схемы [143].

Известно [259], что величина телесного угла ψ определяется отношением площади сферы, врезанной телесным углом, к квадрату радиуса сферы, поэтому максимальное значение телесного угла $\psi_{\max} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi$, стерadians. Отношение $\frac{\psi}{\psi_{\max}} = \Theta$ - есть коэффициент сервиса, который может изменяться от 0 до 1 для манипуляторов, действующих в ангулярной системе координат.

Выводы по главе

Как показывает анализ, в сервисных роботах и манипуляторах для сельского хозяйства, перерабатывающей промышленности, строительства, коммунального хозяйства и других сфер производственной деятельности наибольшее распространение нашли погрузочные манипуляторы со степенью подвижности манипуляционного механизма от $W=3$ и выше, работающие в ангулярной системе координат, скорость захватного устройства (исполнительного звена) которого, как правило, составляет до 0,5 м/с.

Анализ технологических процессов в сельскохозяйственном производстве, перерабатывающей промышленности и др. показывает, что значительный объём операций можно выполнять с помощью манипуляторов, где движение захвата обеспечивается механизмом в виде трипода, в котором обеспечивается пересечение в одной точке геометрических осей исполнительных звеньев, что исключает появление в механизме манипулятора изгибающих моментов от приложенных нагрузок на выходное звено - захват.

Объединение достоинств параллельных манипуляторов и манипуляторов с открытыми кинематическими цепями на основе агрегатно-модульного построения позволяет увеличить зону действия манипуляторов параллельно-последовательной структуры в базовой плоскости.

На настоящее время так и не существует окончательно сформулированной теории, которая позволяла бы эффективно проводить синтез механизмов параллельной и параллельно-последовательной структуры для заданных целей.

Анализ исследований показывает, что в подавляющем большинстве задачи структурного синтеза чаще всего решаются вариационными методами с помощью алгоритмов с итерационными процедурами. Этот метод отличается простотой постановки и реализации, но решение может быть представлено огромным количеством вариантов, большинство из которых будут просто выбракованы из-за невозможности сборки работоспособного механизма. Следовательно, актуальным является ограничение области поиска рациональных структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры.

Для погрузочных манипуляторов одной из основных характеристик является зона обслуживания, поэтому желательно оптимизировать параметры манипулятора исходя из условия обеспечения максимальной площади рабочего пространства при заданных ходах линейных приводов.

Ручное управление погрузочными манипуляторами параллельно-последовательной структуры при отработке заданных прямолинейных и криволинейных траекторий затруднено и малоэффективно, следовательно, необходима разработка систем управления, реализующих в автоматическом режиме перемещение выходного звена манипулятора по заданным конфигурации, траектории и законам, которые в свою очередь обеспечивали бы наиболее благоприятный режим работы приводных двигателей исполнительных механизмов.

2. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА БАЗЕ ТРИПОДОВ

Разработанные и спроектированные на кафедре «Механика» погрузочные манипуляторы параллельно-последовательной структуры, на основе манипуляторов - триподов [1, 2, 3, 4, 157, 170, 199, 200, 201, 202, 203, 205, 225], в механизмах которых геометрические оси трех исполнительных приводов сходятся в одной точке посредством универсального шарнирного узла, исследовались достаточно подробно. Проводился геометрический, кинематический и силовой анализ [54, 55-57, 59-63, 66, 69, 157, 170, 184, 224, 226, 227, 233, 254]. Однако структурному анализу и синтезу таких манипуляторов до последнего времени не уделялось должного внимания.

Следует отметить, что сложность системы управления таким манипулятором будет зависеть от программных траекторий исполнительного (выходного) звена манипулятора и от законов изменения обобщенных координат, что в свою очередь зависит от подвижности кинематических пар.

Структурный анализ и декомпозиция механизма на структурные группы значительно упрощает его геометрическое, кинематическое и динамическое исследование.

2.1. Структурный анализ манипуляторов-триподов

Структурный анализ манипулятора – трипода проведён из условий реализации требуемых движений, с кинематическими парами V, VI и III классов. Рассмотрены несколько вариантов шарнирных узлов в местах крепления звеньев переменной длины к стойке и в точке геометрического пересечения осей исполнительных звеньев переменной длины (актуаторов) трипода.

На рисунке 2.1, а) представлен грузоподъёмный кран [4], представляющий собой манипулятор – трипод. Кран предназначен для установки на транспортные средства, грузовые автомобили, прицепы, используемые для самостоятельной

погрузки и разгрузки. Корпусы гидроцилиндров 1, 3, 5 опираются на основание с помощью сферических шарниров, а штоки шарнирно соединены к головной траверсе укосины 7. Число подвижных звеньев манипулятора $n=7$, число степеней подвижности для выходного звена 7 при $p_5=6$, $p_3=3$ равно

$$W=6n-5p_5-4p_4-3p_3=6\cdot 7-5\cdot 6-3\cdot 3=3. \quad (2.1)$$

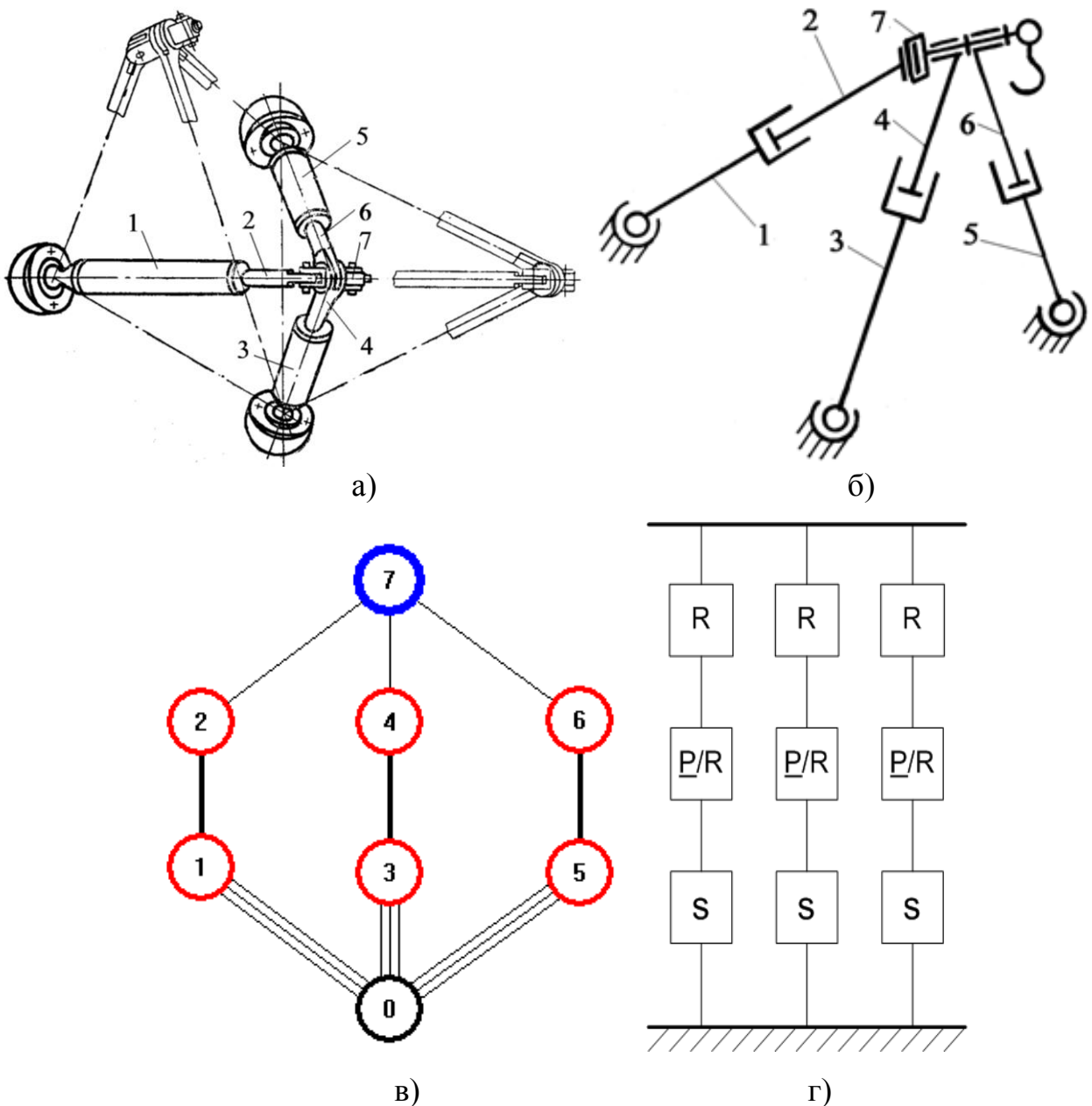


Рисунок 2.1. – Грузоподъемный кран-манипулятор - трипод и варианты его структурного представления: а) эскиз; б) структурная схема; в) неориентированный граф механизма; г) топологическая схема

Для структурного анализа манипулятора-трипода применялись методы структурного представления в виде неориентированного графа (рис.2.1, в), топологической схемы (рисунок 2.1, г) [240].

Конструкция манипулятора-трипода, представленного на рисунке 2.1, а) не обеспечивает геометрическое пересечение осей исполнительных цилиндров в одной точке. Далее рассмотрены триподы с геометрическим пересечением осей симметрии исполнительных звеньев.

Один из вариантов исполнения манипулятора-трипода представлен на рисунок 2.2, у которого в местах крепления звеньев переменной длины к стойке установлены сферические шарниры. Количество степеней подвижности для выходного звена 5 такого манипулятора, при числе подвижных звеньев $n=10$, количестве одноподвижных пар V класса $p_5=9$ и трехподвижных $p_3=2$

$$W=6n-5p_5-4p_4-3p_3=6\cdot 10-5\cdot 9-4\cdot 2=3. \quad (2.2)$$

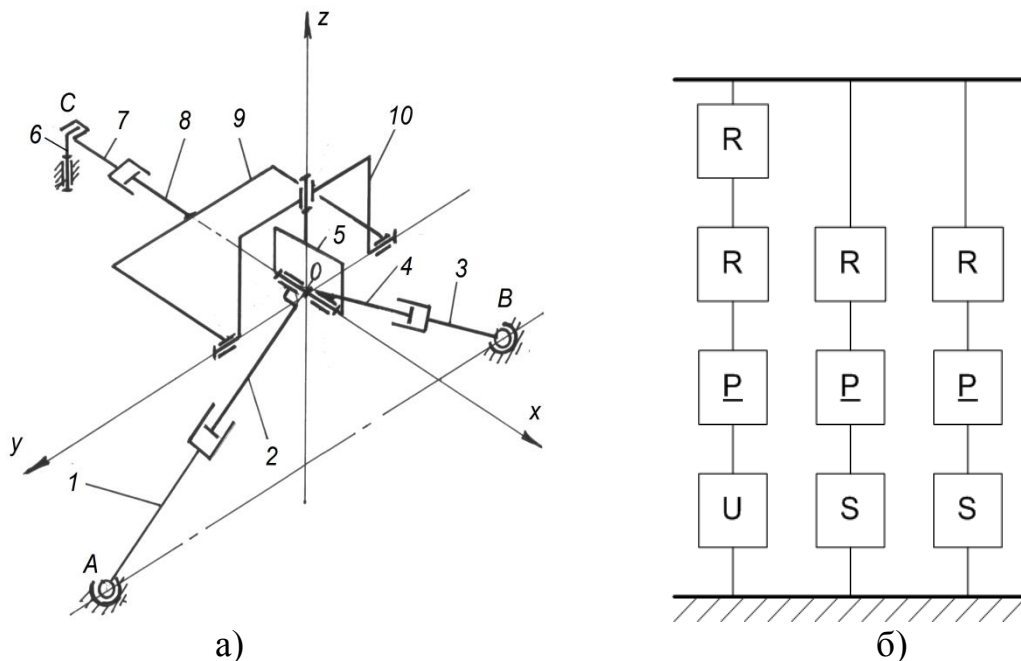


Рисунок 2.2 – Манипулятор - трипод с кинематическими парами V и III класса: а) структурная схема; б) топологическая схема

Схема манипулятора - трипода, в котором обеспечивается геометрическое пересечение осей исполнительных цилиндров в одной точке посредством универсального четырёхподвижного шарнирного узла, представлена на рисунке

2.3. В данном случае в манипуляторе используются только кинематические пары V класса. Степень подвижности выходного звена 10 манипулятора при числе подвижных звеньев равна $n=11$ и количестве одноподвижных пар V класса $p_5=13$

$$W=6n-5p_5-4p_4-3p_3=6\cdot 11-5\cdot 13=1. \quad (2.3)$$

Степень подвижности равная $W=1$ указывает на присутствие избыточных кинематических связей. Принимаем, что одноподвижные кинематические пары 2-3, 5-6 и 8-9 поступательные (исполнительными звеньями в таком случае могут служить электромеханические линейные привода).

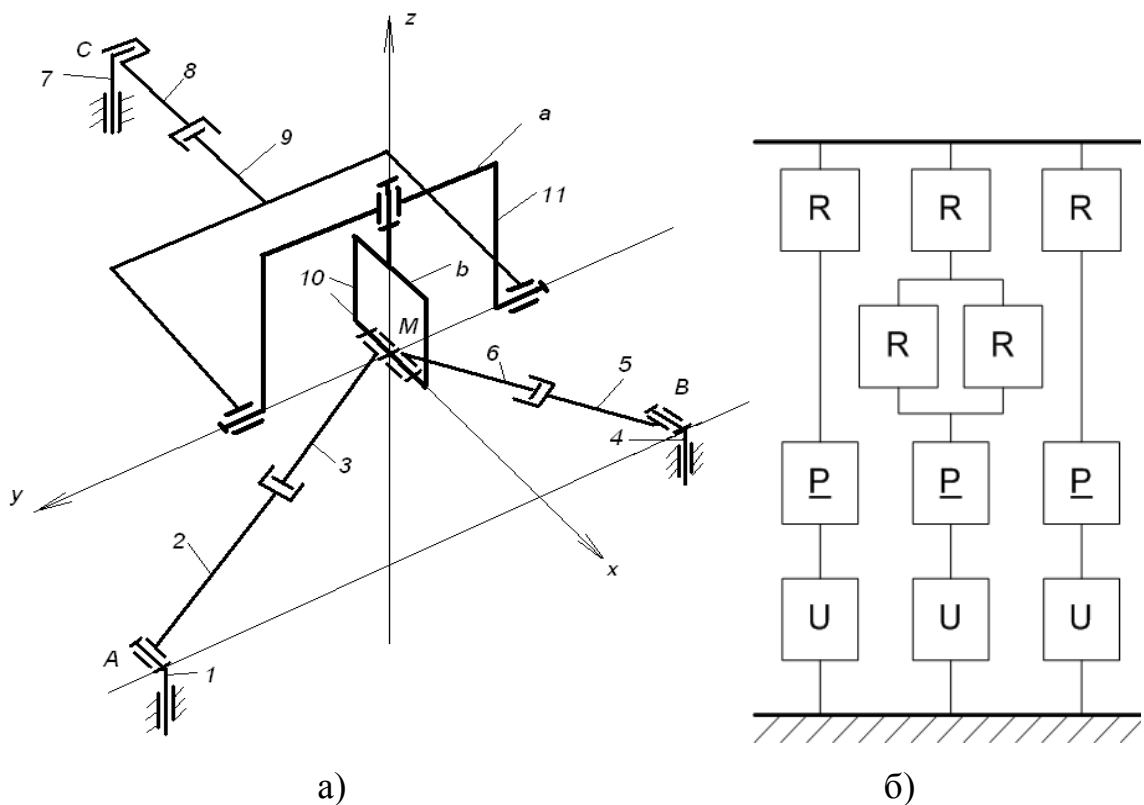


Рисунок 2.3 – Манипулятор - трипод с одноподвижными кинематическими парами V класса: а) структурная схема; б) топологическая схема

Механизм манипулятора-трипода с кинематическими парами только V класса можно представить, как квазиплоский в плоскости xOy декартовой системы координат, при этом топологические схемы значительно облегчают задачу построения квазиплоских схем механизмов манипуляторов. Такие манипуляции с построением квазиплоских схем пространственных механизмов и

обратным переходом от квазиплоского представления к пространственной схеме, полезны при неоднозначном определении степеней подвижности выходного звена. Например, для схемы (рисунок 2.3) по такой методике в работах [59, 65, 67], выполненных в соавторстве с автором настоящей работы, решена задача исключения избыточных связей.

В результате, введение дополнительных подвижностей в шарнирные узлы позволяет получить степень подвижности $W=3$.

В третьем варианте манипулятора-трипода с кинематическими парами V и III класса сферический шарнир установлен непосредственно на выходном звене (рисунок 2.4), конструкция которого обеспечивает геометрическое пересечение осей звеньев линейного перемещения в одной точке.

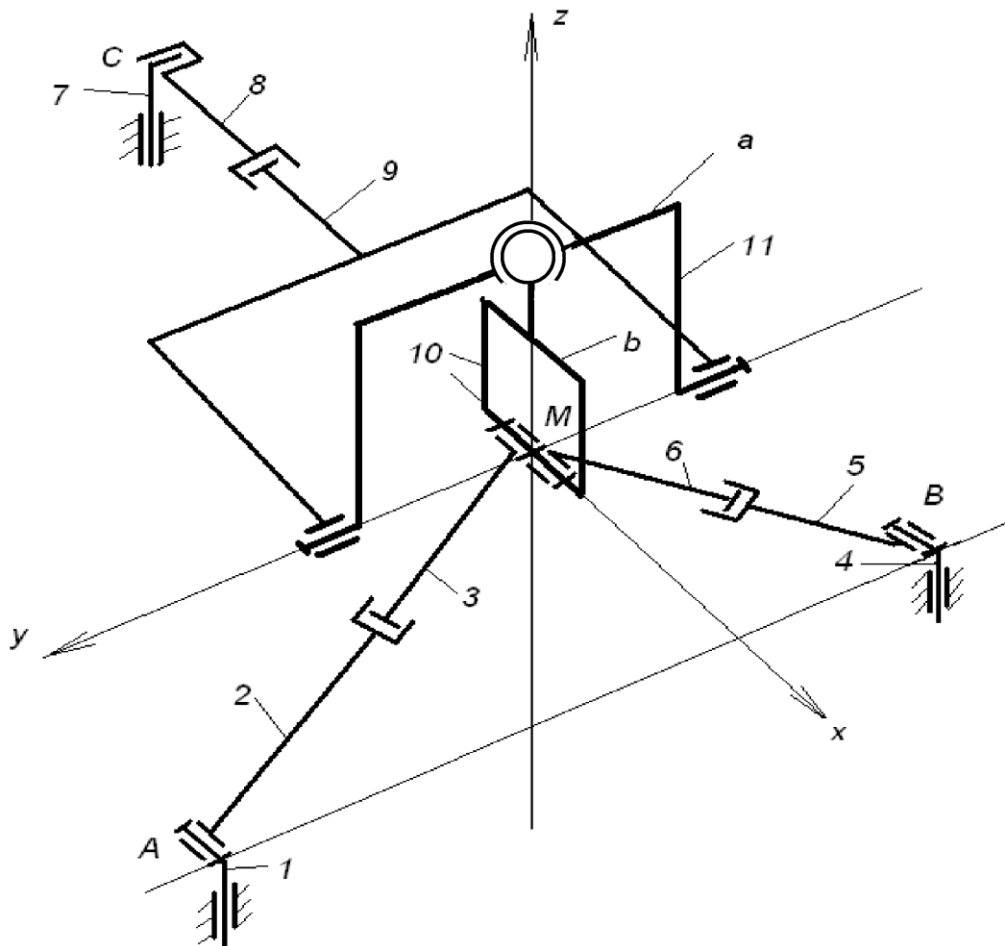


Рисунок 2.4, а) – Структурная схема манипулятора - трипода с кинематическими парами V и III класса с универсальным сферическим шарниром

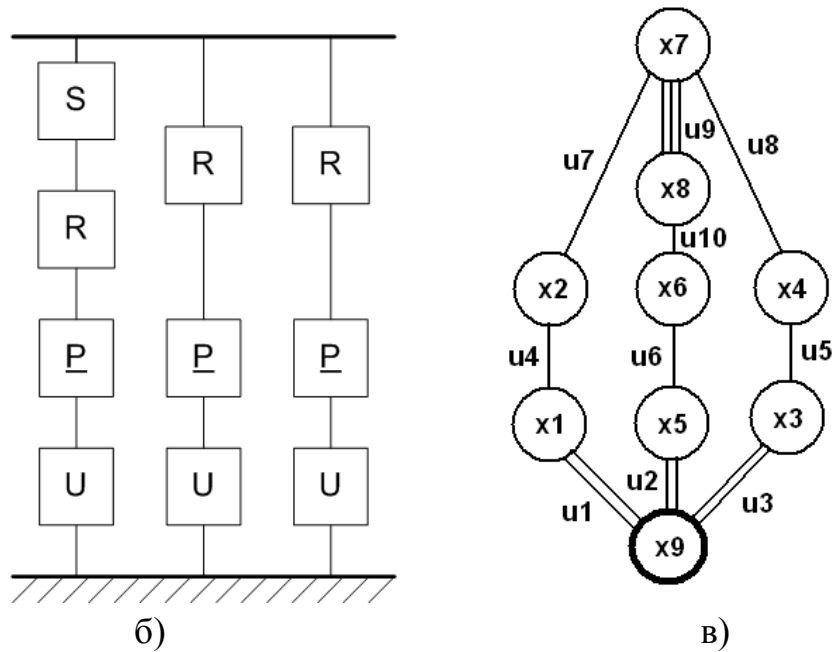


Рисунок 2.4, б-в) – Манипулятор - трипод с кинематическими парами V и III класса с универсальным сферическим шарниром: б) топологическая схема; в) структурный граф механизма

При этом степень подвижности выходного звена 10 манипулятора при числе подвижных звеньев $n=11$ и количестве одноподвижных пар V класса $p_5=12$ и трехподвижных $p_3=1$

$$W=6n-5p_5-4p_4-3p_3=6 \cdot 11-5 \cdot 12-3 \cdot 1=3. \quad (2.4)$$

Для проверки существования манипулятора-трипода (рисунок 2.4) составлены матрицы смежности (2.5) и инцидентности (2.6) [139].

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
x1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
x2	1	0	0	0	0	0	1	0	0
x3	0	0	0	1	0	0	0	0	2
x4	0	0	1	0	0	0	1	0	0
x5	0	0	0	0	0	1	0	0	2
x6	0	0	0	0	1	0	0	3	0
x7	0	1	0	1	0	0	0	1	0
x8	0	0	0	0	0	3	1	0	0
x9	2	0	2	0	2	0	0	0	0

(2.5)

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}
x_1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
x_2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
x_3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
x_4	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
x_5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
x_6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
x_7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
x_8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
x_9	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0

(2.6)

Условием существования механизма является симметричность матрицы смежности (2.5) относительно главной диагонали.

Матрица инцидентности составлена на основе графа (рисунок 2.4, в), где u_i – ребра графа, x_i – вершины графа. Для выполнения условия существования механизма сумма членов каждого столбца матрицы инцидентности (2.6) должна равняться двум. Как видно, это условия выполняется. Аналогичными построениями матриц смежности и матриц инцидентности проверялись на существование все схемы манипуляторов-триподов.

В процессе структурного анализа манипуляторов - триподов с кинематическими парами различного класса в его сочленениях, выявлен ряд закономерностей. Например, определена зависимость количества кинематических пар V класса (Σp_5) от числа подвижных звеньев n при $W=3$ (рисунок 2.5). Область существования триподов ограничена прямыми $\Sigma p_5=n-1$ и $\Sigma p_5=(5n-17)/6$.

Зависимость количества кинематических пар V класса (Σp_5) от числа подвижных звеньев n манипулятора-трипода при $W=3$ позволяет формировать ограничения при синтезе манипуляторов-триподов, тем самым заранее исключая нерациональные варианты механизмов.

Под рациональными механизмами понимаются механизмы без лишних подвижностей и избыточных связей, имеющие из всех возможных вариантов наименьшее число подвижных звеньев при заданной степени подвижности выходного звена.

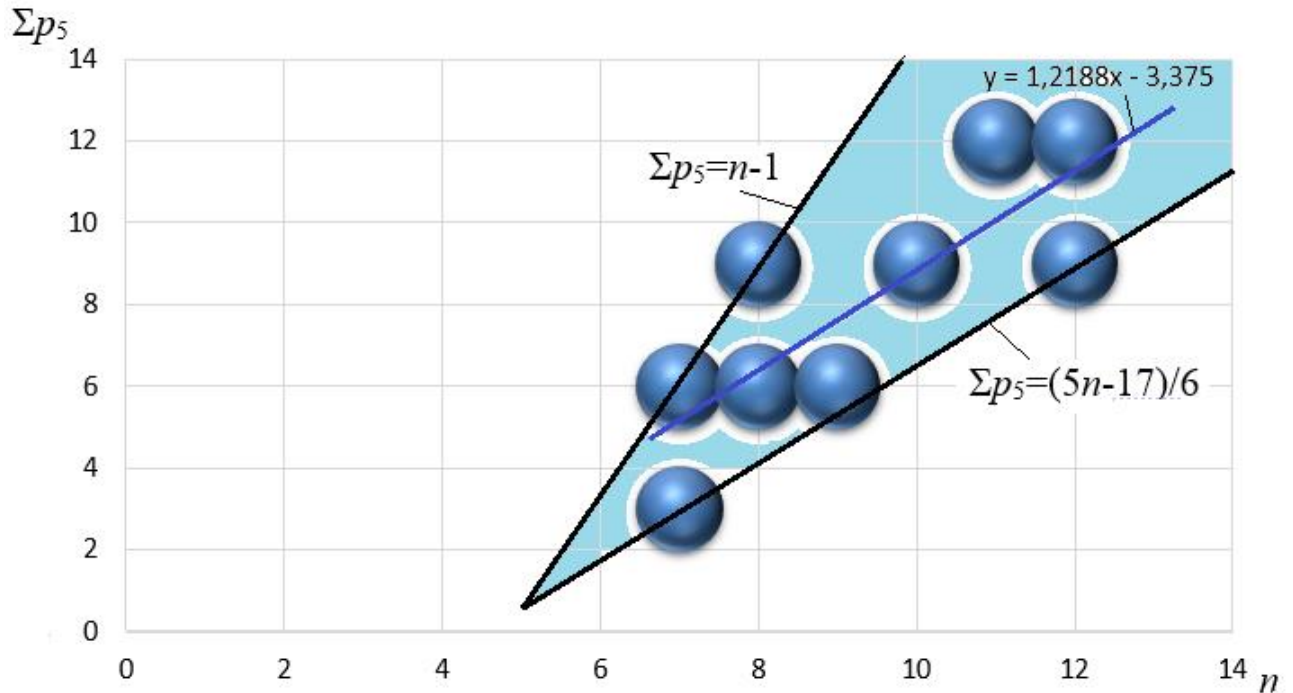


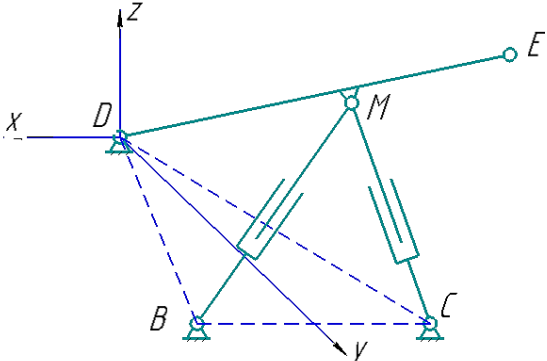
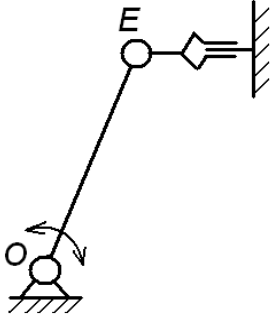
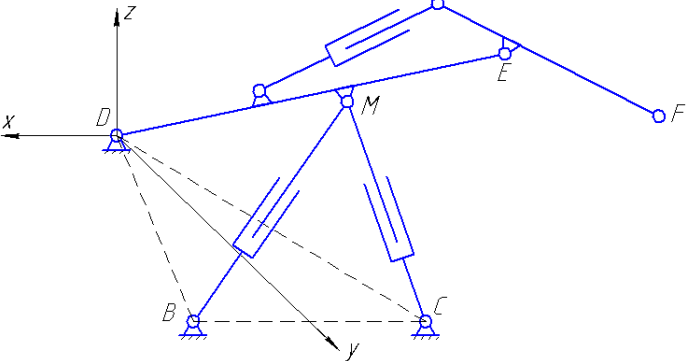
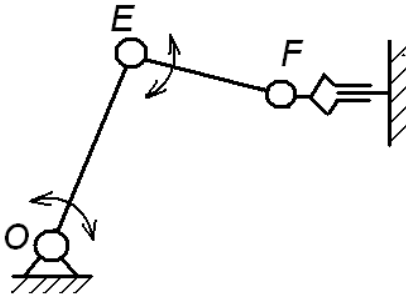
Рисунок 2.5 – Зависимость количества кинематических пар V класса Σp_5 от числа подвижных звеньев n при $W=3$

2.2. Эволюция кинематических схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода

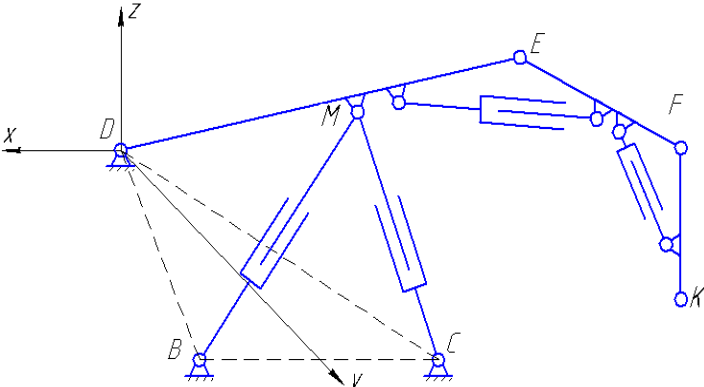
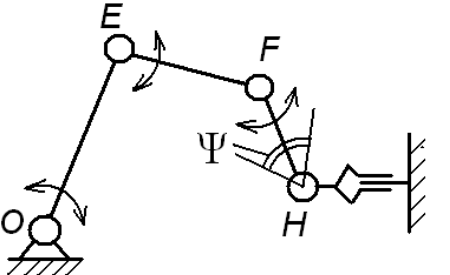
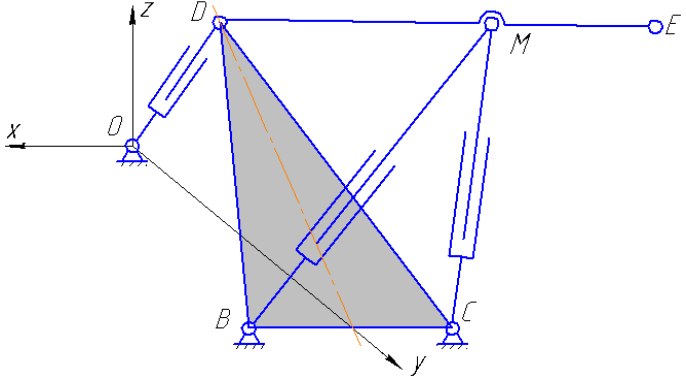
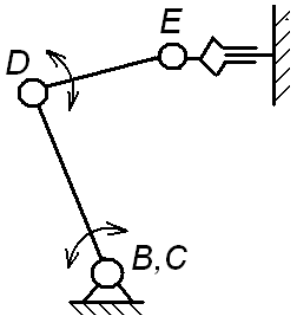
На основе блочно-модульного подхода представлена эволюция кинематических схем параллельно-последовательных манипуляторов, рассмотрены возможные компоновочные схемы манипуляторов параллельной, параллельно – последовательной, параллельно-перекрестной, неполнопараллельно – последовательной структур и их возможных комбинаций, построенных на базе трипода (таблица 2.1).

Таблица 2.1

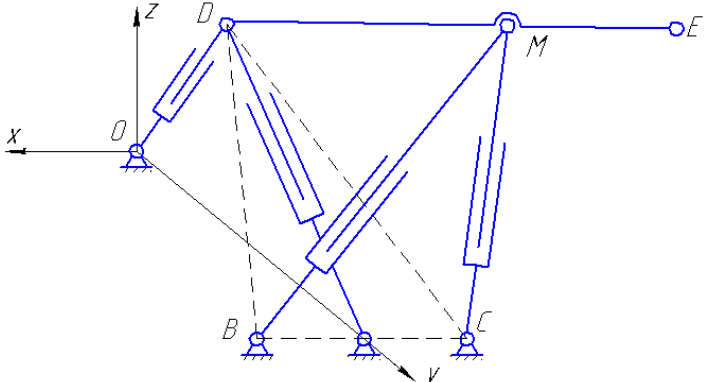
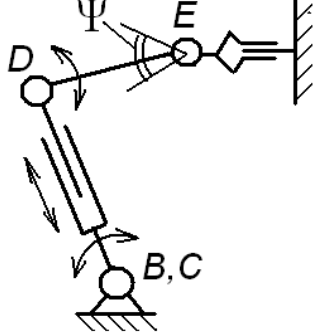
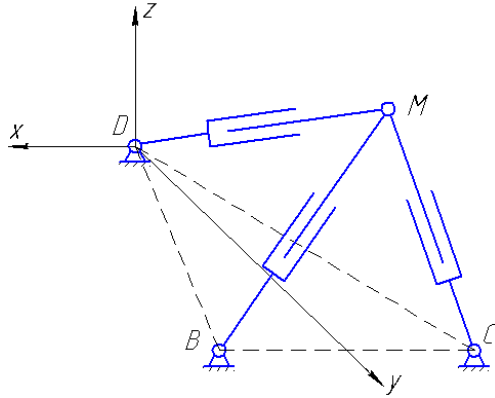
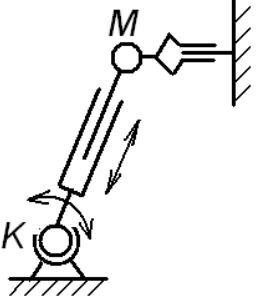
Эволюция кинематических схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры

№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная квазиплоская схема к определению маневренности манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
1		<p>Неполнопараллельный $W=2$ $m_{\sigma}=0$ $n_{min}=5$ $\Sigma p_{imin}=7$</p>		<p>$\psi = 0$</p>
2		<p>Неполнопараллельно- последовательный $W=3$ $m_{\sigma}=0$ $n_{min}=8$ $\Sigma p_{imin}=11$</p>		<p>$\psi = 0$</p>

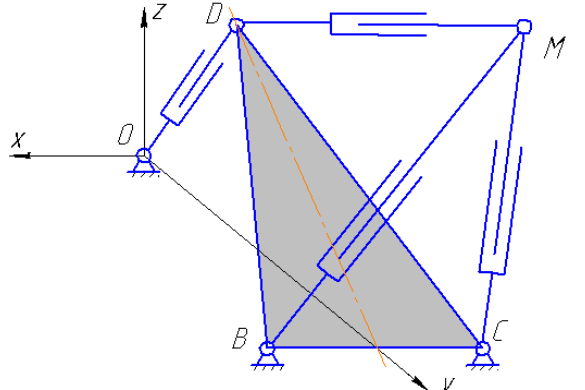
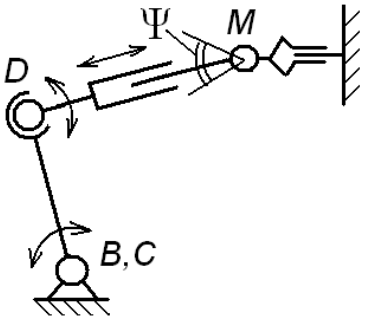
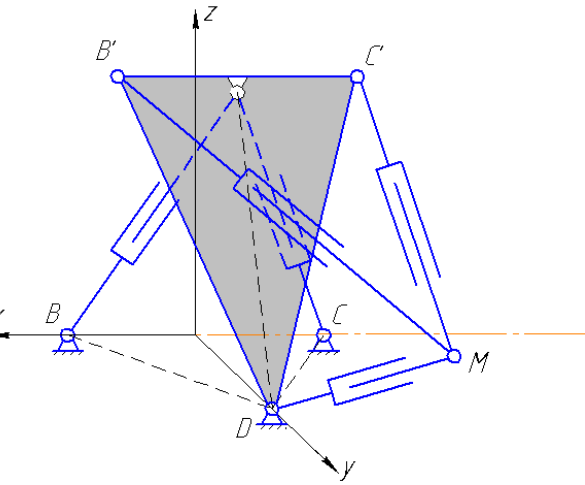
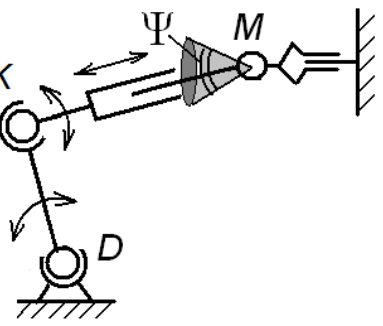
Продолжение таблицы 2.1

№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная квазиплоская схема к определению маневренности манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
3		<p>Неполнопараллельно-последовательный $W=4$ $m_6=1$ $n_{min}=11$ $\Sigma p_{imin}=15$</p>		$0 < \psi < 2\pi$, ψ , радиан
4		<p>Неполнопараллельно-последовательный $W=3$ $m_6=0$ $n_{min}=8$ $\Sigma p_{imin}=11$</p>		$\psi=0$

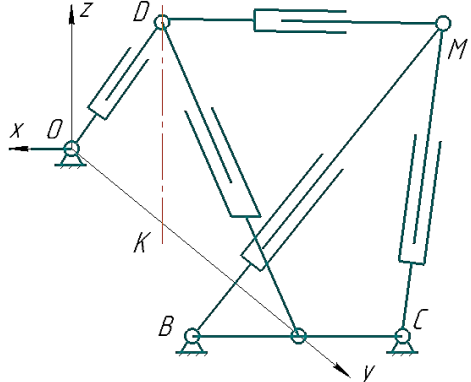
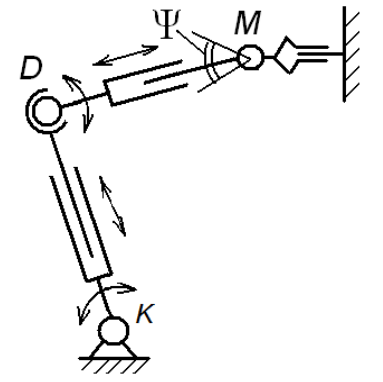
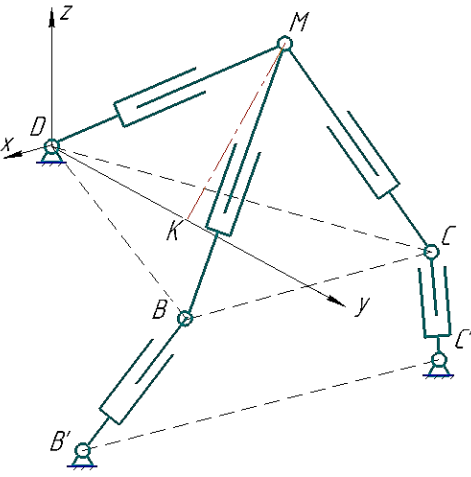
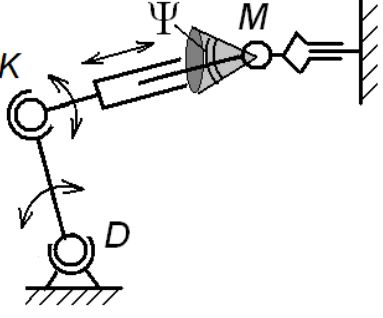
Продолжение таблицы 2.1

№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная квазиплоская схема к определению маневренности манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
5		<p>Неполнопараллельно-перекрестно-последовательный $W=4$ $m_6=1$ $n_{min}=9$ $\Sigma p_{imin}=12$</p>		$0 < \psi < 2\pi$, ψ , радиан
6		<p>Параллельный $W=3$ $m_6=0$ $n_{min}=6$ $\Sigma p_{imin}=8$</p>		$\psi=0$

Продолжение таблицы 2.1

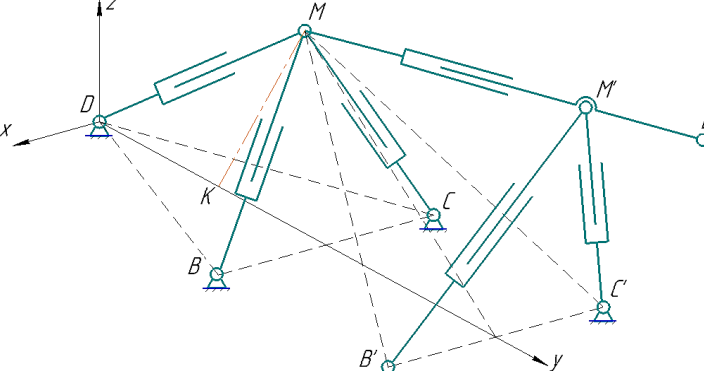
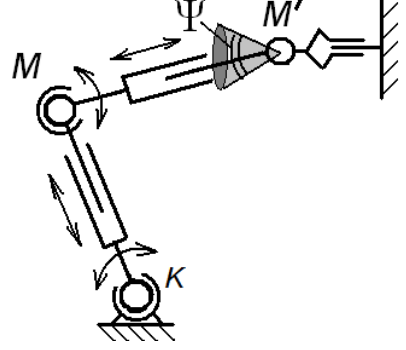
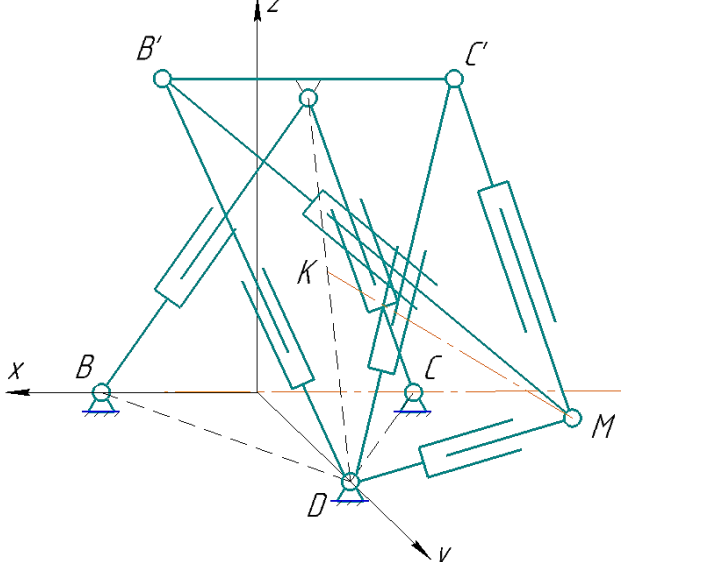
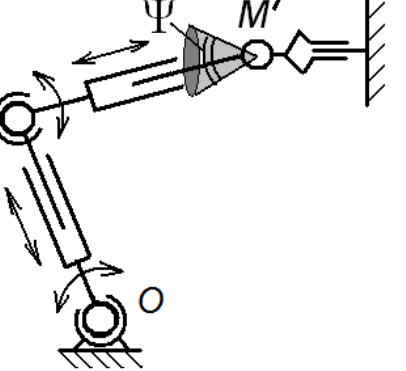
№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная квазиплоская схема к определению маневренности манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
7		<p>Параллельно-последовательный $W=4$ $m_6=1$ $n_{min}=9$ $\Sigma p_{imin}=12$</p>		<p>$0 < \psi < \pi$, ψ, радиан</p>
8		<p>Параллельный комбинированный $W=5$ $m_6=2$ $n_{min}=11$ $\Sigma p_{imin}=15$</p>		<p>$0 < \psi < 4\pi$, ψ, стерадиан</p>

Продолжение таблицы 2.1

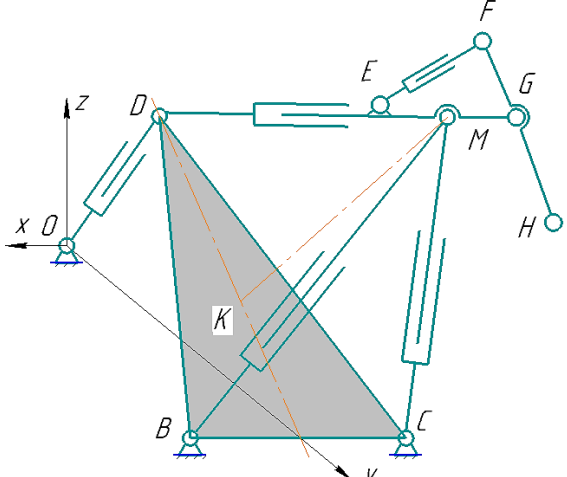
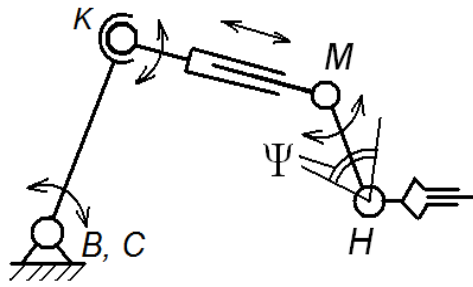
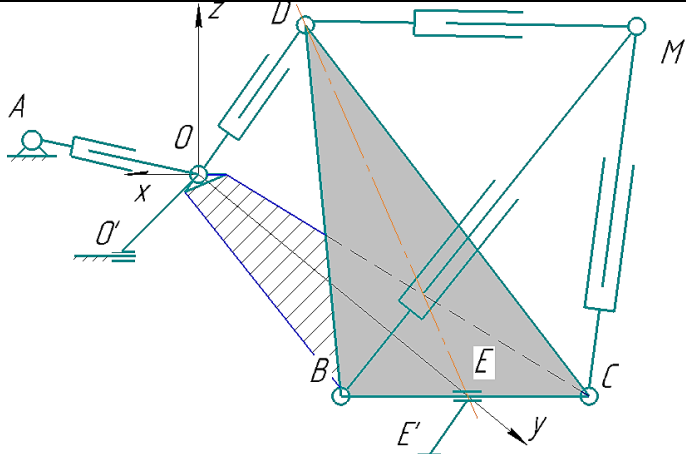
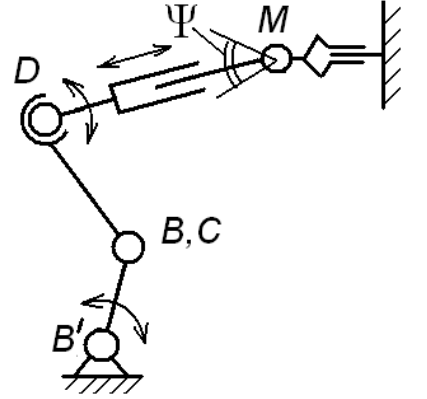
№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная квазиплоская схема к определению маневренности манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
9		<p>Параллельно-последовательно-перекрестный $W=5$ $m_6=2$ $n_{min}=10$ $\Sigma p_{imin}=13$</p>		<p>$0 < \psi < 2\pi$, ψ, радиан</p>
10		<p>Параллельный комбинированный $W=5$ $m_6=2$ $n_{min}=11$ $\Sigma p_{imin}=15$</p>		<p>$0 < \psi < 4\pi$, ψ, стерадиан</p>

Продолжение таблицы 2.1

№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная квазиплоская схема к определению маневренности манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
11		<p>Неполнопараллельный комбинированный $W=4$ $m_6=0$ $n_{min}=10$ $\Sigma p_{imin}=14$</p>		<p>$\psi=0,$</p>
12		<p>Параллельный комбинированный $W=5$ $m_6=1$ $n_{min}=11$ $\Sigma p_{imin}=15$</p>		<p>$0 < \psi < 4\pi,$ $\psi,$ стерадиан</p>

№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная квазиплоская схема к определению маневренности манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
13		<p>Параллельный комбинированный $W=6$ $m_6=2$ $n_{min}=12$ $\Sigma p_{imin}=16$</p>		<p>$0 < \psi < 4\pi$, ψ, стерадиан</p>
14		<p>Параллельно- перекрестный комбинированный $W=7$ $m_6=2$ $n_{min}=15$ $\Sigma p_{imin}=20$</p>		<p>$0 < \psi < 4\pi$, ψ, стерадиан</p>

Продолжение таблицы 2.1

№ схемы	Структурная схема	Описание, значение основных параметров	Эквивалентная схема к маневренности квазиплоская определению манипулятора в плоскости симметрии	Угол сервиса
15		<p>Параллельно-последовательный $W=5$ $m_6=2$ $n_{min}=12$ $\Sigma p_{imin}=17$</p>		<p>$0 < \psi < 2\pi$, ψ, радиан</p>
16		<p>Параллельно-последовательный $W=5$ $m_6=2$ $n_{min}=14$ $\Sigma p_{imin}=19$</p>		<p>$0 < \psi < 2\pi$, ψ, радиан</p>

В основе всех предложенных и приведенных в таблице 2.1 компоновочных схем манипуляторов лежит трипод с различным числом степеней подвижности. Как видно из схем, параллельно-последовательные манипуляторы можно получить добавлением к триподу (схема 6, таблица 2.1) дополнительной подвижности или последовательной кинематической цепи. Добавление дополнительной подвижности в основании трипода позволяет создавать параллельно – перекрестные структуры. Неполнопараллельные манипуляторы получаются заменой изменяемого звена неизменяемым. Для каждой компоновочной схемы определены количество степеней подвижности W , маневренность манипулятора в базовой плоскости m_6 , для большинства компоновочных схем, проведен подробный структурный анализ.

Число степеней свободы W точки крепления захвата манипулятора относительно стойки определяется исходя из количества внутренних входов – звеньев переменной длины, являющихся обобщенными координатами манипулятора. Например, в схеме 5 число внутренних входов равно 4, соответственно число степеней подвижности равно $W=4$, аналогично определяется число степеней свободы точки крепления захвата для всех представленных схем.

С целью определения маневренности в базовой плоскости m_6 (в данном случае за таковую принята плоскость симметрии манипуляторов), для каждого рассматриваемого манипулятора составлена эквивалентная замещающая схема. Для определения кинематических характеристик манипулятора - трипода с пространственным механизмом, таких как маневренность и манипулятивность, рассмотрен частный случай [112]. Например, манипулятор (рисунок 2.6, а) имеет в своем составе трипод, состоящий из звеньев l_1, l_2, l_3 , поворотное основание и звено переменной длины l_4 , за счет которого осуществляется поворот основания.

Из условия симметричности манипулятора относительно продольной оси и случая одновременного изменения длин l_2 и l_3 , заменим их на эквивалентное звено l_{23} , которое лежит в одной плоскости с l_1, l_4 и захватом M (рисунок 2.6, б).

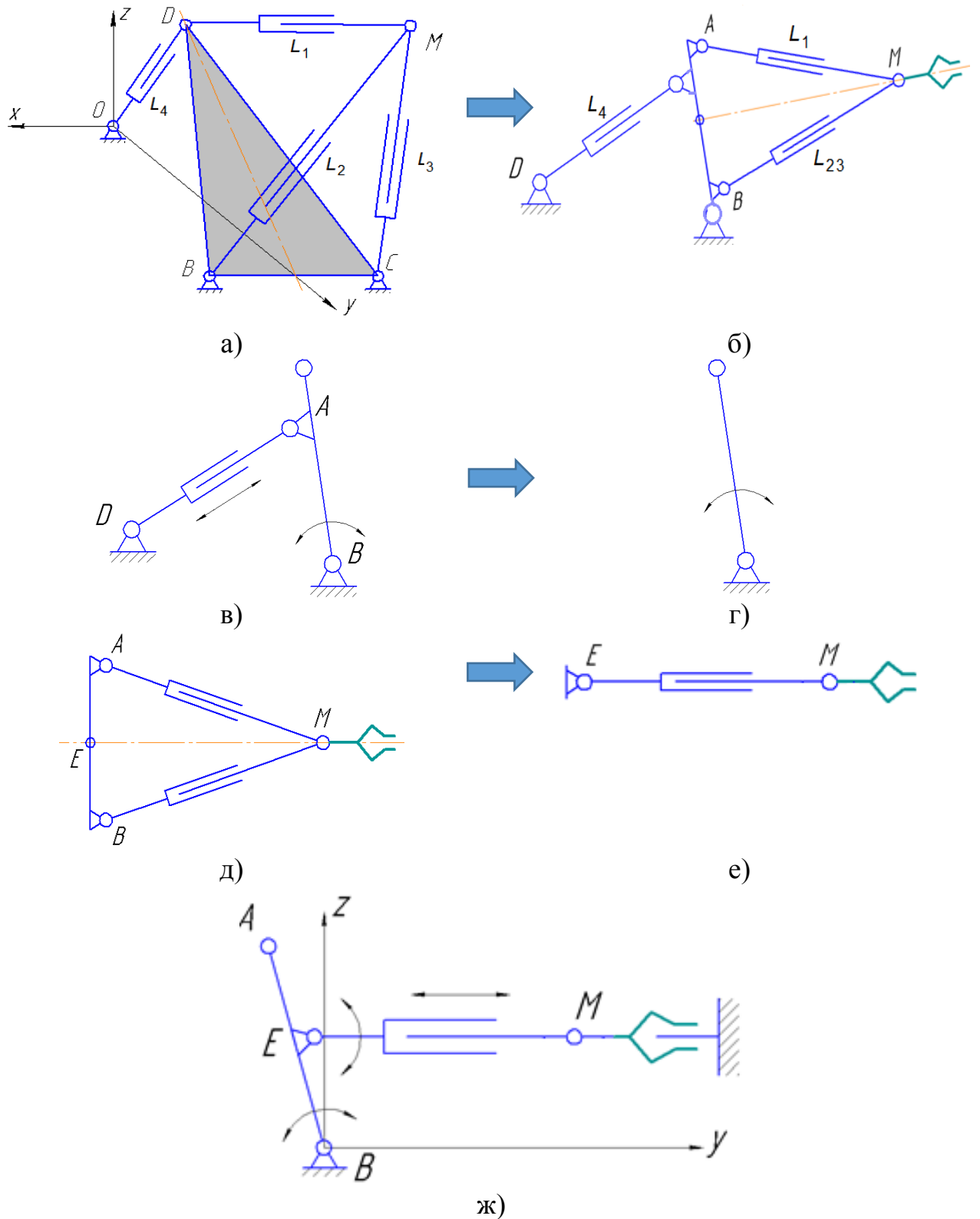


Рисунок 2.6– Квазиплоское представление манипулятора-трипода на подвижном основании к определению маневренности в плоскости симметрии

Механизм поворота основания манипулятора-трипода (рисунок 2.6, в) заменяется эквивалентным механизмом - поворотным основанием без

детализации привода поворота (рисунок 2.6, г). В свою очередь квазиплоское представление трипода в виде изменяемого треугольника ABM (рисунок 2.6, д) можно представить в виде телескопического звена с возможностью вращения относительно основания в т. E (рисунок 2.6, е). И наконец окончательно схему манипулятора (рисунок 2.6, а) можно представить в виде эквивалентного квазиплоского механизма в плоскости симметрии манипулятора (рисунок 2.6, ж).

Как следует из схемы (рисунок 2.6, ж), представляющей эквивалентную квазиплоскую схему манипулятора - трипода на подвижном основании, базовая маневренность согласно формуле Озола [18, 112]

$$m_{\delta} = \sum f_{\text{кп}} - 3 = 4 - 3 = 1, \quad (2.7)$$

где $f_{\text{кп}}$ - сумма степеней свободы кинематических пар, обеспечивающих движение в базовой плоскости.

Однако маневренность манипулятора в целом согласно формуле $m = \sum f_{\text{кп}} - 6$ не равна 1, как это определено ранее. Поэтому целесообразно определить манипулятивность [112] как

$$M = m - m_{\delta} = -1 - 1 = -2, \quad (2.8)$$

где $m = 5 - 6 = -1$.

Таким образом, при $M < 0$ и $m_{\delta} = 1 > 0$ манипулятор трипод на подвижном основании обладает маневренностью в базовой плоскости, но имеет ограниченную общую маневренность, т.е. не может обеспечить ряд положений захвата без дополнительной ориентации основания.

Такой же маневренностью $m_{\delta} = 1$ обладают манипуляторы, представленные на схемах 3, 5, 12 в таблице 2.1.

Аналогичным образом определяется маневренность в базовой плоскости и манипулятивность для других схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры. Ниже представлен пример схемы манипулятора (рисунок 2.7) с маневренностью в базовой плоскости равной $m_{\delta} = 2$.

Расчеты показывают, что из шестнадцати представленных в таблице 2.1 схем манипуляторов, маневренностью в базовой плоскости $m_{\delta} = 0$ обладают

только пять манипуляторов, маневренностью $m_6 = 1$ четыре манипулятора и маневренностью $m_6 = 2$ семь манипуляторов.

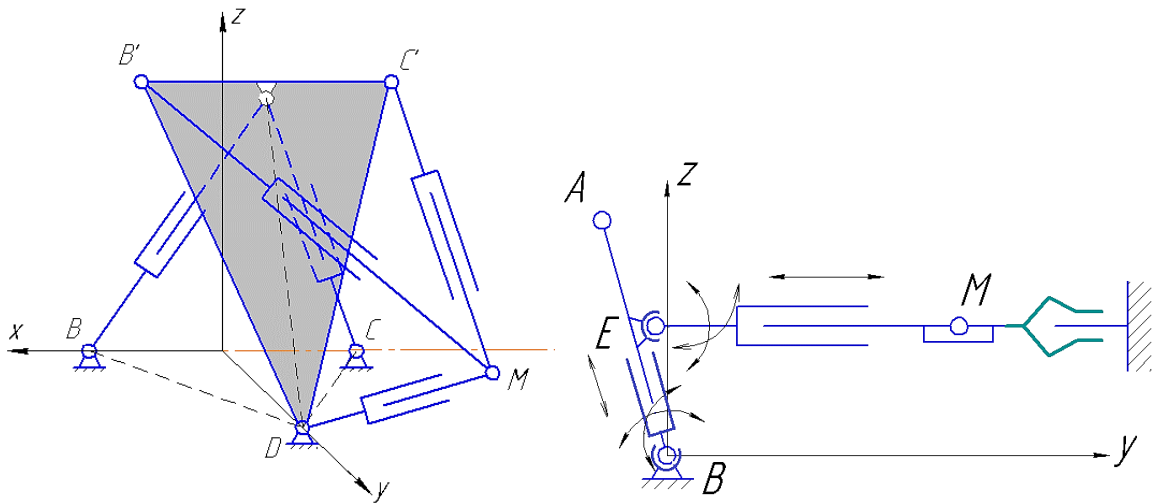


Рисунок 2.7 – Схема манипулятора и его квазиплоское представление с маневренностью в базовой плоскости $m_6 = 2$

Таким образом, показано, что из предложенных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода ненулевой маневренностью в базовой плоскости обладают большинство, вследствие чего задача позиционирования осложняется множеством возможных конфигураций механической системы.

Угол сервиса является одним из важных показателей манипуляторов. Для плоских механизмов манипуляторов используется угол сервиса в базовой плоскости, для пространственных – телесный угол сервиса. Например, у манипулятора по схеме 10, согласно его эквивалентной схеме, при закрепленном захвате, звено KM может совершать вращательные движения относительно точки M в базовой плоскости в пределах угла ψ – угла сервиса, за счет изменения длины с одновременным поворотом коромысла. Возможность плоского вращательного движения звена, к которому крепится захват, есть у манипуляторов построенного по схемам 3, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15 и 16. Реализация телесного угла сервиса возможно в схемах манипуляторов 8, 10, 12, 13 и 14 за счет подвижности выходного звена, к которому присоединен захват.

Очевидно, что в представленных схемах манипуляторов в силу их структурных особенностей, угол сервиса не превышает значения 2π , соответственно, коэффициент сервиса может принимать значения $0 < \theta < 0,5$.

Определение минимального количества подвижных звеньев n_{min} и числа кинематических пар Σp_{imin} необходимо для задания нижних границ поиска рациональных структурных строений манипуляторов параллельно-последовательной структуры.

Минимальное число подвижных звеньев манипулятора n_{min} определяется из соображения отсутствия пассивных связей и составных шарнирных узлов, при этом звенья переменной длины считаются за два звена. Например, согласно схеме 4, число внутренних входов – звеньев переменной длины равно 3, соответственно, это уже 6 звеньев, учитывая поворотное основание, получаем минимальное число подвижных звеньев равное 8. Аналогичным образом определено минимальное количество подвижных звеньев для манипуляторов всех представленных схем (Приложение 1).

При определении минимального количества кинематических пар III, IV, V классов, принимаем следующие допущения: для соединения двух звеньев достаточно одной кинематической пары, при соединении трех звеньев – две кинематические пары, при соединении четырех звеньев – три кинематические пары.

С учетом различных комбинаций соединений звеньев в пространственных механизмах манипуляторов количество кинематических пар различного класса тем больше, чем больше число степеней подвижности механизма и чем больше число подвижных звеньев.

В компоновочных схемах манипуляторов по таблице 2.1, можно выделить несколько групп:

1. На базе неполнопараллельного трипода (схемы 1, 2, 3, 4, 11).
2. На базе трипода параллельной структуры (схемы 6, 7, 8, 15, 16).
3. На базе трипода параллельно-перекрестной структуры (схемы 5 и 9).
4. Комбинированные манипуляторы на базе трипода (схемы 10, 12, 13, 14).

В дальнейшем наиболее подробно будет рассмотрена схема 7 (таблица 2.1) параллельно-последовательного манипулятора, имеющего степень подвижности $W=4$ и маневренность в базовой плоскости $m_6=1$, как наиболее обобщённый вариант компоновок, из которого без особых преобразований получаются схемы подавляющего большинства манипуляторов этого семейства.

В процессе проведённого многочисленного структурного анализа пространственных механизмов параллельной структуры, включая компоновочные схемы таблица 2.1, при известных числе, подвижных звеньев n и числе кинематических пар p_i i -ой подвижности, определялись количество степеней подвижности W , сумма подвижностей f_Σ , число независимых контуров Гохмана k , число избыточных связей q по О.Г. Озолу и А.П. Малышеву, лишние подвижности η и число нормальных кинематических цепей n_c [72, 108, 240, 343]. Для автоматизации процедуры структурного анализа разработан алгоритм, реализованный на языке *Visual Basic 6.5* (рисунок 2.8) в виде приложения *Windows* [377] (Приложение 2).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ		Структурный анализ пространственных механизмов манипуляторов	
Число подвижных звеньев, n	7	<input type="button" value="АНАЛИЗ"/> <input type="button" value="ВЫХОД"/>	
Число КП 5-го класса, p_5	3		
Число КП 4-го класса, p_4	3		
Число КП 3-го класса, p_3	3		
РЕЗУЛЬТАТ АНАЛИЗА		Механизм	Нормальный
Число КП механизма, p_Σ	9		
Сумма подвижностей в механизме, f_Σ	18		
Число независимых контуров Гохмана, k	2		
Степень подвижности выходного звена, W	6		
Число нормальных кинематических цепей (структурных групп), n_c	6		
Число избыточных связей			
по О.Г. Озолу, q	0		
по А.П. Малышеву, q	0		
Число лишних подвижностей, η	0		
Число возможных уравнений кинестатики, j	42		

Рисунок 2.8 – Окно программы структурного анализа пространственных механизмов параллельной структуры

Для представленных компоновочных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры выполняются следующие общие правила и закономерности, на основании которых сделан вывод о принадлежности представленных в таблице 2.1 схем манипуляторов к одному семейству параллельно-последовательных манипуляторов на базе трипода.

На рисунке 2.9 представлена зависимость маневренности манипулятора в базовой плоскости от степени подвижности выходного звена. Маневренность определяет наличие и форму угла сервиса.

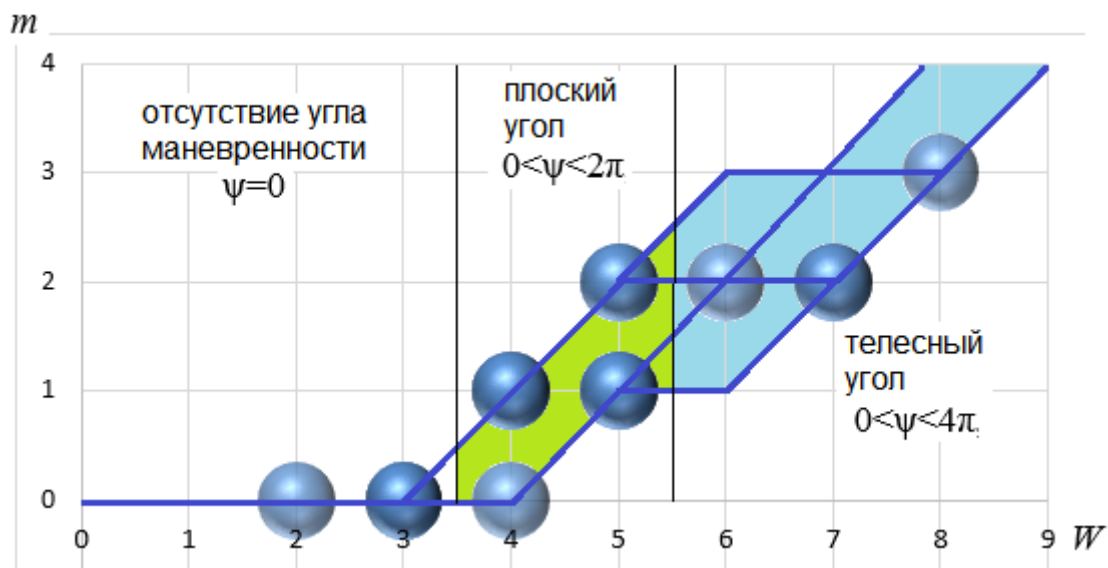


Рисунок 2.9 – Зависимость маневренности в базовой плоскости от степени подвижности выходного звена

Как показывает анализ, область существования манипуляторов на основе трипода (рисунок 2.10) ограничена слева по подвижности $W \geq 1$ и снизу по числу подвижных звеньев $n_{min} \geq 3$. Область существования рациональных структур ограничена сектором между прямыми $n_{min} = 2W$ и $n_{min} = 3W$, внутри сектора проходит множество прямых, общую запись которых можно представить в виде

$$n_{min} = 2W + b \text{ и } n_{max} = 3W - b, \quad (2.9)$$

где b – коэффициент, зависящий от степени подвижности выходного звена W .

Коэффициент b принимает следующие значения

$$b = \begin{cases} 0, & \text{при } W = 1 \\ \frac{W}{2}, & \text{при } W \geq 2 \end{cases} \quad (2.10)$$

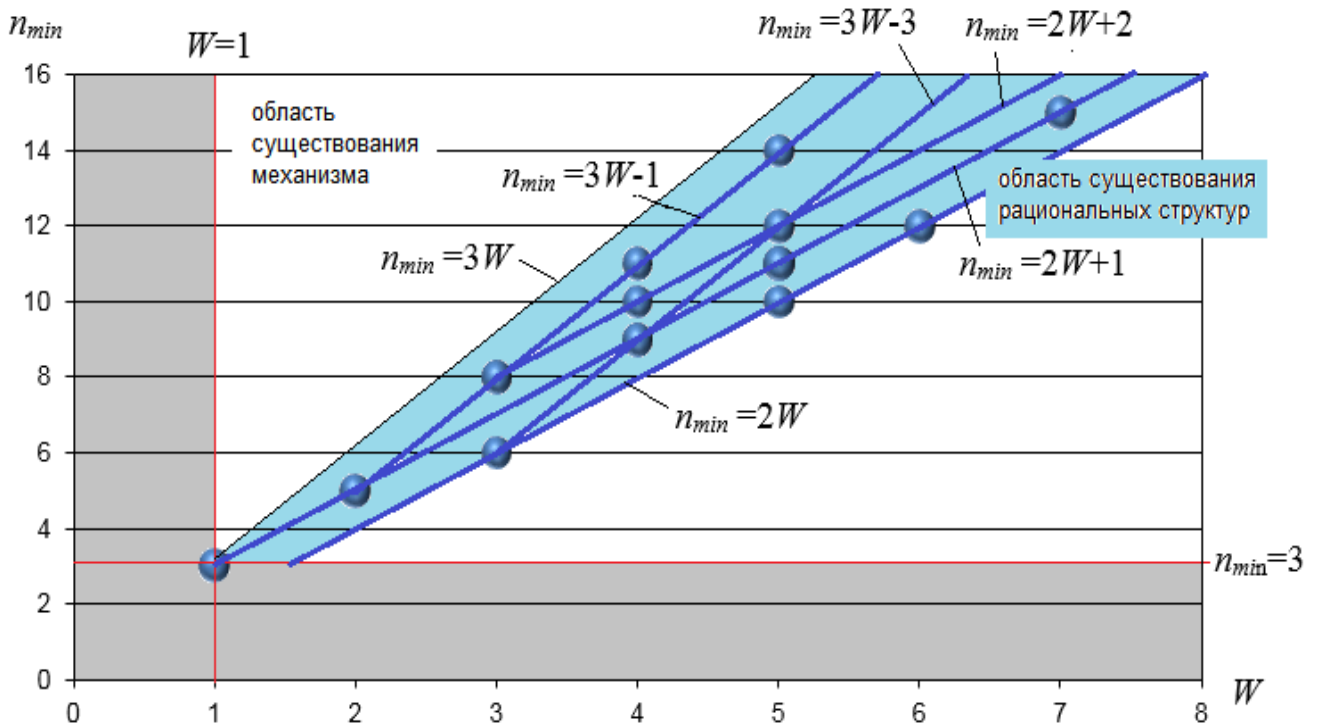


Рисунок 2.10 – Зависимость минимально достаточного количества подвижных звеньев от степени подвижности выходного звена

При увеличении количества степеней подвижности выходного звена увеличивается и коэффициент b , вследствие чего области рациональных структур смещаются от центра координат вдоль прямой $n_{min}=2W$ (рисунок 2.11).

В результате структурного анализа компоновочных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода выявлена зависимость минимально необходимого количества кинематических пар от количества степеней подвижности выходного звена и минимально необходимого числа подвижных звеньев (рисунок 2.12)

$$\Sigma p_{imin} \leq n_{min} + W. \quad (2.11)$$

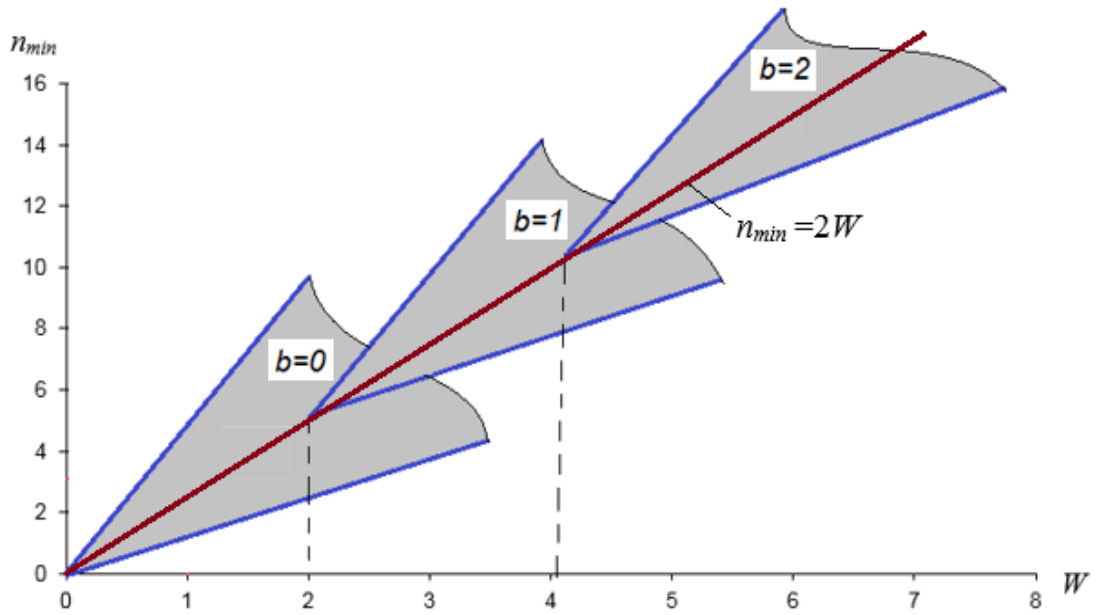


Рисунок 2.11 – Области существования рациональных структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры

Анализ позволил выявить закономерности, ранее не применяемые в теории структурного строения механизмов.

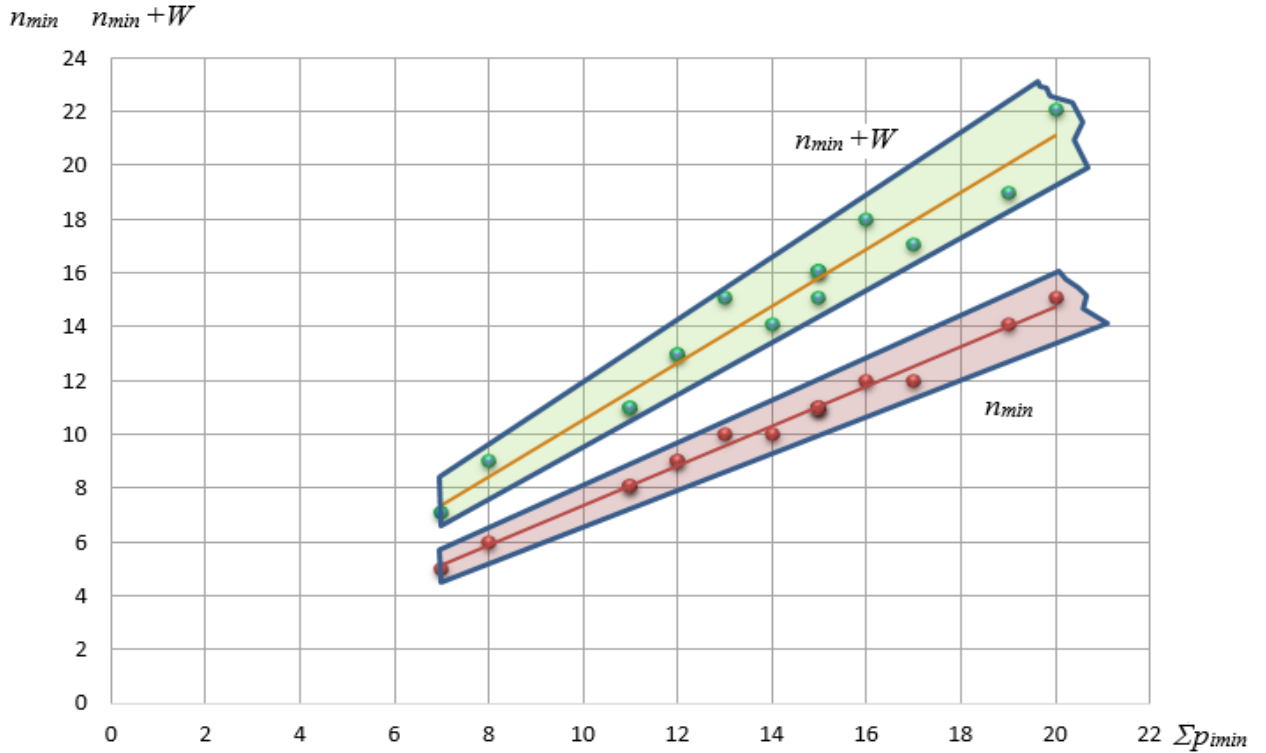


Рисунок 2.12 - Зависимость минимально необходимого количества кинематических пар от степени подвижности выходного звена и минимально необходимого числа подвижных звеньев

Для пространственных исполнительных механизмов манипуляторов параллельной структуры при $q=0$ и $\eta=0$ число независимых контуров Гохмана k имеет следующую зависимость от числа степеней подвижности W

$$\begin{cases} k = W + 1, \text{ при } W = 1, \\ k = W, \text{ при } W = 2, \\ k = W - 1, \text{ при } W \geq 3. \end{cases} \quad (2.12).$$

Дополнительно выявлено, что для пространственного механизма параллельной структуры, при добавлении одной степени подвижности стойки, разность суммы подвижностей и степени подвижности равно сумме произведения числа степеней свободы рабочего пространства манипулятора на число независимых контуров Гохмана и числа степеней свободы в плоскости

$$f_{\Sigma} - W = 6k + 3. \quad (2.13).$$

Выражение (2.13) является частным случаем условия нормальности механизма [240], справедливо при $W \geq 3$ и может быть полезно при синтезе манипуляторов параллельно-последовательной структуры, в т. ч. манипуляторов типа «хобот» [128, 137].

В результате структурного анализа механизмов параллельной структуры получена зависимость отношения f_{Σ}/W от степени подвижности (рисунок 2.13), которая может быть полезна при синтезе подобных механизмов.

Полученные выше выражения (2.9, 2.11-2.13) и графические зависимости рисунки 2.5 и 2.9-2.13 значительно сужают рамки поиска наиболее рациональных структурных строений пространственных механизмов параллельно-последовательной структуры.

Для структурного синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры с заранее определенными параметрами возможно применение как отдельных, приведенных выше зависимостей, так и совместное их использование.

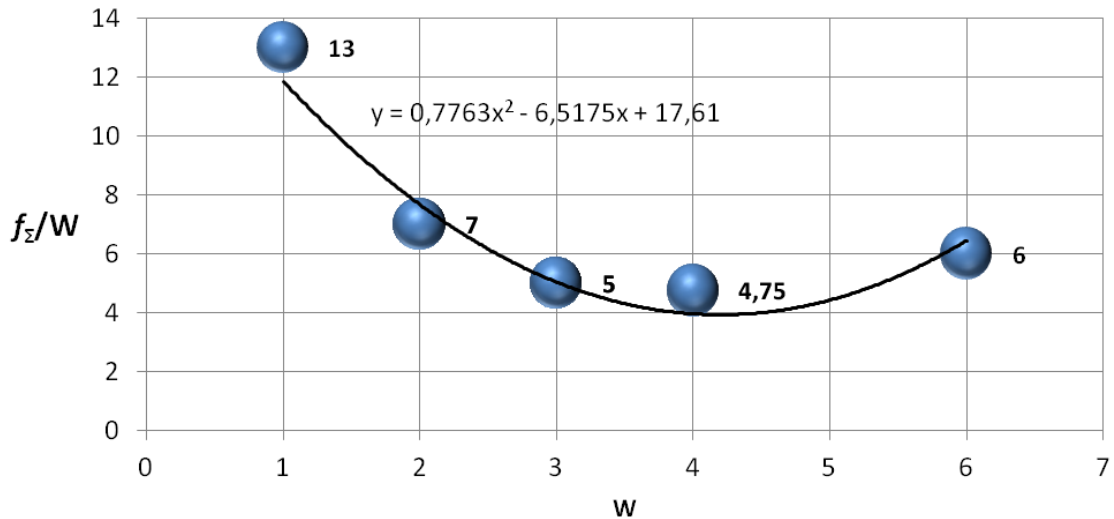


Рисунок 2.13. Зависимость отношения f_{Σ}/W от количества степеней подвижности

2.3. Структурный синтез механизмов параллельно-последовательных манипуляторов на базе трипода

2.3.1. Итерационный синтез механизмов манипуляторов

Задача синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры состоит в определении числа подвижных звеньев и количества кинематических пар заданной подвижности для заданной степени подвижности W выходного звена манипулятора.

Традиционно задачу итерационного синтеза (перебора вариантов) можно сформулировать в виде системы уравнений

$$\begin{cases} W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \\ \Sigma p_i = p_5 + p_4 + p_3, \\ k = \Sigma p_i - n, \\ f_{\Sigma} = p_5 + 2p_4 + 3p_3, \end{cases} \quad (2.14)$$

где n – число подвижных звеньев; p_i – число кинематических пар i -го класса; k – число независимых контуров Гохмана; f_{Σ} – сумма подвижностей кинематических пар в механизме.

Вследствие того, что задача структурного синтеза является задачей целочисленного решения, то на переменные p_i и n наложены ограничения

$$p_i \geq 0 \text{ и } n > 0.$$

Таким образом при заданном W имеем 4 уравнения и 6 неизвестных $n, p_5, p_4, p_3, k, f_{\Sigma}$. При использовании только два первых уравнения системы (2.14) число неизвестных будет 4, т.е. в любом случае на два больше, чем уравнений.

Следовательно, для итерационного целочисленного синтеза достаточно и двух первых уравнений. Количество полученных решений можно ограничить, задавшись границами области поиска

$$n_{min} \leq n \leq n_{max}, \quad p_{i min} \leq p_i \leq p_{i max}. \quad (2.15)$$

Учитывая, что простейший механизм с внутренними входами и $W=1$ содержит $n_{min}=3$ подвижных звеньев и $p_i=4$ кинематических пар, то нижние границы области поиска можно записать как

$$3 \leq n \leq n_{max}, \quad 4 \leq p_i \leq p_{i max}. \quad (2.16)$$

Остается лишь определиться с верхним пределом границ области поиска.

Решение задачи структурного синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры по поиску рациональных структур, сумм подвижностей манипулятора, позволяющих в результате синтеза получить требуемые значения степени подвижности W , без избыточных связей q и лишних подвижностей η , желательно получить в виде ограниченного количества возможных вариантов.

Решение оптимизационной задачи структурного синтеза итерационным методом проводилось для погрузочного манипулятора-трипода на подвижном основании (схема 7, таблица 2.1), представляющем собой пространственный механизм параллельно-последовательной структуры (рисунок 2.14).

Для синтеза оптимального по структуре манипулятора выражение (2.3) принимается за целевую функцию, которая учитывает условие нормальности механизма, при котором число обобщенных координат q механизма равно требуемой степени его подвижности W .

Для манипулятора (рисунок 2.14) число подвижных звеньев не может быть меньше 10 (захват 10, поворотная платформа 1 и четыре цилиндра, состоящих из поступательных пар шток-цилиндр: 2-3, 4-5, 6-8, 7-9), с учетом возможных промежуточных звеньев в составных шарнирах принимается ограничение $10 < n < 15$. Минимальное количество одноподвижных поступательных пар низшего класса равно семи – кинематические пары платформа-шасси (E), шток-платформа (D), цилиндр-шасси (C) и четыре пары шток-цилиндр, с учётом применения в механизме только лишь одноподвижных пар 5 класса их максимально количество равно 16, тогда $7 < p_5 < 16$. Ограничения по двухподвижным и трёхподвижным кинематическим парам низшего класса запишутся как: $0 \leq p_4 \leq 5$ и $0 \leq p_3 \leq 6$. Суммарное количество кинематических пар для данной схемы манипулятора не может быть менее 10, поэтому $p_5 + p_4 + p_3 \geq 10$.

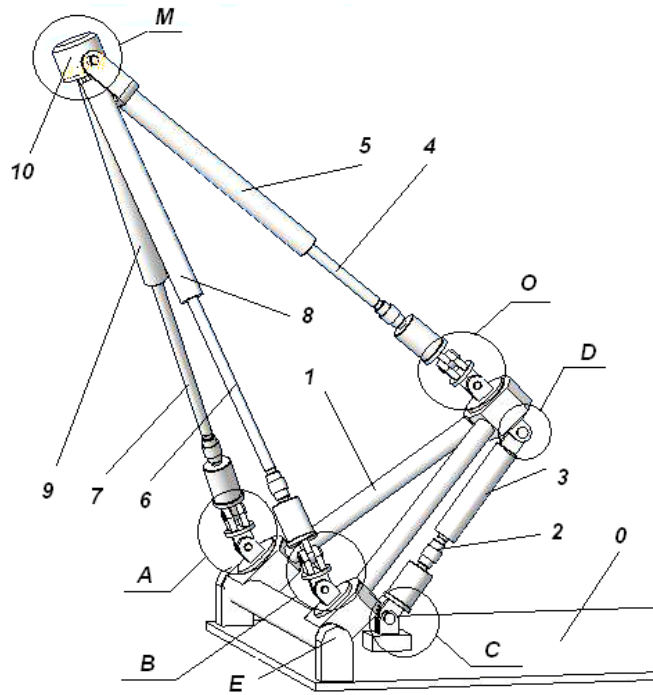


Рисунок 2.14. – Манипулятор -трипод на поворотном основании: 0- стойка; 1- платформа; 2, 4, 6, 7 – штоки актуаторов (исполнительных цилиндров); 3, 5, 8, 9 – цилиндры актуаторов; 10 – универсальный шарнир

Таким образом, задача итерационного синтеза формулируется как целевая функция

$$q = n_{\text{ц}} = W(n, p_i) = 4 \quad (2.17)$$

Ограничения по числу кинематических пар и их подвижностей

$$\left\{ \begin{array}{l} 10 \leq n \leq 15, \\ 7 \leq p_5 \leq 16, \\ 0 \leq p_4 \leq 5, \\ 0 \leq p_3 \leq 6, \\ p_5 + p_4 + p_3 \geq 10. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Алгоритм итерационного структурного синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода реализован на языке *Turbo Pascal* (рисунок 2.15) [88, 273].

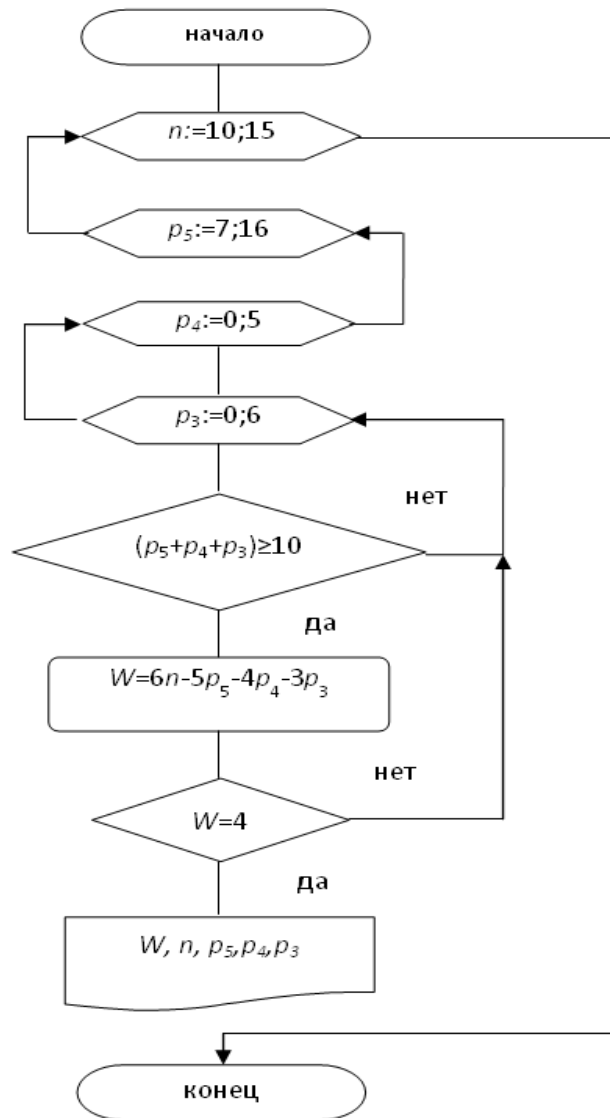


Рисунок 2.15. Блок-схема алгоритма поиска вариантов сочетания кинематических пар 3, 4 и 5 классов и количества звеньев манипулятора, обеспечивающих степень подвижности $W=4$

В результате расчётов по разработанной программе рассмотрено 1500 вариантов, из которых заданным условиям ($W=4$) соответствует всего 121 вариант. Однако не все сочетания кинематических пар определённого класса при данном числе подвижных звеньев могут образовывать работоспособный механизм с требуемой степенью подвижности, лишённый избыточных связей и не имеющий местных подвижностей. Следовательно, необходим более качественный анализ, позволяющий выбрать из 121 варианта только те решения, которые бы объективно описывали структуру манипулятора.

2.4. Итерационный синтез механизмов манипуляторов с ограничением границ поиска рациональных структурных схем

Как уже отмечалось, однозначное определение количества кинематических пар i -ой подвижности пространственного механизма параллельной структуры, позволяющее в результате структурного синтеза получить требуемую степень подвижности W механизма, при отсутствии избыточных связей q и лишних подвижностей η , относится к задачам целочисленного решения. Вариантов решений может быть огромное количество, и не все полученные решения $W(n, p_i, f_{\Sigma})$ являются приемлемыми, то есть не дают возможность получить работоспособный механизм. Для поиска рациональных структурных строений манипуляторов параллельно-последовательной структуры недостаточно только ограничений области поиска, на этапе перебора возможных вариантов важно проверять принадлежность полученных решений к области существования механизмов манипуляторов на основе полученных ранее графических зависимостей (рисунки 2.9 – 2.13).

Алгоритм нахождения рациональных структурных схем работоспособных механизмов с кинематическими парами не ниже III-го класса можно записать в виде следующей последовательности операций (рисунок 2.16):

1. Задаётся требуемая степень подвижности механизма W .

2. Согласно выражениям (2.9) и (2.10) границы области поиска по числу подвижных звеньев ограничены прямыми

$$2W+b \leq n \leq 3W-b, \quad (2.19)$$

и по суммарному, минимально необходимому числу кинематических пар

$$\Sigma p_{imin} \leq n_{min} + W. \quad (2.20)$$

3. Определяется число независимых контуров Гохмана k из условия (2.12).

4. Задаются ограничения $q=0$ и $\eta=0$, обеспечивающие получение механизма без избыточных связей и лишних подвижностей.

5. Задаются ограничения по подвижностям кинематических пар, (например, если в механизме присутствуют только одноподвижные кинематические пары, то ограничения запишутся в виде $p_5 > 0, p_4 = 0, p_3 = 0$).

6. Решается система линейных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3, \\ k = p_\Sigma - n, \\ p_\Sigma = p_5 + p_4 + p_3, \\ f_\Sigma = p_5 + 2p_4 + 3p_3, \end{array} \right. \quad (2.21)$$

и неравенство

$$f_\Sigma \geq W + 6k. \quad (2.22)$$

7. Проверка полученных вариантов решений на целочисленность.

8. Полученные варианты анализируются и из них выбираются работоспособные и рациональные.

Таким образом, задача синтеза сводится к решению целочисленной задачи линейного программирования, что значительно уменьшает границы возможных решений. Разработанный алгоритм (рисунок 2.16) реализован в виде программы на языке *Visual Basic v.6.5* (Приложение 3), апробация алгоритма проведена при синтезе манипулятора параллельной кинематики с 4-мя степенями подвижности, скриншоты окон программы анализа и синтеза представлены на рисунке 2.17.

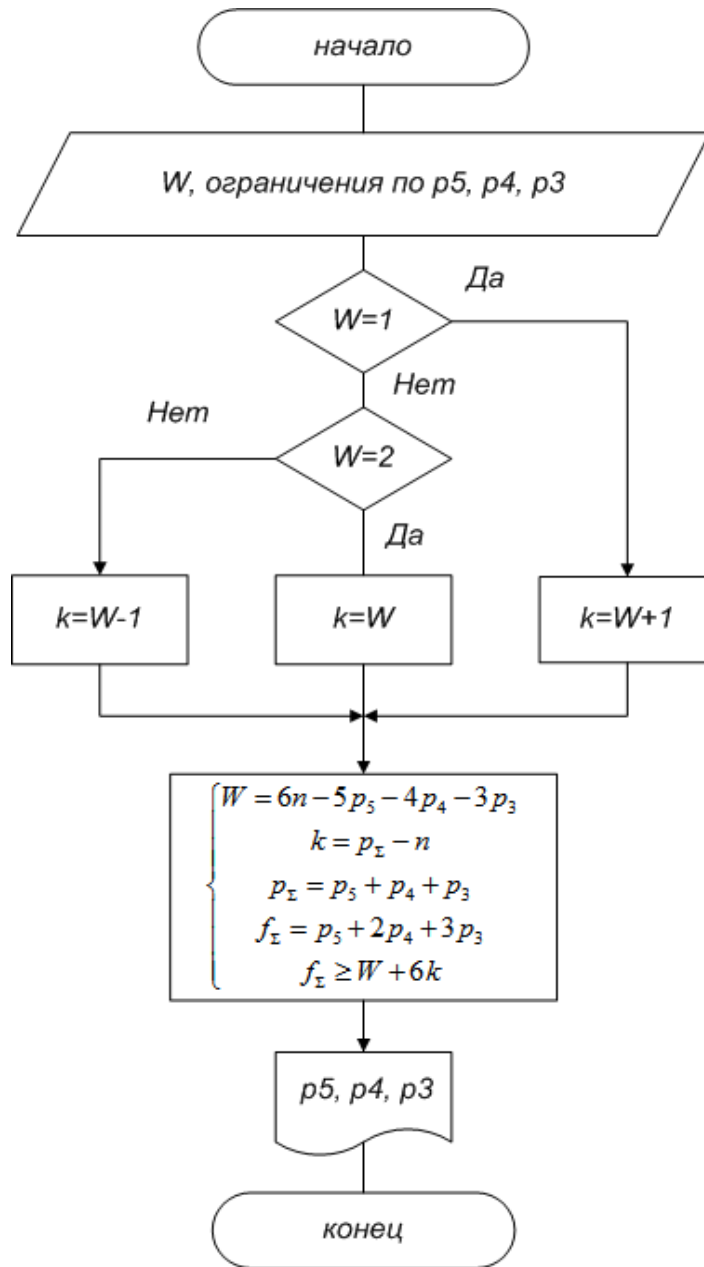
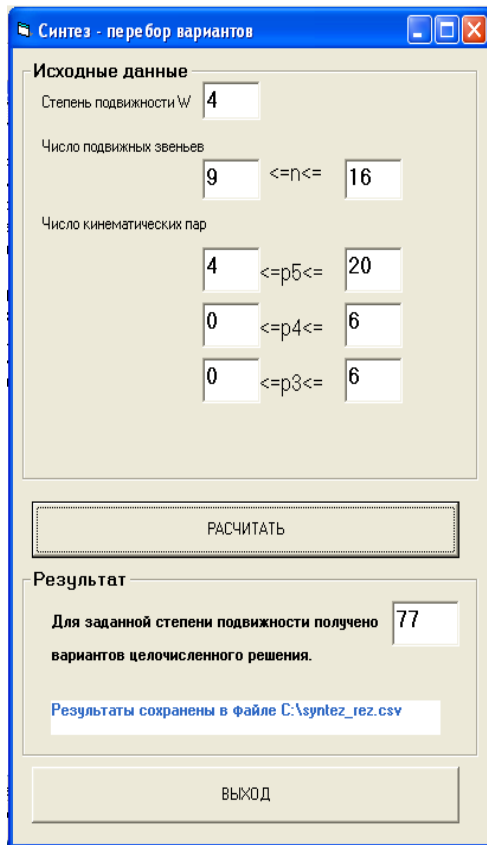
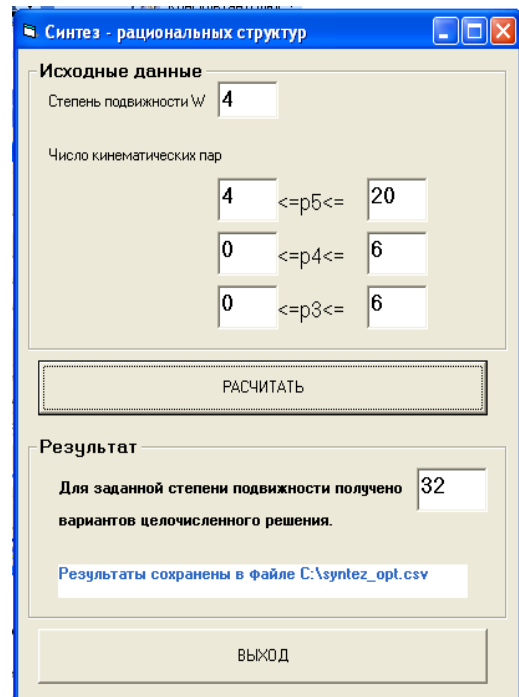


Рисунок 2.16 – Алгоритм синтеза рациональных структурных схем манипулятора-трипода параллельно-последовательной структуры

Результаты решения показали, что для синтезируемого манипулятора при ограничении числа подвижных звеньев $9 \leq n \leq 16$ существует 77 вариантов решений. Из этих вариантов 26 не имеют лишних подвижностей и избыточных связей и позволяют создать работоспособный механизм. Однако лишь 4 варианта (!) являются рациональными, то есть позволяют получить требуемый пространственный механизм в виде трипода на подвижном основании.



а)



б)

Рисунок 2.17 – Скриншоты программ синтеза рациональных структур манипулятора параллельно-последовательной структуры на базе трипода: а) окно программы поиска рациональных решений при заданных ограничениях; б) окно программы поиска рациональных решений при использовании выведенных закономерностей

В результате проведенного многочисленного анализа пространственных манипуляторов параллельной и параллельно-последовательной структуры выявлены новые закономерности в теории структурного строения механизмов, на основе которых разработан алгоритм структурного синтеза пространственных механизмов параллельной структуры, позволяющий сузить область поиска рациональных структур манипуляторов.

Как видно из рисунка 2.17, б), использование выявленных закономерностей в итерационных алгоритмах синтеза значительно (более чем в 2 раза) ограничивает область поиска рациональных структурных схем манипуляторов.

2.5. Оптимизационный синтез манипуляторов с дополнительными ограничениями области существования (задача условной оптимизации)

Представленные выше методы синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры основаны на переборе всех вариантов возможных целочисленных решений системы уравнений с учетом ограничений в виде неравенств. Однако выявленные закономерности, представленные выше, позволяют представить задачу поиска рациональных структурных схем в виде задачи условной оптимизации, которую можно решить методами линейного программирования [163, 231].

Используя выражения системы (2.14), неравенства (2.11) и (2.13), а также ограничения (2.15), (2.18) и (2.19) получим систему из 4 уравнений, 2 неравенств и 4 ограничений при 7 неизвестных переменных. В общем виде задача условной оптимизации примет вид

$$\begin{aligned}
 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 &= W(n, p_i), \\
 p_5 + p_4 + p_3 &\geq W + n_{min}, \\
 p_5 + 2p_4 + 3p_3 &\geq W + 6k, \\
 k &= \sum p_i - n,
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

где $W(n, p_i)$ - целевая функция; k – определяется из условия (2.12).

Исходя из общей постановки задачи условной оптимизации, задавшись конкретным значением целевой функции W , система становится вполне определима. Например, при $W=4$ система уравнений, неравенств и ограничений примет вид

$$\begin{cases}
 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 = 4, \\
 p_5 + p_4 + p_3 \geq 7, \\
 p_5 + 2p_4 + 3p_3 \geq 22, \\
 3 + n \geq 12,
 \end{cases} \tag{2.24}$$

с ограничениями $n > 0, p_5 \geq 0, p_4 \geq 0, p_3 \geq 0$.

Как видно из сформулированной задачи для конкретного значения $W=4$ получается одно уравнение и три неравенства при четырех неизвестных, таким образом, для решения системы (2.24) применимы методы линейного программирования. Для удобства представления в матричном виде и последующего решения систему неравенств (2.24) можно представить, как

$$\begin{aligned} &^{2/3+5/6}p_5+^{2/3}p_4+^{1/2}p_3 \rightarrow \min, \\ &p_5+p_4+p_3 \geq 7, \\ &p_5+2p_4+3p_3 \geq 22. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Решение в матричном виде

$$X=A^{-1} \cdot B \quad (2.26)$$

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} 5/6 & 2/3 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} n-2/3 \\ 7 \\ 22 \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$\begin{pmatrix} p_5 \\ p_4 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5/6 & 2/3 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} n-2/3 \\ 7 \\ 22 \end{pmatrix}. \quad (2.27)$$

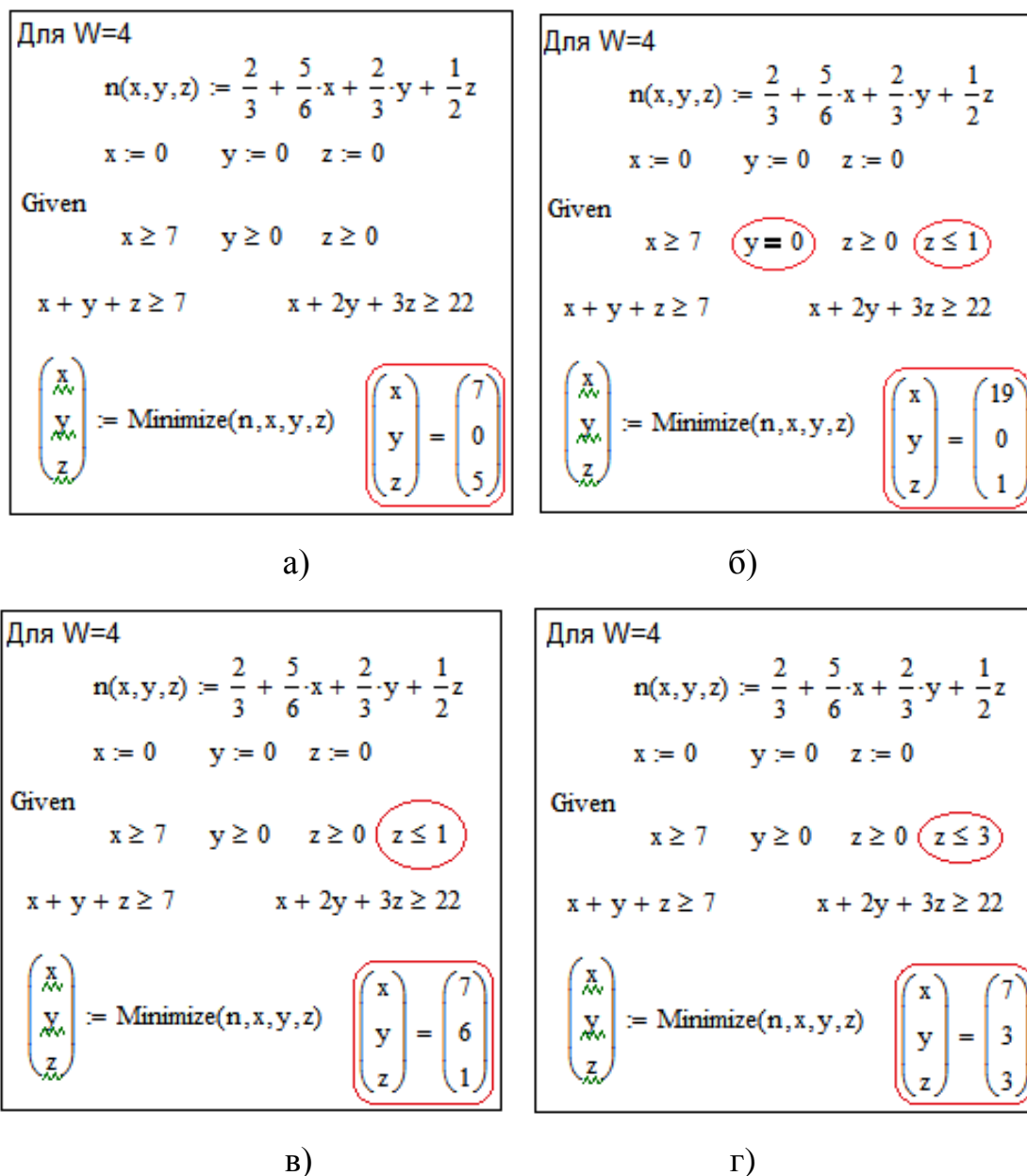
Ниже представлен пример решения задачи условной оптимизации (2.25) в *Mathcad* (рисунок 2.18) [100, 171]. При задании ограничений по числу кинематических пар $p_5 \geq 7$, $p_4 \geq 0$, $p_3 \geq 0$ (в примерах решения p_5 , p_4 , p_3 обозначены

соответственно x , y , z) получено $\begin{pmatrix} p_5 \\ p_4 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}$ (рисунок 2.18, а).

Преобразуя систему (2.24) исключением из уравнений и неравенств n , получена система трех неравенств, решением которых можно выполнить проверку

$$\begin{aligned} &5p_5+4p_4+3p_3 \geq 50, \\ &p_5+p_4+p_3 \geq 7, \\ &p_5+2p_4+3p_3 \geq 22, \end{aligned} \quad (2.28)$$

с ограничениями $p_5 \geq 0$, $p_4 \geq 0$, $p_3 \geq 0$.

Рисунок 2.18 – Примеры решения задачи условной оптимизации в *Mathcad*

Решение системы (2.26)

$$\begin{pmatrix} p_5 \\ p_4 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 4 & 3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 50 \\ 7 \\ 22 \end{pmatrix}. \quad (2.29)$$

$$\text{Откуда} \quad \begin{pmatrix} p_5 \\ p_4 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 \\ 0 \\ 5 \end{pmatrix}.$$

Следует отметить, что результаты решения во многом зависят от принятых ограничений и начальных условий.

Задав ограничения на кинематические пары IV класса - $p_4=0$ и ограничив кинематические пары III класса до одной - $p_3 \leq 1$, получено другое решение

$$\begin{pmatrix} p_5 \\ p_4 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 19 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ (рисунок 2.18, б).}$$

Задавая ограничения по числу кинематических пар определенного класса (рис.2.18 в, г), можно получать различные вариации количества кинематических пар с разной степенью подвижности.

Результаты решения выражения (2.27) различными методами сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Результаты решения задачи условной оптимизации по поиску оптимальных сочетаний кинематических пар манипулятора параллельно-последовательной структуры при $W=4$

Методы решения	p_5	p_4	p_3
Базовый симплекс-метод	7	6	1
Столбовой симплекс-метод	6	12	0
Симплекс-метод в строковой форме	7	6	1
Метод симплекс-таблицы	7	6	1
Встроенные средства <i>Mathcad</i> (функция <i>Minimize</i>)	7	0	5
	7	6	1
	7	3	3

При решении задачи условной оптимизации методами линейного программирования для различных значений целевой функции $W(n, p_i)$ выражения (2.23) будут иметь различные коэффициенты.

Для всех W справедливо $A = \begin{pmatrix} 5/6 & 2/3 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$, однако значения B в выражении

(2.26) будут различные (таблица 2.3).

Значения коэффициентов B для различных значений W

W	3	4	5	6	7	...
B	$\begin{pmatrix} n - 1/2 \\ 6 \\ 12 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} n - 2/3 \\ 7 \\ 22 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} n - 5/6 \\ 8 \\ 29 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} n - 1 \\ 9 \\ 36 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} n - 7/6 \\ 10 \\ 43 \end{pmatrix}$...

Т.е. для коэффициента B справедлива следующая запись

$$B = \begin{pmatrix} n - W/6 \\ \Sigma p_{i \min} \\ f_{\Sigma} \end{pmatrix}. \quad (2.30)$$

Таким образом, задача поиска рациональных структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры может быть сведена к задаче линейного программирования, при этом количество альтернативных решений зависит от заданных границ области поиска (ограничений) и начальных условий, например, задаваемого минимального числа подвижных звеньев механизма манипулятора.

Создан алгоритм и сформулированы критерии оптимизации структурного строения и кинематических параметров манипуляторов с пространственным исполнительным механизмом параллельно-последовательной структуры, позволяющие получать рациональные параметры механизма.

С помощью разработанных алгоритмов выполнена оптимизация структуры по количеству кинематических пар погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом.

2.6. Геометрический синтез параллельно-последовательных манипуляторов

Рациональные структурные строения погрузочных манипуляторов с пространственным исполнительным механизмом, а также определение

оптимальных их схем позволяет увеличить коэффициент полезного действия исполнительного механизма за счёт уменьшения углов давления и реакций в кинематических парах, и получить максимальный объём зоны действия рабочего органа манипулятора.

Конфигурация зоны обслуживания манипулятора-трипода определялась на примере схемы 7 (таблица 2.1) из условий, обусловленных геометрическими параметрами мобильного робота с шагающими движителями, на котором он установлен. А также ограничений накладываемых на координаты точек крепления приводных звеньев на поворотном основании, исключающие попадания в мертвое положение, нижнюю точку захвата относительно поверхности, максимального вылеты от передней кромки робота (рисунок 2.19).

Для обеспечения заданной зоны действия захвата манипулятора-трипода геометрические параметры звеньев определялись при заданных ограничениях стороны основания пирамиды исполнительного механизма a , нижней точки зоны действия захвата относительно поверхности z_{Mmin} , максимального вылета захвата от передней кромки робота l_{max} и угла сектора зоны действия в горизонтальной плоскости Θ . Одним из ограничений был также угол давления в кинематических парах, максимальное значение которого было принято $\nu_{max} = [\nu] = 60^\circ$ [55, 56, 61, 65].

При условии симметричности конструкции трипода, т.е. когда $l_{1min} = l_{2min} = l_{3min}$ и $l_{i max} = k l_{i min}$, используя ранее полученные зависимости для геометрического синтеза манипулятора-трипода, с точки зрения реализации максимальной зоны действия, при отсутствии заклинивания в шарнирах (не превышения допустимых углов давления), получено выражение

$$a = l_{\min} \sqrt{1 + k^2 - 2 \sin[\nu]}, \quad (2.31)$$

где $k = l_3/h$ отношение длины цилиндра к ходу штока есть коэффициент удлинения цилиндра, для одноходовых гидроцилиндров $k \leq 1,6 \dots 1,8$, для больших значений необходимо применять телескопические гидроцилиндры [255].

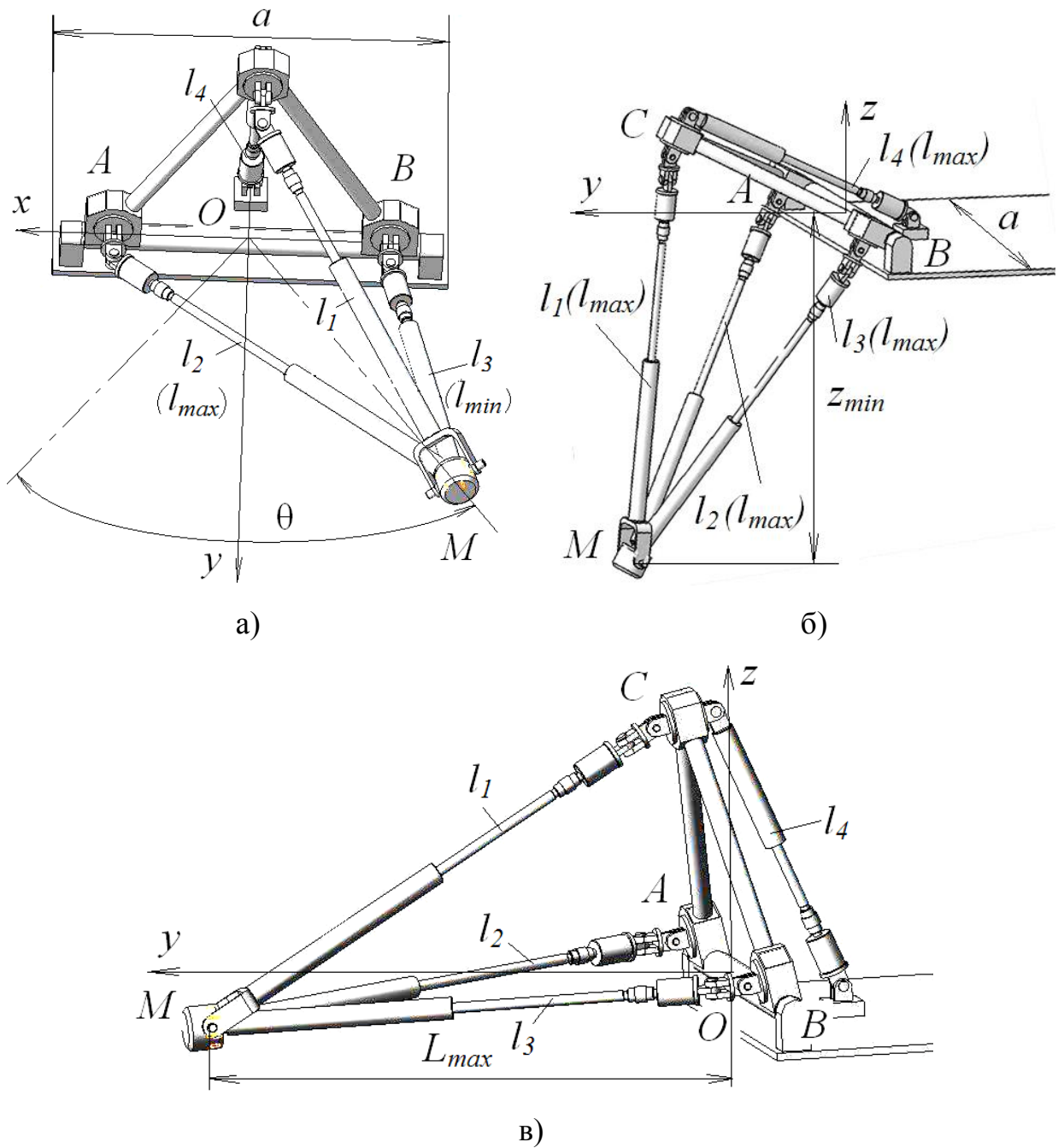


Рисунок 2.19 – Геометрический синтез. Схемы положений манипулятора-трипода на подвижном основании к геометрическому синтезу: а) положение захвата в нижней точке зоны действия; б) поворот захвата в горизонтальной плоскости; в) максимальный вылет захвата от передней кромки робота

Геометрический синтез манипулятора параллельно-последовательной структуры с четырьмя внутренними входами ($W=4$) реализован в виде итерационного алгоритма (рисунок 2.20).

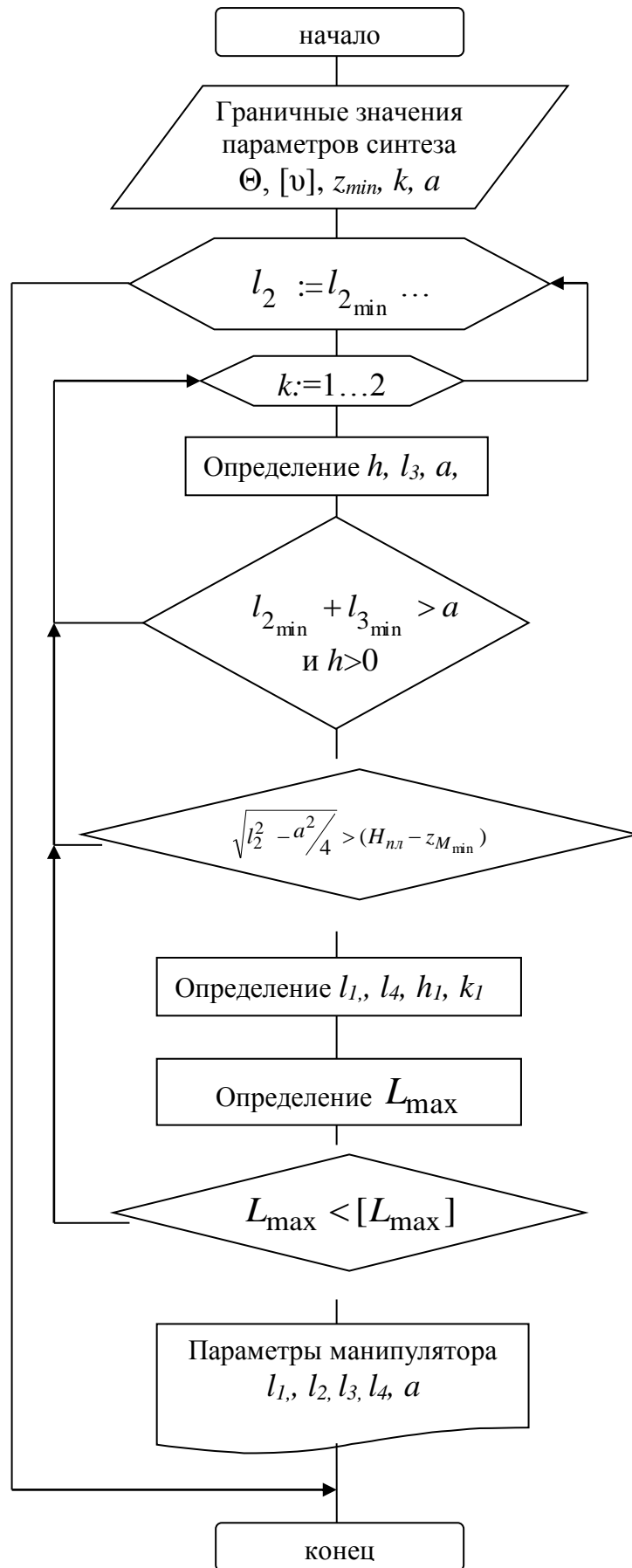


Рисунок 2.20 – Алгоритм геометрического синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры

Исходными данными являются граничные значения параметров синтеза: наибольший требуемый угол θ сектора сечения зоны обслуживания в горизонтальной плоскости xOy ; наивысшая или наинизшая точка зоны обслуживания. В рассмотренном варианте алгоритма выбрано достижение требуемого минимального значения z_{\min} . Максимальный вылет захвата от кромки шасси L_{\max} ; ширина шасси a , являющаяся стороной основания трипода; максимальный угол давления в одноподвижных кинематических парах $[\nu]$; границы изменения коэффициента удлинения актуаторов k , от которого во многом зависит объем зоны обслуживания. По полученным значениям k , при котором достигаются наилучшие приближения к задаваемым параметрам, затем выбираются параметры актуаторы.

Принцип поиска решений рациональных геометрических параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры основан на исследовании сечений зоны обслуживания манипулятора методом векторного контура и представлен ранее в работах автора [61, 184]. Результатом геометрического синтеза, реализованном по представленному алгоритму (рисунок 2.20), является ряд схемных решений, наиболее удовлетворяющих заданным начальным условиям синтеза.

Реализация алгоритма геометрического синтеза осуществлена в виде приложения *Windows* на языке *Visual Basic* (рисунок 2.21). Разработанное программное средство позволяет визуализировать основные результаты, полученные в процессе реализации алгоритма геометрического синтеза параллельно-последовательных манипуляторов на основе трипода. Основной блок программы визуализации положений манипуляторов на основе трипода впоследствии использован для алгоритмов построения сечений зоны обслуживания исследуемых кинематических схем.

Используя выражение (2.31), получена поверхность (рисунок 2.22), характеризующая зависимость длины стороны основания a от длины актуатора во втянутом состоянии l_{\min} и коэффициента k . Зависимость максимального вылета

захвата от передней кромки робота l_{max} от длины стороны основания a и от длины актуатора во втянутом состоянии l_{min} получена в результате геометрического синтеза с учетом выражения (2.31) на и представлена на рисунке 2.23.

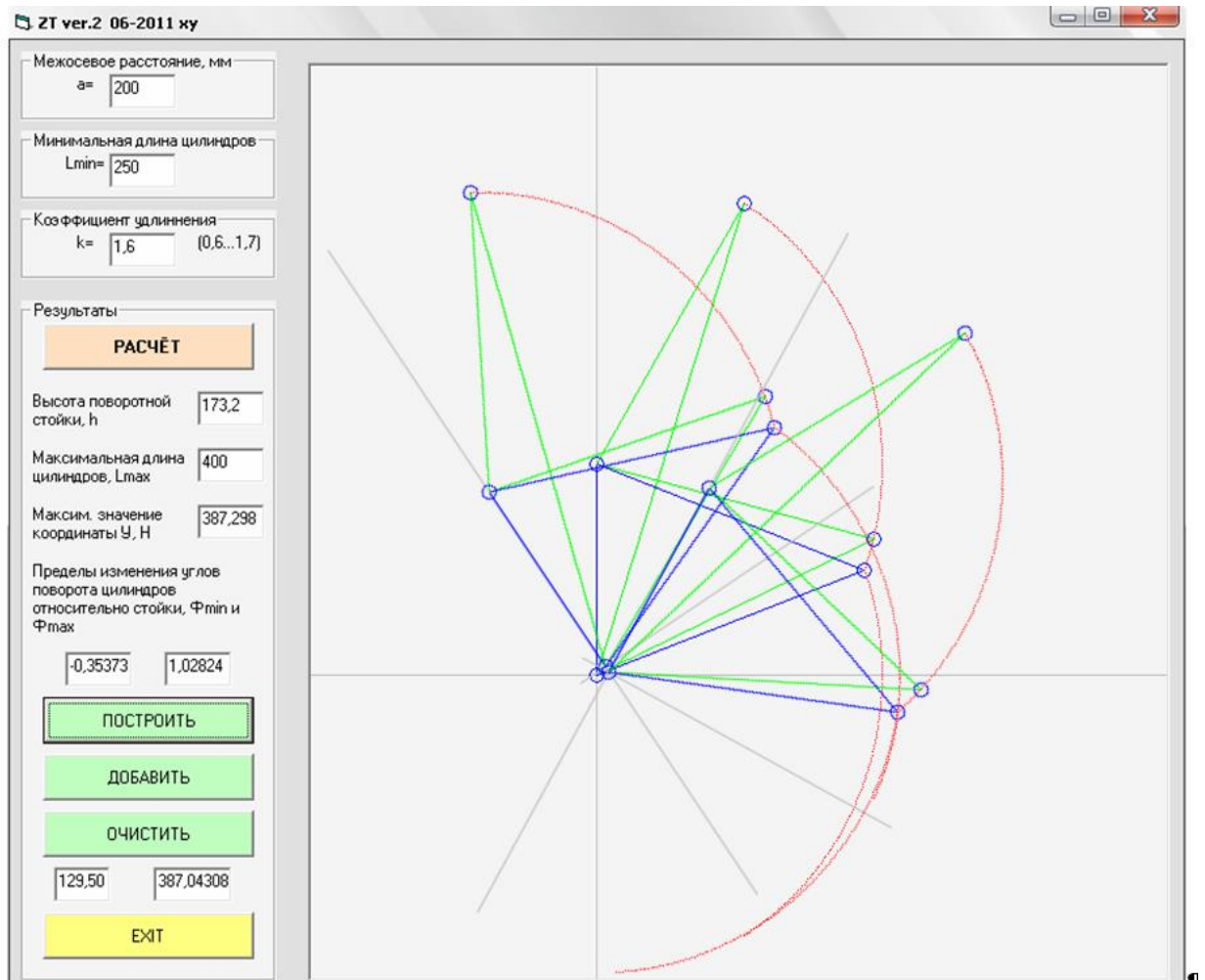


Рисунок 2.21 – Экранная копия программы визуализации результатов реализации алгоритма геометрического синтеза

На поверхности (рисунок 2.23) видна зона резкого обрыва – это и есть области особых положений (сингулярности), которое может выражаться в появлении неуправляемой подвижности (нарушение определенности движения) или заклинивания кинематических пар.

Полученное выражение (2.31), а также графические зависимости (рисунки 2.22 и 2.23) показывают нелинейность зависимости геометрических параметров и могут быть использованы при проектировании манипуляторов-триподов.

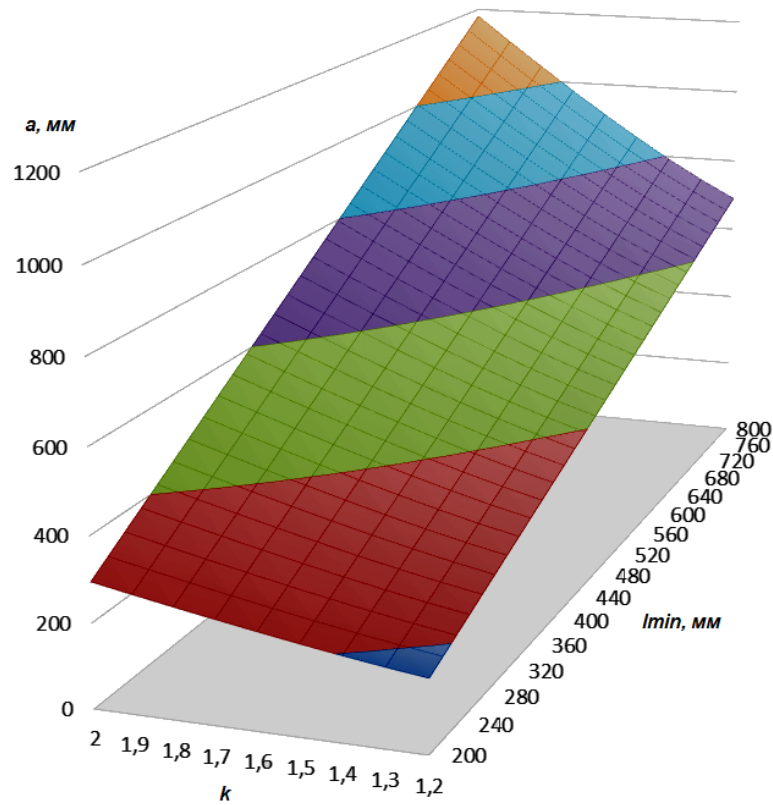


Рисунок 2.22 – Поверхность, характеризующая зависимость стороны основания трипода a от длины актуатора во втянутом состоянии l_{min} и коэффициента k

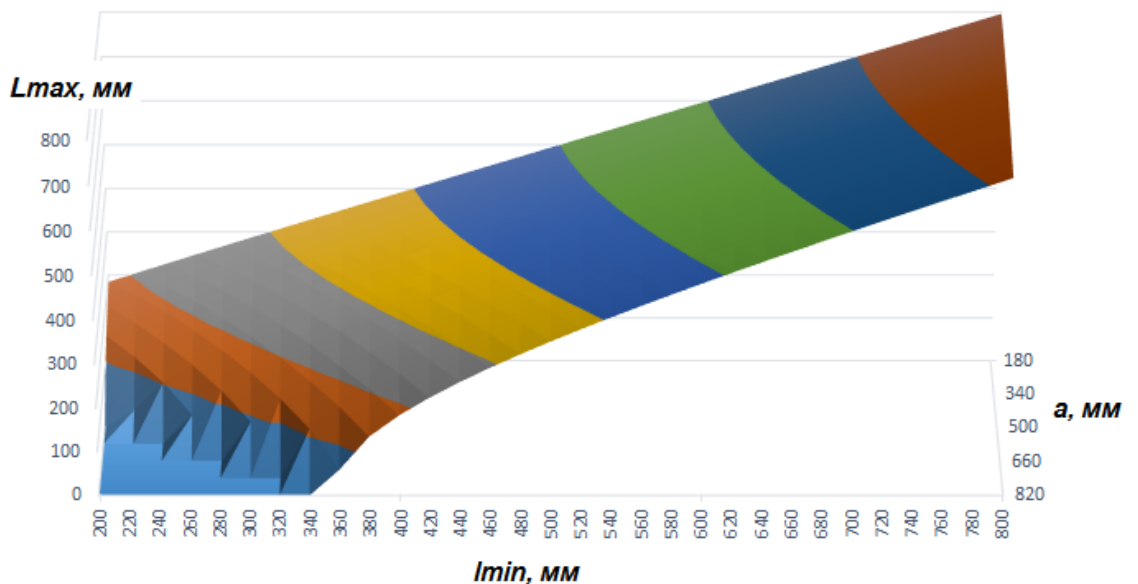


Рисунок 2.23 - Зависимость максимального вылета захвата от передней кромки робота L_{max} от стороны основания a от длины актуатора во втянутом состоянии l_{min}

Выводы по главе

На основе блочно-модульного подхода представлена эволюция параллельно-последовательных манипуляторов, построенных на базе трипода. Таким образом, расширено семейство пространственных механизмов манипуляторов параллельно-последовательной структуры.

Для всех представленных схем манипуляторов определены такие параметры, как степень подвижности выходного звена, маневренность, угол сервиса. Анализ результатов показал, что из предложенных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода ненулевой маневренностью в базовой плоскости обладают большинство, вследствие чего решение задачи позиционирования осложняется множеством возможных конфигураций механической системы.

Разработаны метод и алгоритмы синтеза и критерии выполнения условий существования рациональных структурных схем механизмов параллельно-последовательной структуры, позволяющие сузить границы поиска решений.

Найдены зависимость минимально необходимого количества кинематических пар от количества степеней подвижности выходного звена W и минимально необходимого числа подвижных звеньев n . Получена зависимость маневренности манипулятора параллельно-последовательной структуры в базовой плоскости от степени подвижности выходного звена. Определено число независимых контуров Гохмана k от числа степеней подвижности W . Сформулированы ограничения области существования структурных схем манипуляторов-триподов в виде аналитических и графических зависимостей.

Сформулирована задача поиска рациональных структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры в виде задачи условной оптимизации, решенная методом линейного программирования, при этом количество альтернативных решений зависит от заданных границ области поиска (ограничений) и начальных условий.

Создан алгоритм и сформулированы критерии оптимизации структурного строения и кинематических параметров манипуляторов с пространственным исполнительным механизмом параллельно-последовательной структуры, позволяющие получать рациональные параметры механизма.

С помощью разработанных алгоритмов выполнена оптимизация структуры по количеству кинематических пар погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом.

Разработан метод геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов - триподов с четырьмя исполнительными поступательными механизмами и поворотным основанием, обеспечивающий значения показателей эффективности, сформулированных в техническом задании на выполнение погрузочно-разгрузочных работ.

3. ЗАДАЧА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА МАНИПУЛЯТОРА-ТРИПОДА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

3.1. Кинематика манипулятора-трипода на подвижном основании

Основной задачей при проектировании манипуляторов является обеспечение перемещения точки выходного звена механизма по заданной траектории и в заданных пределах – необходимой зоне обслуживания. Такую геометрическую и кинематическую задачи, называют траекторной. Траекторная задача заключается в определении законов изменения обобщенных координат манипулятора [57, 63, 224, 269]. Особенность кинематического анализа манипулятора вытекает из особенностей самого механизма, в котором все подвижные звенья являются ведущими и имеют переменную длину. По этой причине достаточно выявить перемещения единственной «определяющей» точки M , к которой прикреплены штоки трех цилиндров (актуаторов) и захват (рисунок 3.1).

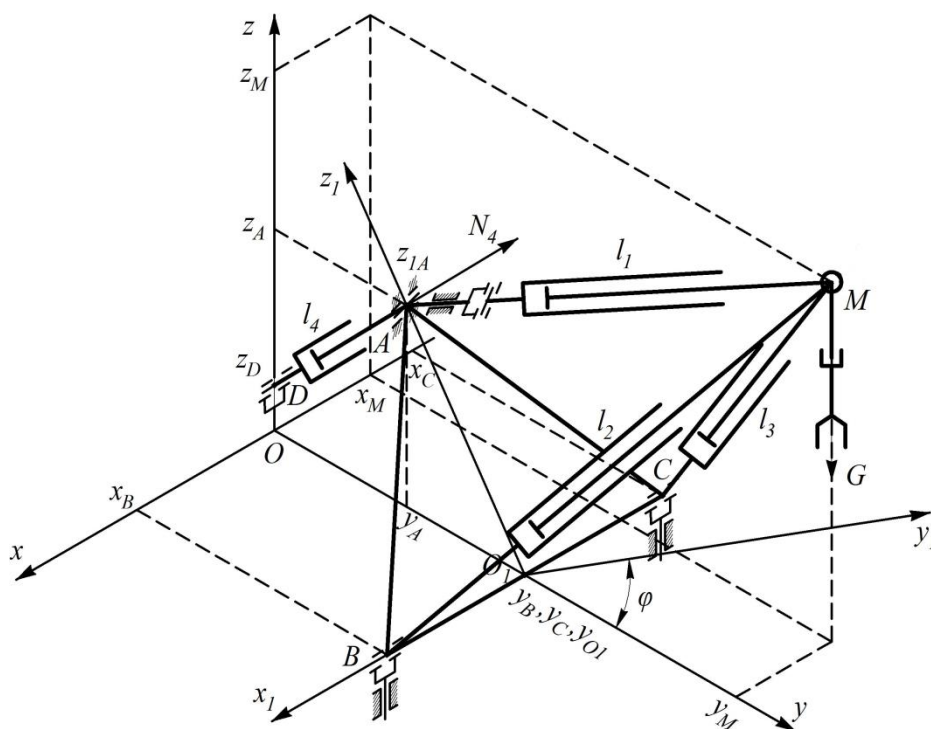


Рисунок 3.1 – Расчётная схема манипулятора-трипода на подвижном основании.

Для определения траектории перемещения точки M принято допущение – независимость нескольких движений, а именно, для схемы манипулятора по рисунку 3.1: I-ое движение - за счет изменения длин цилиндров трипода l_1, l_2, l_3 ; II-ое движение – за счет изменения длины цилиндра l_4 .

Тогда траектория точки M есть сумма этих движений:

$$\begin{cases} x_M = x_{MI} + x_{MII}; \\ y_M = y_{MI} + y_{MII}; \\ z_M = z_{MI} + z_{MII}. \end{cases} \quad (3.1)$$

где x_M, y_M, z_M - координаты точки M в результирующем движении, x_{Mi}, y_{Mi}, z_{Mi} ($i=I,II$) координаты точки M в i -ом движении.

Для определения пространственного перемещения точки M , в зависимости от изменения обобщенных координат манипулятора-трипода, эти уравнения имеют вид [57, 63, 104]

$$\begin{cases} x'_M = \frac{l_3^2 - l_2^2}{4x_B}, \\ y'_M = \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(-l_1^2 + 0,5l_2^2 + 0,5l_3^2 - x_B^2 - z_A^2)}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \\ z'_M = \frac{-l_1^2 + 0,5l_2^2 + 0,5l_3^2 - x_B^2 + z_A^2}{2z_A}. \end{cases} \quad (3.2)$$

где x'_M, y'_M, z'_M – координаты точки M в подвижной системе координат; l_1, l_2, l_3 – текущие значения длин цилиндров; $x_B = -x_C, z_A$ – координаты точек крепления цилиндров.

Система (3.2) представляет собой решение прямой задачи кинематики для манипулятора-трипода и справедлива при соответствующих конкретных значениях l_1, l_2, l_3, x_B, z_A для всех триподов по схемам таблицы 2.1. (раздел 2.2), кроме схем 5, 8, 9, 10.

Для манипулятора-трипода на подвижном основании, уравнения (3.1), однозначно определяющие положение точки M в пространстве, окончательно примут вид [57, 63, 104]:

$$\begin{cases} x_M = \frac{l_3^2 - l_2^2}{4x_B}, \\ y_M = y_0 + \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\varphi) - \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \sin(\varphi), \\ z_M = \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(\varphi) + \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \cos(\varphi), \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\text{где } A = -l_1^2(t) + 0,5l_2^2(t) + 0,5l_3^2(t), \quad \varphi(t) = \arcsin \frac{OK^2 + DK^2 + OA^2 - l_4^2(t)}{2OA\sqrt{DK^2 + OK^2}} + \gamma,$$

$$\gamma = \arcsin \frac{DK}{\sqrt{DK^2 + OK^2}}.$$

Система уравнений (3.3) позволяет определять объём зоны обслуживания выходного звена пространственного механизма и справедлива для манипуляторов - триподов на подвижном основании по схемам 4, 7, 15, 16 (таблица 2.1, раздел.2.2), а также с некоторыми изменениями для схем 5, 9, 12, 13.

Ограничения накладываются на координаты OA и OB точек крепления звеньев манипулятора.

$$l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16 \cdot OB^2} - \frac{(A - OB^2 - OA^2)^2}{4 \cdot OA^2} \geq 0 \quad (3.4)$$

$$OA \geq \sqrt{\pm \frac{1}{8 \cdot OB^2} \left(\sqrt{-\left(16l_1^2 OB^2 - (l_3^2 - l_2^2)^2\right) \left((l_3^2 - l_2^2)^2 - 16OB^2 (l_1^2 - OB^2 + A) \right)} - \left((l_3^2 - l_2^2)^2 - 8OB^2 (OB^2 - 2l_1^2 - A) \right) \right)}. \quad (3.5)$$

В отличие от промышленных роботов, служащих для выполнения конкретных задач, технологические процессы погрузочных манипуляторов заранее неизвестны. Следовательно, у таких манипуляторов не должно быть какой-то предпочтительной ориентации, в которой он бы обладал лучшими характеристиками. Отсюда следует вывод о необходимости симметричности конструкции манипулятора [331, 332].

3.2. Алгоритм формирования объёма зоны обслуживания манипулятора - трипода

Важнейшей характеристикой любого погрузочного манипулятора является зона обслуживания. Как правило, при проектировании манипуляторов объем зоны обслуживания или площадь сечений зоны обслуживания координатными плоскостями задаются в техническом задании. Объем зоны обслуживания является важным параметром, влияющим на производительность погрузочного средства [144, 184].

Пределы поворота звеньев в шарнирах продиктованы условиями выполняемого технологического процесса и ограничены конструктивными особенностями шарниров и опорного основания. Шарниры A, B, C (рисунок 3.1) обеспечивают поворот корпусов исполнительных звеньев относительно собственных осей, параллельных осям O_1Y_1 и O_1X_1 подвижной системы координат, на 360° и $\pm 135^\circ$ соответственно.

Формализованный алгоритм получения кривых перемещения точки M_0 , сочетание которых формирует зону обслуживания, представлен на рисунке 3.2. Начальное положение точки M_0 при этом соответствует минимальным значениям длин исполнительных звеньев. Например, для формирования кривой $M_0 M_1$ звенья l_1, l_3, l_4 не изменяются и принимают минимальные значения, изменяется только звено l_2 от минимального до максимального значения. Аналогичным образом формируются остальные 11 кривых, ограничивающих область зоны обслуживания.

Траектории точек перемещения захвата M образуют шесть сферических поверхностей с центрами вращения в точках O, A, B, C . При пересечении этих поверхностей образуется фигура $M_0 \dots M_7$ (рисунок 3.3). Точки M_n ($n=0, 1, \dots, 7$) характеризуют крайние положения захвата манипулятора, где происходит изменение комбинаций движений штоков звеньев пространственного механизма [62].

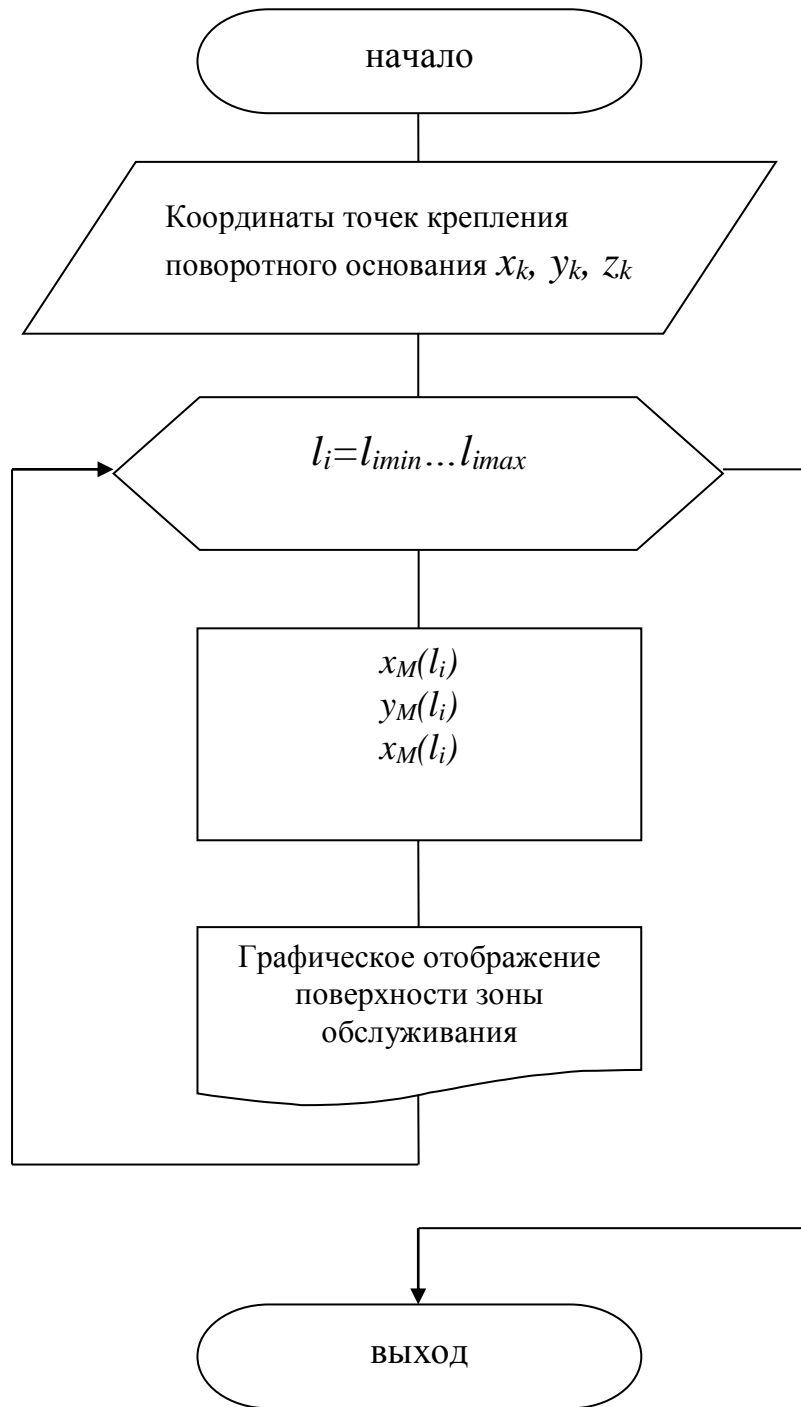
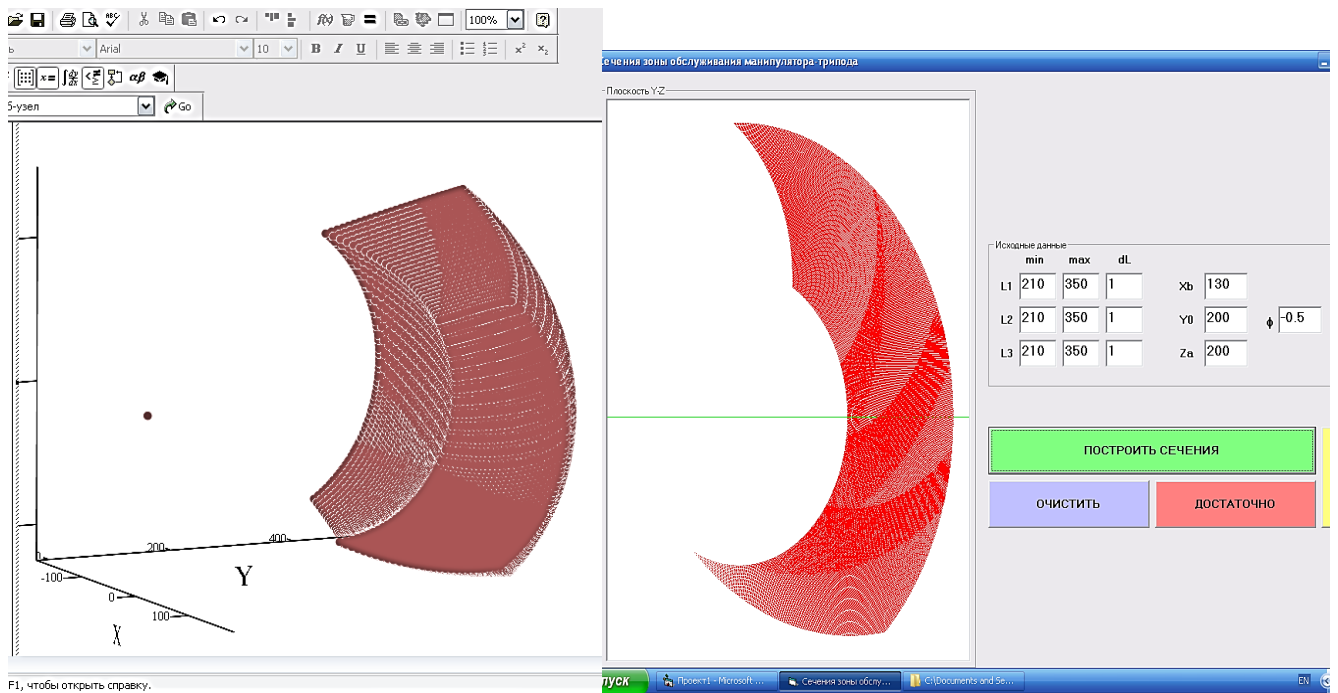


Рисунок 3.2 – Формализованный алгоритм формирования зоны обслуживания манипулятора параллельной структуры

На рисунке 3.3. представлены результаты реализации алгоритма построения зоны обслуживания манипулятора-трипода на подвижном основании.

Алгоритм формирования пространственной зоны обслуживания и сечений зоны обслуживания координатными плоскостями реализован в виде приложения *Windows* на языке *Visual Basic 6.0* (рисунок 3.3), (Приложение 4). Разработанные приложения позволяют моделировать зону обслуживания манипуляторов-триподов различных типоразмеров.

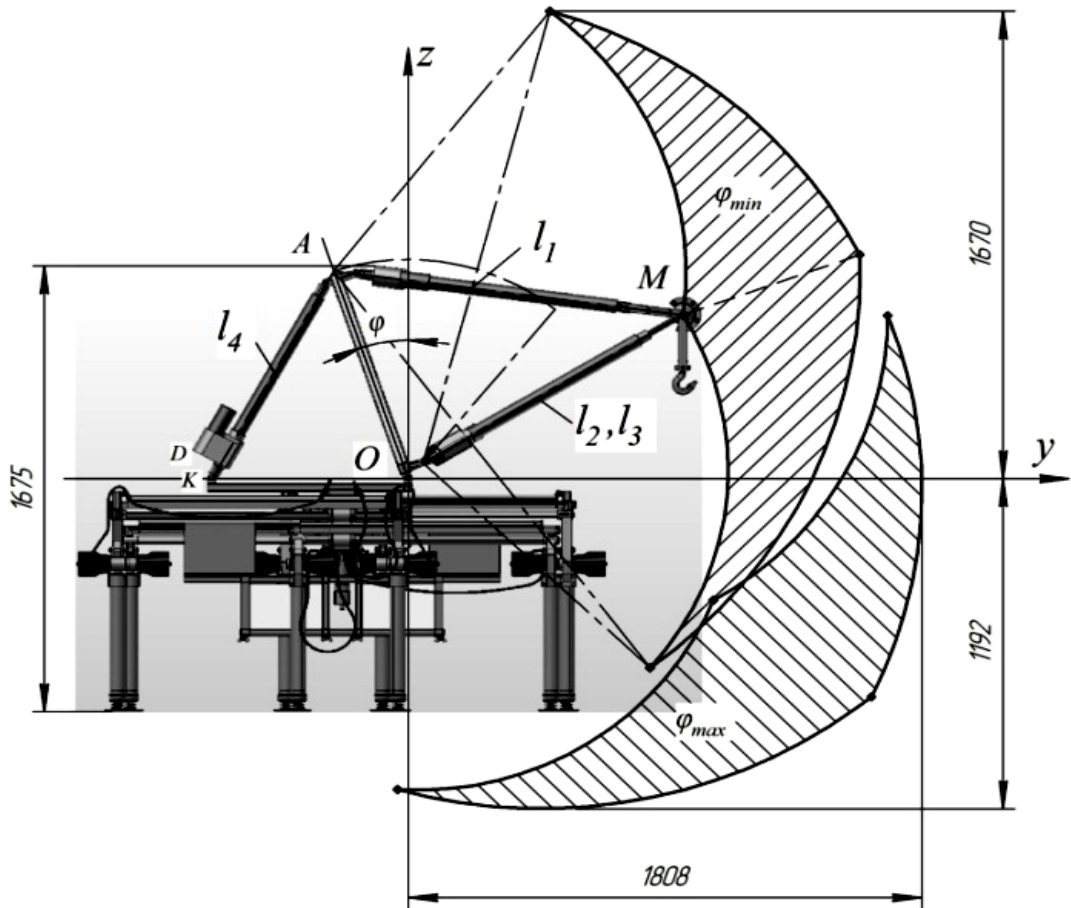


а)

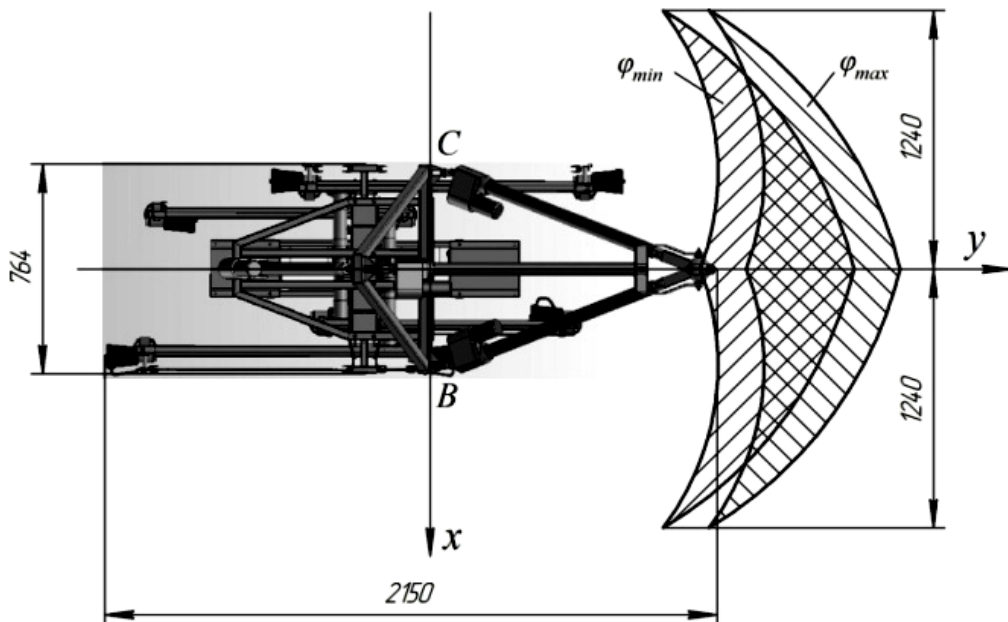
б)

Рисунок 3.3 –Реализация алгоритмов построения зоны обслуживания и её сечений: а) построение объемной зоны обслуживания в пакете *Mathcad*; б) построение сечений зоны обслуживания в разработанном приложении *Windows*

На рисунке 3.4 представлены сечения зоны обслуживания координатными плоскостями манипулятора-трипода на поворотном основании, установленного на шагающем шасси в составе робототехнического комплекса РШ-7 [206]. Для конкретного манипулятора (схема 7, таблица 2.1), размеры которого определялись по методике в разделе 2.6, объемная зона обслуживания вписывается в параллелепипед размерами 2832 мм × 1808 мм × 2480 мм.



a)



б)

Рисунок 3.4. Сечения зоны обслуживания манипулятора координатными плоскостями yOz (а) и xOy (б)

Зона обслуживания погрузочных манипуляторов параллельной структуры может быть расширена за счет введения в механизм дополнительных последовательных кинематических цепей. Однако следует учитывать, что увеличение объема зоны обслуживания манипулятора - трипода на подвижном основании возможно и за счет рационального выбора геометрических и кинематических параметров.

3.3. Геометрико-статические параметры манипулятора-трипода

Характер изменения усилий в стержнях l -координатного пространственного механизма манипулятора представляет интерес при планировании траекторий рабочего органа – захвата, с целью минимизации времени работы манипулятора в особо нагруженных участках зоны обслуживания.

Для погрузочных манипуляторов, основной технологической операцией которых является перемещение грузов, наибольшее внешнее влияние на элементы конструкции оказывает вес перемещаемого груза.

Ниже рассмотрен случай нагружения выходного звена - захвата манипулятора-трипода вертикальной силой. Статические нагрузки, действующие на исполнительные звенья манипулятора, зависят от текущих длин звеньев, а в конечном счете, от положения захвата (т. M). Для манипулятора-трипода усилия в линейных звеньях определяются из условия его равновесия, под действием пространственной системы сходящихся сил реакций $\overline{N}_1, \overline{N}_2, \overline{N}_3$ звеньев манипулятора под действием внешней силы G , приложенной к рабочему органу. Усилие \overline{N}_4 в звене l_4 определяется из условия равновесия точки A (рисунок 3.5).

Для определения параметров устойчивости манипулятора, режимов работы исполнительных приводов необходима информация о характере изменения нагрузок на его звенья при перемещении схвата в пределах объема зоны обслуживания. Анализ структурных, геометрических и кинематических параметров не даёт исчерпывающей информации о работоспособности

манипулятора, так как при геометрическом и кинематическом анализе чаще всего не учитываются зазоры в кинематических парах, жесткость звеньев, точность изготовления кинематических пар. Кроме того, следует учитывать, что в области особых положений и близких к ним, в механизме резко возрастают функции аналогов скоростей и ускорений исполнительных устройств, что влечет увеличение нагрузок на элементы конструкции и может приводить к заклиниванию подвижных звеньев (мертвое положение).

Силовой анализ всей конструкции разделен на два этапа: первоначально рассмотрена трехстержневая пространственная система - трипод, смонтированный на неподвижном поворотном основании, а следующим этапом учитывается поворот системы [61].

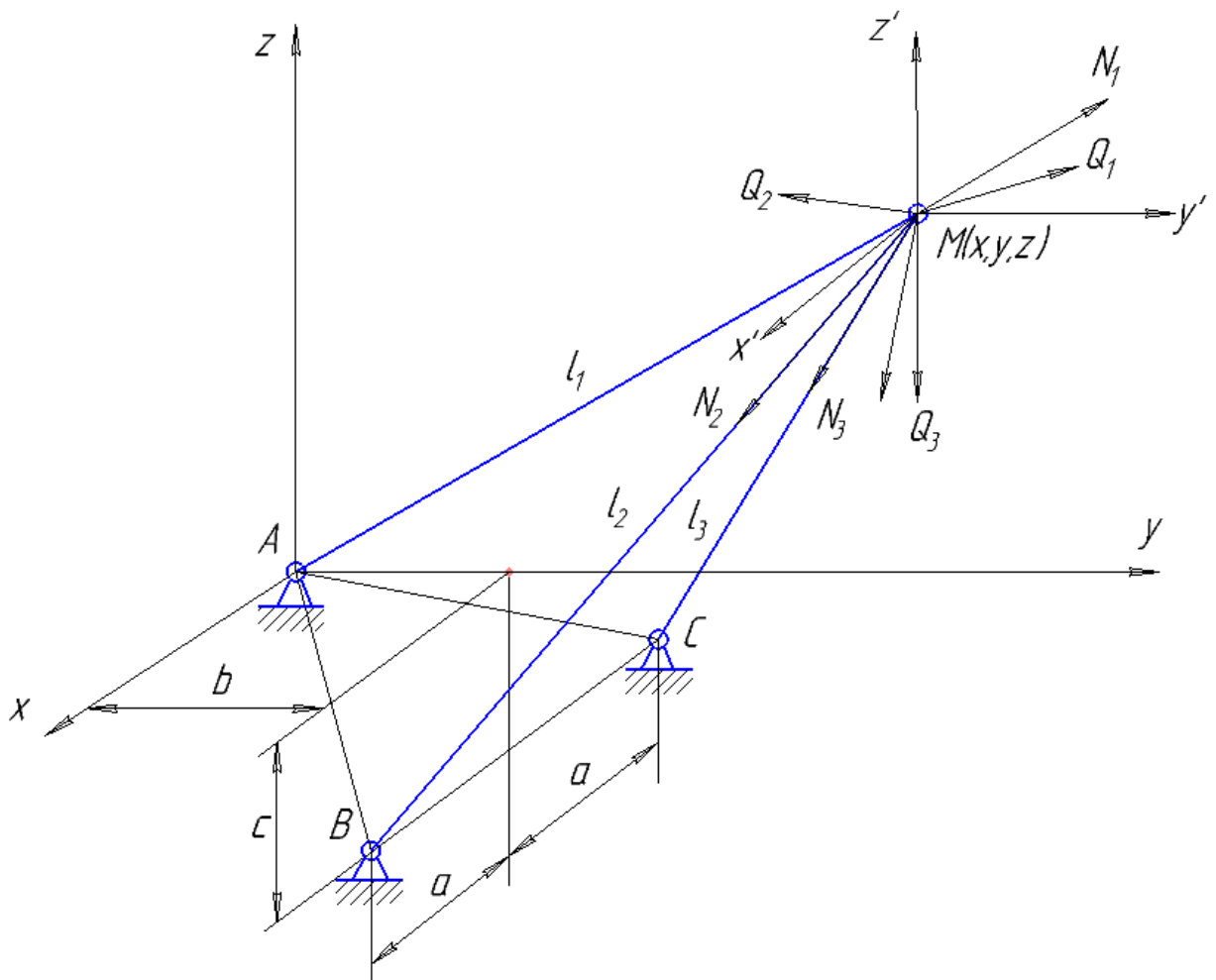


Рисунок 3.5 - Расчетная схема к силовому анализу манипулятора-трипода

Определение усилий в звеньях манипулятора-трипода сводится к разложению внешней силы на три направления в пространстве. Рассматривается общий случай, при котором внешняя сила направлена произвольно (рисунок 3.5), по отношению к осям координат, что позволяет учитывать наклон основания трипода $ABCM$.

Вводятся следующие обозначения: l_j - текущие значения длины актуаторов; N_j - усилия на штоках актуаторов; Q_j - проекции внешней силы на оси координат; x, y, z - координаты точки M пересечения осей симметрии актуаторов в системе координат $OXYZ$; a_{ij} - координаты точек крепления актуаторов на основании в системе координат $M(x'y'z')$ ($i=j=1, 2, 3$).

Внешняя сила приложена к вершине M трехстержневого узла. Силы, проходящие через эту точку, в системе координат $M(x'y'z')$ должны удовлетворять следующим условиям

$$\begin{cases} \varepsilon_{11}N_1 + \varepsilon_{12}N_2 + \varepsilon_{13}N_3 \pm Q_1 = 0; \\ \varepsilon_{21}N_1 + \varepsilon_{22}N_2 + \varepsilon_{23}N_3 \pm Q_2 = 0; \\ \varepsilon_{31}N_1 + \varepsilon_{32}N_2 + \varepsilon_{33}N_3 - Q_3 = 0. \end{cases} \quad (3.6)$$

где ε_{ij} - косинусы углов, образуемых цилиндрами с осями координат (направляющие косинусы): $i=j=1, 2, 3$.

Вводя новые неизвестные

$$P_j = \frac{N_j}{l_j} \quad (3.7)$$

и используя известные соотношения для направляющих косинусов и с учетом (3.7) система уравнений (3.6) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} a_{11}P_1 + a_{12}P_2 + a_{13}P_3 \pm Q_1 = 0; \\ a_{21}P_1 + a_{22}P_2 + a_{23}P_3 \pm Q_2 = 0; \\ a_{31}P_1 + a_{32}P_2 + a_{33}P_3 - Q_3 = 0. \end{cases} \quad (3.8)$$

Благодаря этому удается избежать предварительного определения направляющих косинусов. Коэффициентами при новых неизвестных являются

непосредственно координаты концов актуаторов в системе координат $M(x'y'z')$. В результате решения системы уравнений (3.8) перехода с помощью (3.7) и возвращения к системе координат $OXYZ$ полагая, что составляющие Q_1 и Q_2 имеют отрицательный знак, получаем:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{[(y-b)Q_3 - (z+c)Q_2]L_1}{bz+cy}; \\ N_2 = \frac{[(bz+cy)Q_1 + (az-cx)Q_2 - (ay+b)Q_3]L_2}{2a(bz+cy)}; \\ N_3 = -\frac{[(bz+cy)Q_1 - (az+cx)Q_2 + (ay-bx)Q_3]L_3}{2a(bz+cy)}. \end{cases} \quad (3.9)$$

При инженерных расчетах можно считать, что внешняя сила направлена вертикально: $Q_1=Q_2=0$; $Q_3=G$. Для уменьшения влияния этого допущения, а также для учета динамичности системы и, в частности, связанного с этим явления перераспределения усилий между исполнительными звеньями - актуаторами, введены коэффициенты k_D . Тогда зависимости (3.9) принимают вид:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{y-b}{bz+cy} k_D L_1 Q; \\ N_2 = -\frac{ay+bx}{2a(bz+cy)} k_D L_2 Q; \\ N_3 = -\frac{ay-bx}{2a(bz+cy)} k_D L_3 Q. \end{cases} \quad (3.10)$$

Как известно из кинематического анализа координаты вершины $M(x,y,z)$ являются функциями длин звеньев переменной длины. Усилия N_1 , N_2 , N_3 также являются функциями длины актуаторов и зависят от величины хода и последовательности перемещений штоков актуаторов, поскольку, в свою очередь $l_j = f(h_j)$, где h_j – текущее значение хода штока соответствующего актуатора.

При повороте основания, несущего трехстержневую пространственную систему - трипод, происходит перераспределение усилий в звеньях переменной длины. Найденные зависимости (3.8) и (3.9) справедливы для любого положения основания, если под размерами a , b , c определяющими положение опор A , O и B в системе координат основания $OXYZ$ (рисунок 3.5) понимать их текущие значения

в системе координат $O'X'Y'Z'$, оси которой параллельны к базовой системе отсчета $OXYZ$.

При практических расчетах, более удобно предполагать, используя принципы относительности, что система является неподвижной, а направление действия внешней силы Q изменяется, отклоняясь на угол φ , равный углу поворота основания (рисунок 3.6).

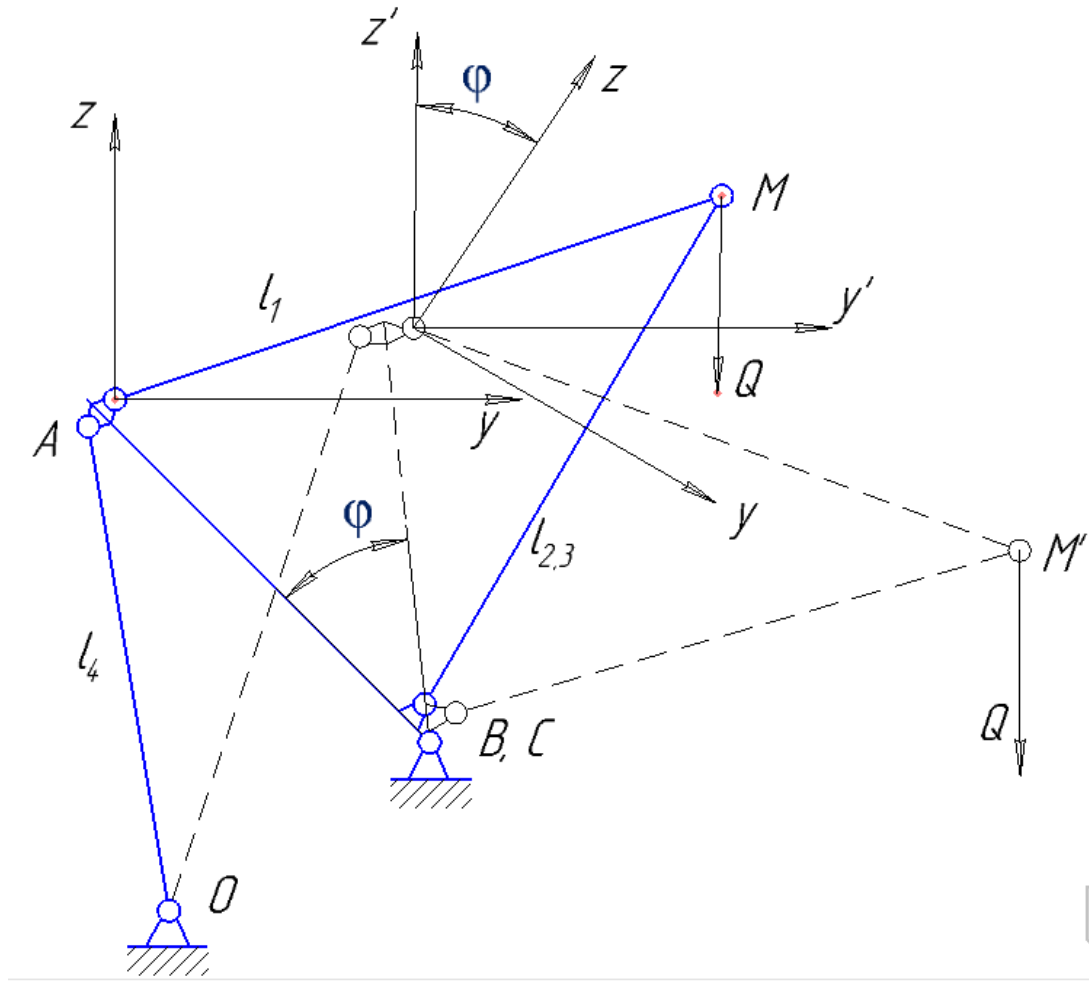


Рисунок 3.6 - К силовому анализу манипулятора-трипода при повороте его основания

В общем случае, когда внешняя сила задана своими проекциями Q_j на оси координат, их новые значения Q'_j определяются зависимостями:

$$Q'_1 = Q_1; \quad Q'_2 = Q_2 \sin \varphi; \quad Q'_3 = Q_3 \cos \varphi; \quad (3.11)$$

В результате силового анализа трехстержневой пространственной системы - трипода, проводимого с помощью формул (3.9) и (3.10) установлено, что усилие N_1 в верхнем актуаторе 1 (АМ) достигает максимального значения при перемещении вершины M в крайнее нижнее положение, что соответствует следующему сочетанию длин актуаторов:

$$l_1 = l_{\max}; \quad l_2 = l_{\min}; \quad l_3 = l_{\min}; \quad (3.12)$$

При наклоне основания с помощью актуатора 4 (ОА) происходит дальнейшее возрастание усилия N_1 .

Максимальные значения усилия N_2 и N_3 в нижних актуаторах принимают при перемещении вершины M в горизонтальной плоскости, когда длины актуаторов определяются зависимостями

$$l_1 = l_{\min}; \quad l_2 = l_{\min}; \quad l_3 = l_{\max}; \quad (3.13)$$

или

$$l_1 = l_{\min}; \quad l_2 = l_{\max}; \quad l_3 = l_{\min}.$$

При этом, если $N_2 = N_{2\max}$, то $N_3 = N_{3\min}$ и наоборот. Полученные зависимости, определяют распределение силового потока на звенья манипулятора – трипода и характера его изменения в зависимости от положения схвата в пространстве.

На рисунках 3.7 - 3.10 представлены законы изменения отношения усилий в звеньях манипулятора-трипода на подвижном основании к вертикальной силе, приложенной к выходному звену, при различных углах отклонения основания от вертикали. По сути, это отношение представляет собой весовой коэффициент C_i .

$$C_i = \frac{N_i}{G}. \quad (3.14)$$

Как видно из полученных зависимостей, усилия в звеньях манипулятора подвержены изменению знака осевой силы.

Вся процедура расчета весовых коэффициентов автоматизирована и реализована в виде алгоритма на языке *Visual Basic ver. 6.0* (Приложение 5).

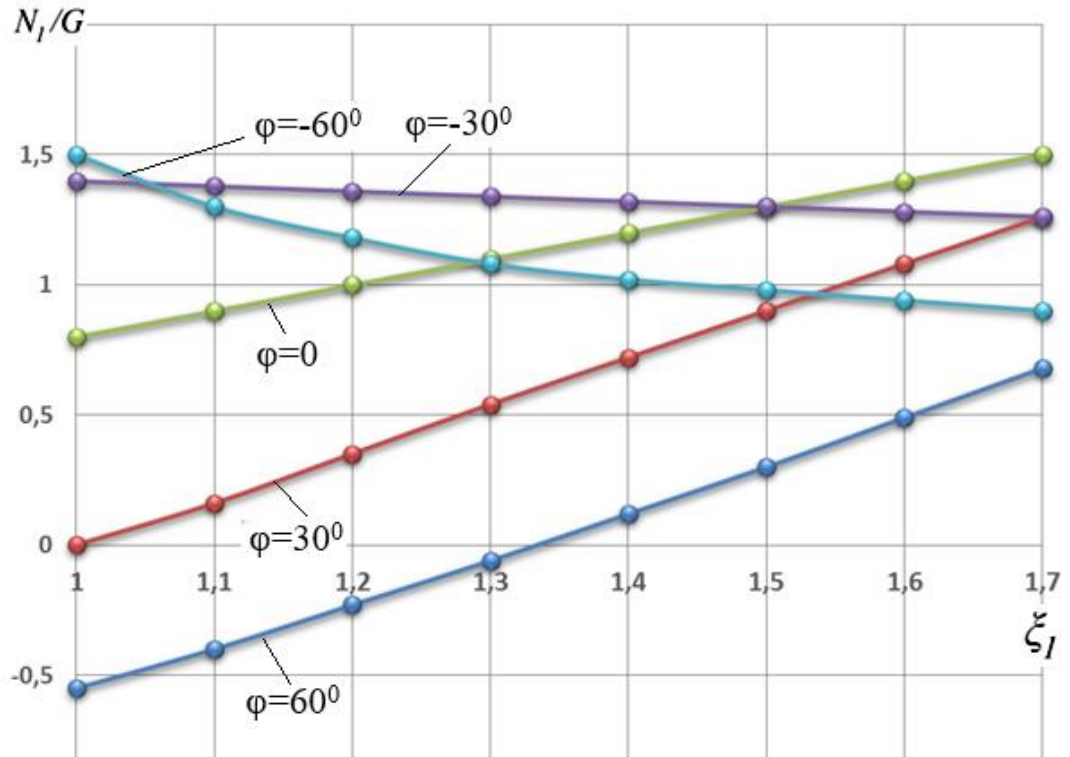


Рисунок 3.7 - Изменение отношения усилия в звене 1 к вертикальной силе, приложенной к захвату

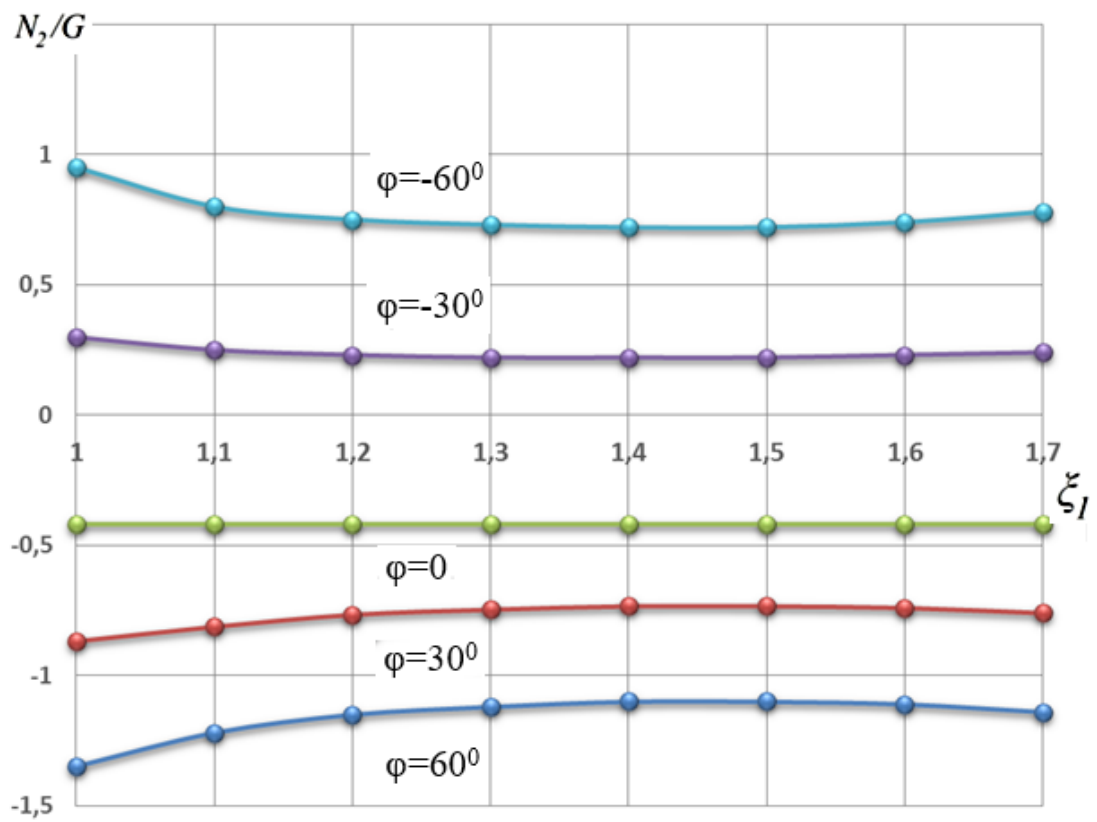


Рисунок 3.8 - Изменение отношения усилия в звене 2 к вертикальной силе, приложенной к захвату

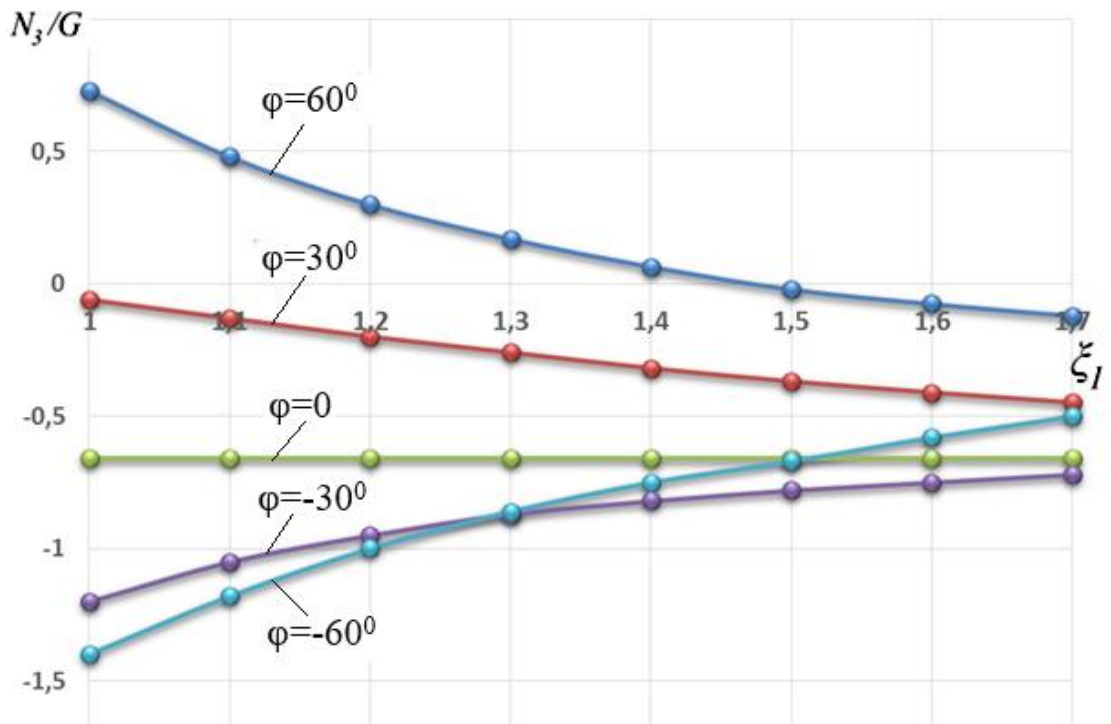


Рисунок 3.9 - Изменение отношения усилия в звене 3 к вертикальной силе, приложенной к захвату

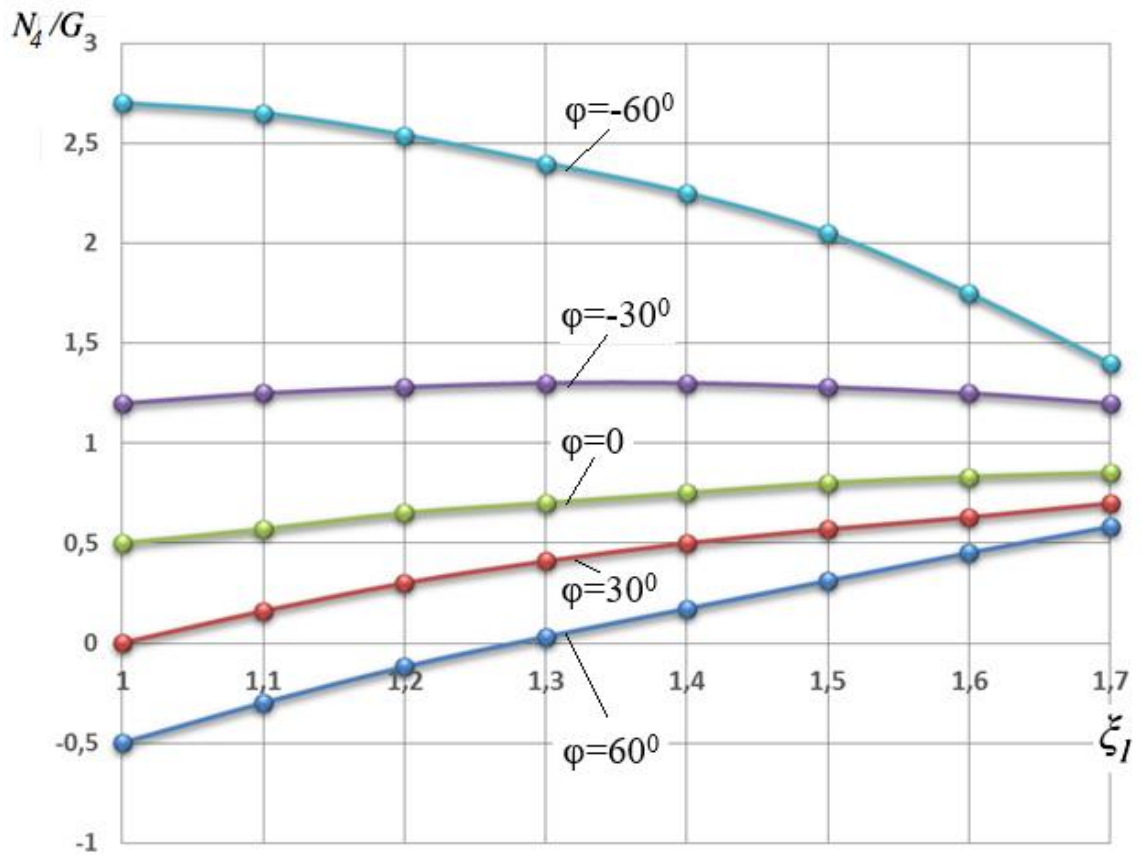


Рисунок 3.10 - Изменение отношения усилия в звене 4 к вертикальной силе, приложенной к захвату

Зная зону обслуживания и результаты расчетов весовых коэффициентов C_i , представляет интерес графическое отображение значений весовых коэффициентов на сечениях зоны обслуживания, которое представляет собой геометрико-статические характеристики манипулятора параллельно-последовательной структуры (рисунок 3.11).

На рисунках 3.11, а) и 3.11, б) представлены геометрико-статические характеристики манипулятора в выбранном сечении зоны обслуживания для звена l_2 и l_3 (рисунок 3.11, а). Вследствие симметричности конструкции манипулятора-трипода, нагружение второго и третьего звеньев идентичны в выбранном сечении.

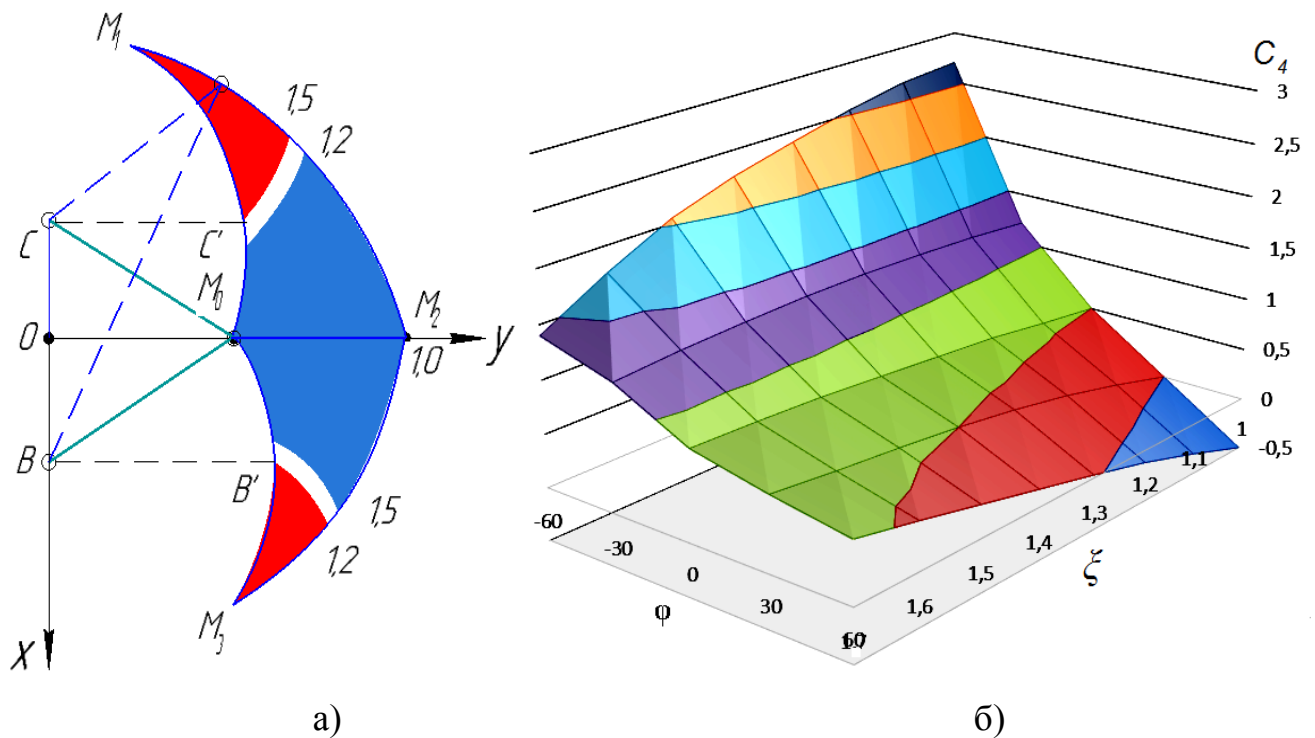


Рисунок 3.11 - Геометрико-статическая характеристика манипулятора-трипода в сечениях декартовыми плоскостями: а) в плоскости xOy ; б) поверхность, характеризующая изменение коэффициента C_4 от удлинения звена l_1 и угла наклона основания манипулятора-трипода φ

Для другого наиболее нагруженного звена 4, работающего только в одной плоскости, представляет интерес зависимость усилия, действующего на шток

исполнительного звена в зависимости от нагружения единичной силой и угла поворота основания манипулятора-трипода. Причем, наибольшие значения коэффициента C_4 принимает при наибольшем вылете захвата M , т.е. при длинах звеньев l_{1max} , l_{2max} , l_{3max} .

3.4. Кинематическая управляющая матрица

Обобщенными координатами захвата манипулятора приняты декартовы координаты $x(t), y(t), z(t)$ (рисунок 3.1), а обобщенными координатами манипулятора являются длины звеньев $l_k(t)$, $k=1\div 3$ и угол $\varphi(t)$ наклона основания манипулятора.

Уравнения связей между обобщенными координатами захвата и длинами звеньев $l_k(t)$, $k=1\div 4$ имеют вид [57, 63, 104]:

$$\begin{aligned} l_1(t) &= \sqrt{x^2 + (y + OA \cdot \sin \varphi)^2 + (z - OA \cdot \cos \varphi)^2}, \\ l_2(t) &= \sqrt{(x - OB)^2 + y^2 + z^2}, \\ l_3(t) &= \sqrt{(x + OB)^2 + y^2 + z^2}, \\ l_4(t) &= \sqrt{(OK - OA \cdot \sin \varphi)^2 + (OA \cdot \cos \varphi - DK)^2}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

где OA, OB, OK, DK - геометрические параметры основания манипулятора и точек его крепления на поворотном основании (рисунок 3.1).

Связь между вектором скоростей исполнительных управляющих звеньев и вектором проекций скоростей захвата манипулятора, и угловой скоростью поворотного основания, имеет вид [232]

$$\vec{V}_l = I \cdot \vec{V}_q, \quad (3.16)$$

где $\vec{V}_l = [\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4]^T$ - вектор скоростей исполнительных линейных звеньев манипулятора; $\vec{V}_q = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\varphi}]^T$ - вектор проекций скоростей захвата манипулятора и угловой скорости поворотного основания.

Функциональная управляющая матрица $I(x, y, z, \varphi)$ состоит из частных производных $a_{ij} = \frac{\partial l_i}{\partial q_j}$, $(i, j=1 \div 4)$ [178, 232].

$$I = \begin{pmatrix} \frac{x}{l_1} & \frac{(y + OA \sin \varphi)}{l_1} & \frac{(z - OA \cos \varphi)}{l_1} & \frac{OA(z \sin \varphi + y \cos \varphi)}{l_1} \\ \frac{x - OB}{l_2} & \frac{y}{l_2} & \frac{z}{l_2} & 0 \\ \frac{x + OB}{l_3} & \frac{y}{l_3} & \frac{z}{l_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{OA(DK \sin \varphi - OK \cos \varphi)}{l_4} \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

Необходимым и достаточным условием управляемости манипулятора является неравенство нулю [95, 139, 314] определителя матрицы (3.17).

Определитель матрицы I равен

$$\Delta_I = \frac{2OB \cdot OA^2}{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot l_4} (z \sin \varphi + y \cos \varphi)(DK \sin \varphi - OK \cos \varphi). \quad (3.19)$$

Отсюда следует, что определитель может равняться нулю в случае равенства нулю одного из сомножителей. Равенство нулю выражения $(z \sin \varphi + y \cos \varphi)$ возможно в случае вырождения тетраэдра $ABCM$ в плоскость $(y = z = 0)$ или в случае $y/z = -\operatorname{tg} \varphi$. Равенство нулю выражения $(DK \sin \varphi - OK \cos \varphi)$ означает, что четвертый исполнительный цилиндр (рисунок 3.1) находится в мертвом положении – проекции отрезков DK и OK на перпендикуляр OA равны. При выборе значений конструктивных параметров основания это условие необходимо учитывать. Таким образом, первый случай вырождения матрицы I относится непосредственно к манипулятору-триподу, а второй случай возможного особого положения, относится к поворотному основанию, на котором закреплены его звенья. Близость, рассматриваемого механизма к особым положениям возможно оценить сравнением требуемых затрат механической мощности исполнительных приводов с допустимыми параметрами [307, 308] приводов исполнительных звеньев манипулятора для некоторых «стандартных» законов позиционирования схвата. В этом случае

функционирования манипулятора учитывается взаимное влияние работы приводов и общие энергозатраты на перемещение захвата манипулятора.

Это обстоятельство следует учитывать для других компоновочных схем параллельно-последовательных манипуляторов. В целом, управляющая матрица является универсальной и может быть применима для схем манипуляторов по таблице 2.1.

3.5. Планирование траекторий погрузочного манипулятора

Эффективность использования погрузочной техники в различных отраслях экономики (строительство, сельское хозяйство, коммунальное хозяйство, транспортно-складские работы, разборка завалов при ликвидации чрезвычайных ситуаций и др.) напрямую зависит от производительности погрузочного агрегата, минимизации времени холостого позиционирования рабочего оборудования и применения оптимальных режимов погрузочно-разгрузочных работ. Одной из проблем погрузочно-разгрузочных работ со штучными грузами является повторяющиеся операции захвата и перемещения груза с последующим возвратом исполнительного органа (крюка, захвата) в первоначальное положение для следующего цикла работ. При таком режиме работы, если манипулятором управляет человек-оператор, происходит быстрая утомляемость оператора и вероятность появления ошибок позиционирования. Эту проблему можно решить автоматизацией большей части погрузочно-разгрузочных операций при перемещении грузов по заранее определенным траекториям.

Например, задачу погрузки – разгрузки контейнеров в какой-то степени можно считать организованной вследствие использования стандартных и однотипных контейнеров, однако расположение контейнеров относительно друг друга и относительно погрузочного агрегата является задачей неорганизованной среды [150, 222, 303].

Траектория перемещения рабочего органа манипулятора является одним из задающих воздействий для управления приводами. Реализация требуемой

траектории в режиме реального времени с учетом возможных конфигураций манипулятора может быть выполнена при отсутствии динамических и статических препятствий, находящихся на участке траектории [277].

Планирование траекторий перемещения груза необходимо проводить таким образом, чтобы при выполнении погрузочно-разгрузочных операций исключить или минимизировать глобальные перемещения шасси погрузочного агрегата. Рациональной траекторией является прямая, однако не всегда такая траектория перемещения является возможной, поэтому при планировании траекторий следует руководствоваться и другими критериями, например, скоростью перемещения, минимизацией работы, затрачиваемой на перемещение груза, по возможности исключения перемещения груза близ границ зоны обслуживания манипулятора, где, как правило, реализуются повышенные нагрузки на металлоконструкцию манипулятора и шасси. В зависимости от технологического процесса, перемещение захвата погрузочного манипулятора может происходить по прямой или кусочно-линейным траекториям (рисунок 3.12).

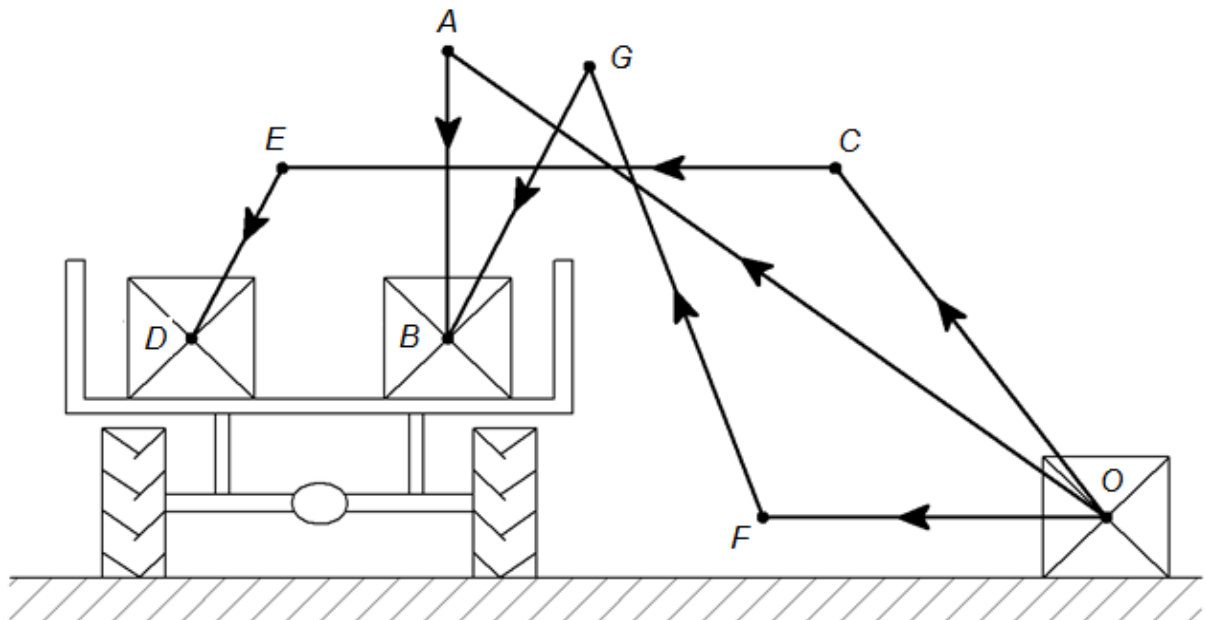


Рисунок 3.12 - Возможные кусочно-линейные траектории погрузки контейнеров манипулятором

На практике не всегда возможно перемещение по прямой, в этом случае возможны траектории по дуге окружности $\overset{\smile}{CB}$ (рисунок 3.13), параболе или гиперболе, в том числе и двояковыпуклой кривой $\overset{\smile}{OD}$ (рисунок 3.13), либо по более сложной, комбинированной траектории $\overset{\smile}{OB}$, состоящей из нескольких участков (рисунок 3.13). Любую сложную траекторию можно разбить узловыми точками на элементарные участки, описываемые простыми функциями.

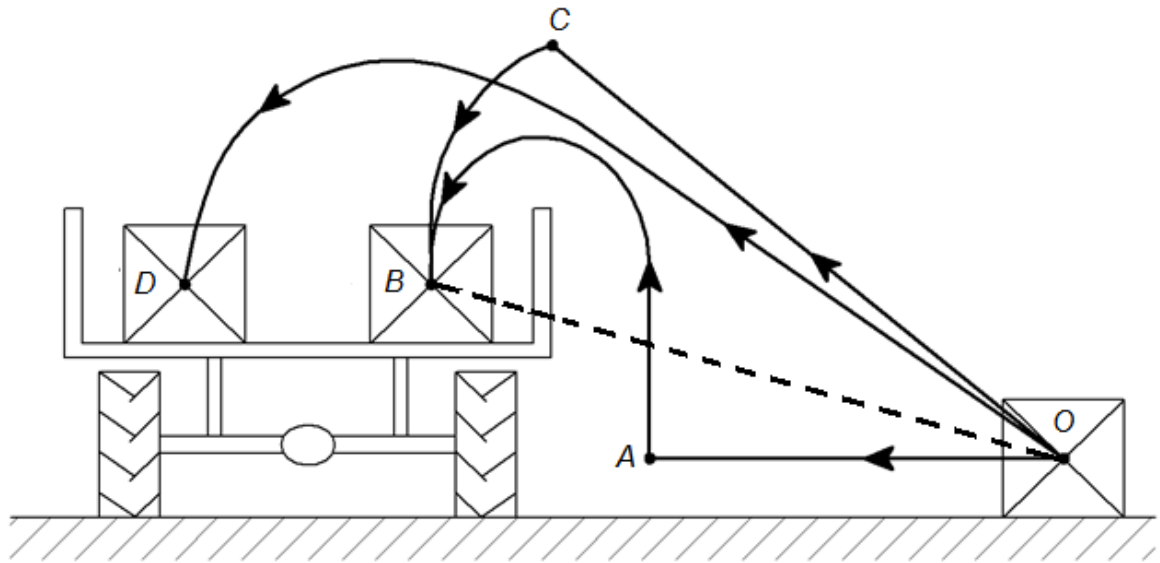


Рисунок 3.13 - Возможные кусочно-линейные-криволинейные траектории погрузки контейнеров манипулятором

Планирование траекторий захвата манипулятора напрямую зависит от технологического процесса. При выполнении роботом-манипулятором погрузочно-разгрузочных работ, например, погрузки контейнеров в транспортное средство (рисунок 3.13) возникает ряд неопределенностей:

1. Начальная точка O и конечная B (или D) не находятся в зоне прямой видимости, следовательно, возникает задача обхода препятствий и планирования кусочной траектории, и расстановки узловых точек, либо необходимо задавать криволинейную траекторию для обхода бортов транспортного средства.

2. Погрузка контейнеров в транспортное средство подразумевает постепенное заполнение полезного объема кузова, вследствие чего конечная

точка позиционирования B непостоянна (переходит в точку D). Отсюда следует, что длина первоначально избранной траектории может увеличиваться или уменьшаться. В этом случае может изменяться и сама траектория. Например, для перемещения груза из точки O в точку B – траектория может быть кусочной с узловой точкой C для обхода препятствия – борта кузова, т.е. $\overset{\circ}{OB} = \overset{\circ}{OA} + \overset{\circ}{AB}$. Для случая перемещения груза из точки O в точку D траектория сплошная, криволинейная.

3. По аналогии с п.2 начальная точка O также не всегда остается постоянной (постоянна она только в случае захвата контейнера с полотна транспортера).

Рассмотрим два варианта траекторий погрузки груза (рисунок 3.14). В обоих случаях подъем груза можно однозначно описать прямой траекторией AB . На первый взгляд рациональным является перемещение груза по дуге BE , т.к. длина её меньше суммы отрезков BC и CE . Однако перемещению груза по дуге могут мешать борта кузова или рядом расположенные в кузове грузы. В результате полная траектория перемещения груза манипулятором будет представлять комбинированную кривую, участками которой чаще всего являются прямые отрезки.

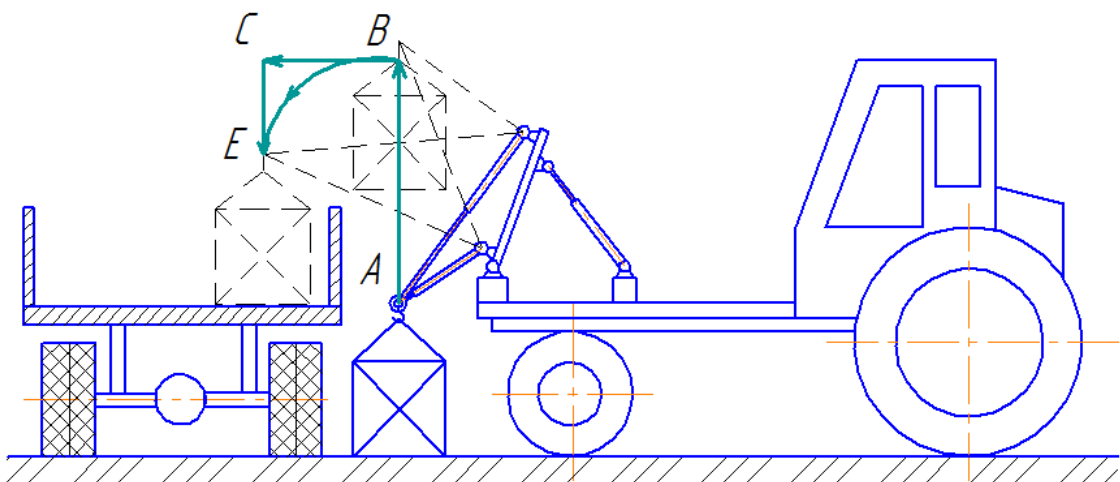


Рисунок 3.14 - Схема операции погрузки груза по возможным траекториям

Из выше изложенного следует, что при выполнении погрузочно-разгрузочных работ со штучными грузами, без использования транспортеров, длина траектории и её форма не являются постоянными. Соответственно, законы движения по траектории также могут различаться, как для отдельных участков, так и в целом. Поэтому при планировании траекторий для описанных случаев технологического процесса грузопереработки следует неизменно выбирать только участки глобального перемещения груза. Желательно, проектировать технологический процесс таким, чтобы траектория по большей её части и закон движения были одинаковы для всех циклов рабочего и холостого перемещения захвата манипулятора.

Общая задача перемещения исполнительного элемента (захвата) разделяется на три этапа – позиционирование захвата манипулятора, синтез траектории захвата в пространстве, ограниченном зоной обслуживания с учетом особенностей технологического процесса и определение либо синтеза закона движения по полученной (заданной) траектории [30, 46, 82, 97, 103, 248, 284, 305, 356, 374]. При планировании траекторий для конкретного технологического процесса следует учитывать такие важные характеристики манипуляторов как маневренность и манипулятивность.

3.6. Позиционирование манипулятора параллельно-последовательной структуры

Как было показано ранее в главе 2, большинство предложенных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода обладают ненулевой маневренностью в базовой плоскости, вследствие чего задача позиционирования осложняется множеством возможных конфигураций механической системы.

Задача позиционирования захвата манипулятора при выполнении технологических операций состоит в перемещении его из начального состояния, которое определяется координатами точки $M_0(x_{M_0}, y_{M_0}, z_{M_0})$ в конечное положение

$M_k(x_{Mk}, y_{Mk}, z_{Mk})$. То есть, при известной начальной конфигурации манипулятора, определяемой обобщёнными координатами l_{i0} , требуется найти конечную конфигурацию - значения обобщённых координат l_{ik} .

Число обобщённых координат манипулятора (рисунок 3.1) l_i , равное четырём, превышает число обобщённых координат захвата (x_M, y_M, z_M) , равное трём, то есть манипулятор обладает ненулевой маневренностью, и заданному конечному положению объекта соответствует множество конфигураций системы (рисунок 3.1). Длины звеньев l_1, l_2, l_3, l_4 определяются однозначно выражениями (3.15).

Предполагая, что начальная конфигурация системы задана и требуется найти конечную конфигурацию при значениях длин цилиндров l_{ik} и угле наклона основания трипода φ_k , соответствующую заданному конечному положению объекта, т.е. удовлетворяющую условиям

$$\begin{aligned} f_1(l_{ik}, \varphi_k) &= x_M(l_{ik}, \varphi) - x_{Mk} = 0 \\ f_2(l_{ik}, \varphi_k) &= y_M(l_{ik}, \varphi) - y_{Mk} = 0 \\ f_3(l_{ik}, \varphi_k) &= z_M(l_{ik}, \varphi) - z_{Mk} = 0 \end{aligned} \quad (3.19),$$

Для решения поставленной задачи минимизируется квадратичная функция [29, 145, 165]

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 C_i (l_{ik} - l_{i0})^2 + \frac{1}{2} C_4 (\varphi_k - \varphi_0)^2 \quad (3.20).$$

На обобщённые координаты манипулятора наложены конструктивные ограничения

$$l_{i \min} \leq l_{ik} \leq l_{i \max} \text{ и } \varphi_{\min} \leq \varphi_k \leq \varphi_{\max} \quad (3.21)$$

В качестве весовых коэффициентов C_i принято отношение вертикальной нагрузки, приложенной к точке M , к усилию в i -том звене переменной длины. Из всех звеньев, наиболее нагруженными являются l_1 и l_4 , значения весовых коэффициентов C_1, C_4 принимаются тем больше, чем больше диапазон изменения усилий в соответствующих звеньях манипулятора [55, 60, 67]. По сути, весовой

коэффициент, это есть отношение усилия в линейном приводе N_i к усилию, приложенному к рабочему органу G в каждой точке обслуживаемого объёма $C_i=N_i/G$.

Тогда целевая функция, в соответствии с методом Лагранжа, имеет вид

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 C_i (l_{ik} - l_{i0})^2 + \frac{1}{2} C_4 (\varphi_k - \varphi_0)^2 + \sum_{n=1}^3 \lambda_n f_n \quad (3.22)$$

где λ_n – неопределённые множители Лагранжа.

Так как минимизируемая квадратичная функция Φ (3.20) выпуклая, и ограничения (3.21) представлены в виде неравенств, то имеем выпуклую задачу оптимизации, которую сводится к решению системы уравнений методом неопределённых множителей Лагранжа [104, 163, 165, 230].

Значения l_{ik} , φ_k определяются из необходимых условий минимума целевой функции Φ^*

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial l_{ik}} = C_i (l_{ik} - l_{i0}) + \sum_{n=1}^3 \lambda_n \frac{\partial f_n}{\partial l_{ik}} = 0, \quad i=1, 2, 3 \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial \varphi_k} = C_4 (\varphi_k - \varphi_0) + \sum_{n=1}^3 \lambda_n \frac{\partial f_n}{\partial \varphi_k} = 0.$$

Система нелинейных уравнений служит для определения оптимальных значений l_1 , l_2 , l_3 , φ , определяющих положение точки M манипулятора и значений множителей Лагранжа λ_1 , λ_2 , λ_3

$$f_1 = \frac{l_3^2 - l_2^2}{4x_B} - x_{Mk} = 0 \quad (3.24)$$

$$f_2 = y_0 + \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\varphi) - \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \sin(\varphi) - y_{Mk} = 0 \quad (3.25)$$

$$f_3 = \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(\varphi) + \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \cos(\varphi) - z_{Mk} = 0 \quad (3.26)$$

$$C_1 (l_{1k} - l_{10}) + \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial l_1} + \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial l_1} + \lambda_3 \frac{\partial f_3}{\partial l_1} = 0 \quad (3.27)$$

$$C_2(l_{2k} - l_{20}) + \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial l_2} + \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial l_2} + \lambda_3 \frac{\partial f_3}{\partial l_2} = 0 \quad (3.28)$$

$$C_3(l_{3k} - l_{30}) + \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial l_3} + \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial l_3} + \lambda_3 \frac{\partial f_3}{\partial l_3} = 0 \quad (3.29)$$

$$C_4(\varphi_k - \varphi_0) + \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} + \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial \varphi} + \lambda_3 \frac{\partial f_3}{\partial \varphi} = 0 \quad (3.30)$$

Частные производные $\frac{\partial f_i}{\partial l_i}$ и $\frac{\partial f_i}{\partial \varphi}$ в аналитической записи представлены

выражениями [120]

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial l_1} &= 0, & \frac{\partial f_1}{\partial l_2} &= -\frac{l_2}{2x_B}, & \frac{\partial f_1}{\partial l_3} &= \frac{l_3}{2x_B}, & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} &= 0, \\ \frac{\partial f_2}{\partial l_1} &= \frac{l_1 \cdot \cos(\varphi)}{\sqrt{\left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]}}, & \frac{\partial f_2}{\partial l_2} &= \frac{l_2 \cdot \cos(\varphi) \cdot (l_2^2 - l_3^2)}{8x_B^2 \sqrt{\left[\frac{(l_2^2 - l_3^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]}}, \\ \frac{\partial f_2}{\partial l_3} &= \frac{l_3 \cdot \cos(\varphi) \cdot (l_3^2 - l_2^2)}{8x_B^2 \sqrt{\left[\frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]}}, & \frac{\partial f_3}{\partial l_1} &= \frac{l_1 \cdot \sin(\varphi)}{\sqrt{\left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]}}, \\ \frac{\partial f_3}{\partial l_2} &= \frac{l_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot (l_2^2 - l_3^2)}{8x_B^2 \sqrt{\left[\frac{(l_2^2 - l_3^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]}}, & \frac{\partial f_3}{\partial l_3} &= \frac{l_3 \cdot \sin(\varphi) \cdot (l_3^2 - l_2^2)}{8x_B^2 \sqrt{\left[\frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]}}, \\ \frac{\partial f_2}{\partial \varphi} &= \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(\varphi) - \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \cos(\varphi), \\ \frac{\partial f_3}{\partial \varphi} &= \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16x_B^2} - \frac{(A - x_B^2 - z_A^2)^2}{4z_A^2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\varphi) - \left(\frac{A - x_B^2 + z_A^2}{2z_A} \right) \cdot \sin(\varphi). \end{aligned} \quad (3.31)$$

Подставляя значения X_M, Y_M, Z_M из уравнений (3.7) в уравнения (3.19), и решая его совместно с уравнениями (3.15), находим значения $l_{1k}, l_{2k}, l_{3k}, \varphi_k, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

При этом, если для l_{1k} , l_{2k} , l_{3k} , φ_k получается несколько решений, выбор оптимального определяется подстановкой решений в уравнение (3.20) и сравнением значений оптимизируемого функционала.

На рисунке 3.17 представлены результаты решения задачи позиционирования для конкретного манипулятора параллельно-последовательной структуры (рисунок 3.1) и для начальных значений обобщенных координат $l_{10}=1400$ мм, $l_{20}=1500$ мм, $l_{30}=1352$ мм, $l_{40}=911,895$ мм. Этим обобщённым координатам, полученным из показаний датчиков положения, соответствуют координаты захвата $x_{M0}=-297,25$ мм, $y_{M0}=1129,71$ мм, $z_{M0}=740,49$ мм. Зная начальные значения координат захвата и длин звеньев манипулятора, из системы уравнений (3.7) определяются координаты точки A: $y_{A0}=238,06$ мм; $z_{A0}=711,21$ мм.

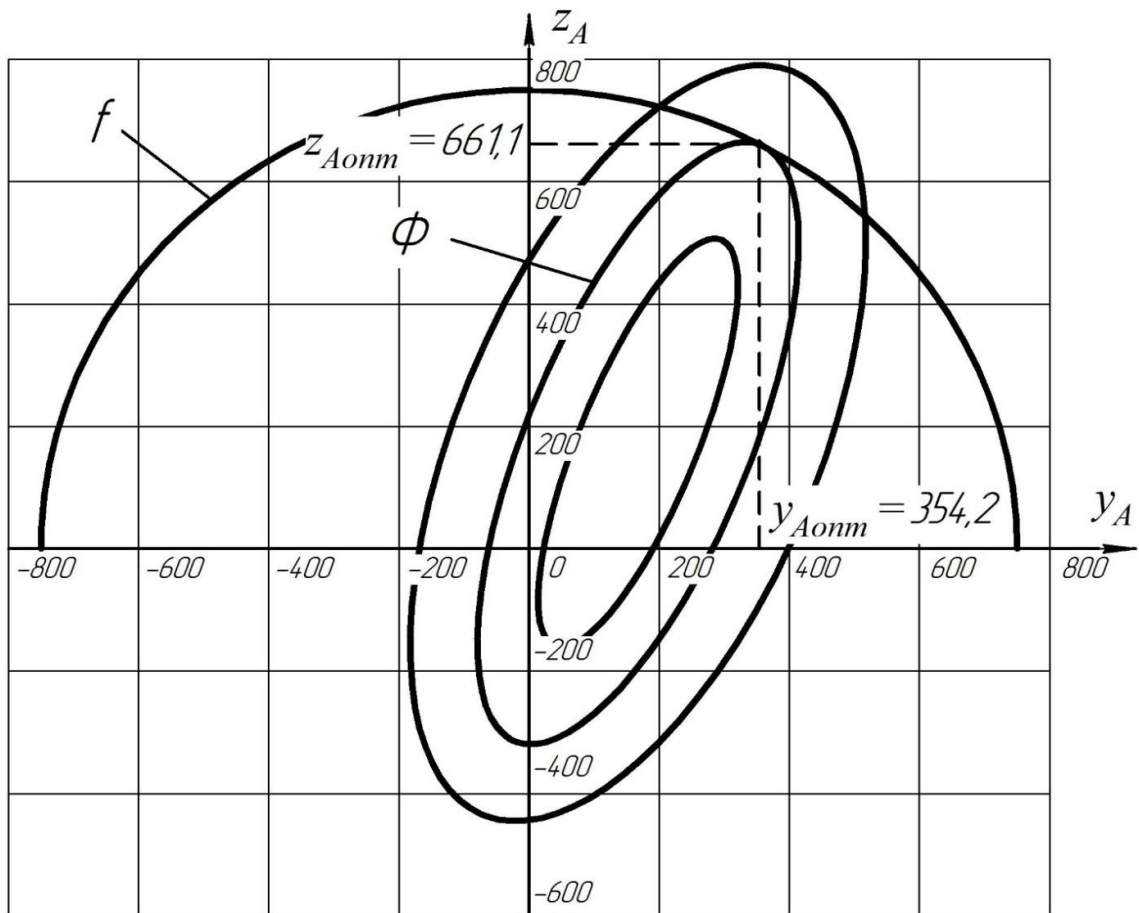


Рисунок 3.17 – Графическое представление решения оптимизационной задачи позиционирования

Задавшись конечными значениями координат захвата ($x_{Mk}=300$ мм, $y_{Mk}=1500$ мм, $z_{Mk}=-600$ мм), из уравнений (3.15) определяются конечные

положения длин звеньев l_{2k} и l_{3k} , и затем из условия минимума квадратичной функции (3.23) с ограничением (3.21), находятся координаты $y_{Ak}=354,24$ мм и $z_{Ak}=661,07$ мм в конечной конфигурации.

После решения задачи позиционирования, необходимо решить задачу определения траектории и законов перемещения захвата по траектории, то есть законов изменения обобщённых координат $l_i(t)$.

3.7. Обеспечение требуемой траектории захвата манипулятора-трипода

Особенность конструкции манипуляторов-триподов не позволяет парциальными движениями обеспечить движение захвата по прямой траектории, а задачи перемещения по прямой линии часто возникают в различных технологических процессах при перемещении грузов, тем более что прямая, это наиболее оптимальная по времени перемещения траектория.

Для задания движения захвата манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода совместно решается система уравнений (3.3) и уравнение прямой в пространстве, проходящей через две точки с координатами x_{M1}, y_{M1}, z_{M1} и x_{M0}, y_{M0}, z_{M0} [104, 111, 247]

$$\frac{x_M - x_{M0}}{\Delta x} = \frac{y_M - y_{M0}}{\Delta y} = \frac{z_M - z_{M0}}{\Delta z} \quad (3.32)$$

где $\Delta x = x_{M1} - x_{M0}$, $\Delta y = y_{M1} - y_{M0}$, $\Delta z = z_{M1} - z_{M0}$, а $\vec{u}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ - направляющий вектор прямой, коллинеарный отрезку M_0M_1 .

В результате получена система уравнений

$$\begin{cases} S^2 K + 2S \left(\frac{x_{M0}}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0} - z_A}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2z_A z_{M0} + z_A^2 = l_1(S)^2, \\ S^2 K + 2S \left(\frac{x_{M0} - x_B}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0}}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2x_B x_{M0} + x_B^2 = l_2(S)^2, \\ S^2 K + 2S \left(\frac{x_{M0} - x_C}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0}}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2x_C x_{M0} + x_C^2 = l_3(S)^2. \end{cases} \quad (3.33)$$

где S – длина участка на прямой траектории;

K_X, K_Y, K_Z – коэффициенты, зависящие от начальной и конечной конфигурации манипулятора;

$K = \frac{1}{K_X^2} + \frac{1}{K_Y^2} + \frac{1}{K_Z^2}$ и $L_{M0} = x_{M0}^2 + y_{M0}^2 + z_{M0}^2$ – константы, зависящие от начальной и конечной конфигурации системы

Программное перемещение захвата по прямолинейной траектории задает только траекторию движения захвата, поэтому важно обеспечить движение по заданной траектории по требуемому закону. Одним из таких законов может быть закон «мягкого» трогания и останова [36, 51, 145, 228, 272, 336, 347], заключающийся в выполнении условия равенства нулю скорости и ускорения в момент трогания и останова.

Такому требованию удовлетворяет, например, синусоидальный закон программного перемещения захвата по траектории [104, 145]

$$S(t) = S_0 + (S_K - S_0) \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \quad (3.34)$$

где S_K – длина траектории, м; t – текущее время движения, с; T – конечное время движения, с.

Так как изначально принимаем $S_0=0$, то

$$S(t) = S_K \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \quad (3.35)$$

Перемещение захвата из начального положения, точки с координатами x_{M0}, y_{M0}, z_{M0} , в конечное положение, в точку с координатами x_M, y_M, z_M возможно обеспечить, и применяя какой-либо закон изменения длин исполнительных звеньев. В этом случае, траектория захвата заранее неизвестна.

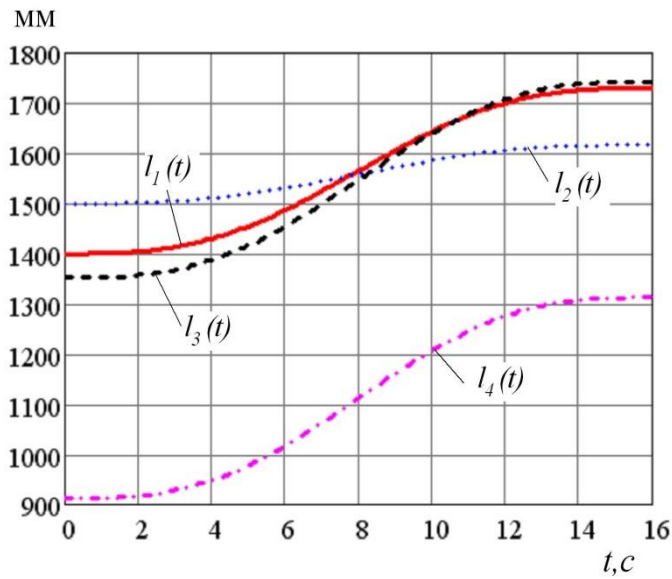
С учётом закона движения по прямолинейной траектории (3.35), выражения (3.33) примут вид

$$\left\{ \begin{array}{l} S_k^2 K \left[\frac{t^2}{T^2} - \frac{t \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{\pi T} + \frac{\sin^2\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{4\pi^2} \right] + 2S_k \left[\frac{t}{T} - \frac{\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{2\pi} \right] \cdot \left(\frac{x_{M0}}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0} - z_A}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2z_A z_{M0} + z_A^2 = l_1(S)^2, \\ S_k^2 K \left[\frac{t^2}{T^2} - \frac{t \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{\pi T} + \frac{\sin^2\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{4\pi^2} \right] + 2S_k \left[\frac{t}{T} - \frac{\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{2\pi} \right] \cdot \left(\frac{x_{M0} - x_B}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0}}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2x_B x_{M0} + x_B^2 = l_2(S)^2, \\ S_k^2 K \left[\frac{t^2}{T^2} - \frac{t \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{\pi T} + \frac{\sin^2\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{4\pi^2} \right] + 2S_k \left[\frac{t}{T} - \frac{\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)}{2\pi} \right] \cdot \left(\frac{x_{M0} - x_C}{K_X} + \frac{y_{M0}}{K_Y} + \frac{z_{M0}}{K_Z} \right) + L_{M0} - 2x_C x_{M0} + x_C^2 = l_3(S)^2. \end{array} \right. \quad (3.36)$$

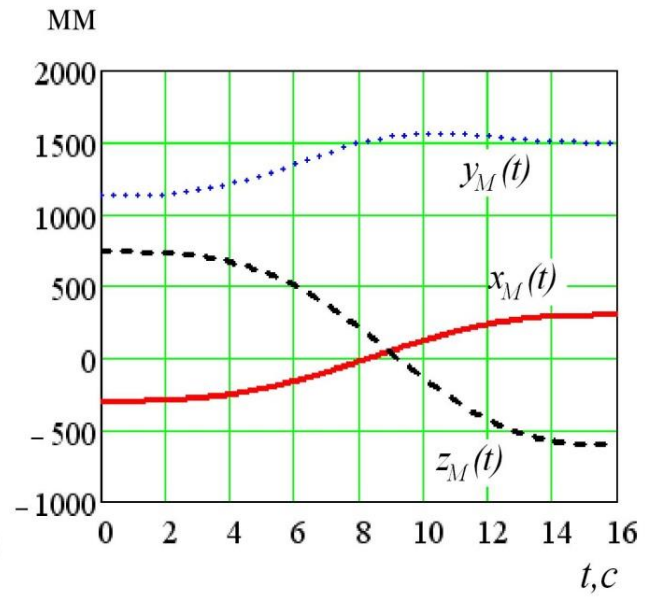
Для случая обеспечения движения захвата по заранее неопределённой траектории, но по синусоидальному закону (3.34), следует принимать время движения штоков актуаторов одинаковым, учитывая, что ходы штоков каждого актуатора различны. При этом следует вводить коэффициент запаса времени, учитывающий непостоянство скорости движения штока линейного привода на участках разгона и торможения [334, 335, 357].

Характер изменения обобщенных и декартовых координат захвата манипулятора по заранее неизвестной траектории при синусоидальном законе перемещения штоков исполнительных приводов представлен на рисунке 3.18. Характер изменения обобщённых и декартовых координат по прямолинейной траектории при синусоидальном законе перемещения штоков приводов приведено на рисунке 3.19.

Как видно из графиков на рисунках 3.18 и 3.19 при реализации перемещения захвата по неопределённой траектории происходит монотонное увеличение значений обобщенных координат. При реализации же перемещения захвата по прямой для звеньев переменной длины l_1 , l_2 и l_3 наблюдается сначала уменьшение величин обобщенных координат, а затем их увеличение, т.е. происходит изменение знака относительных линейных скоростей исполнительных звеньев.

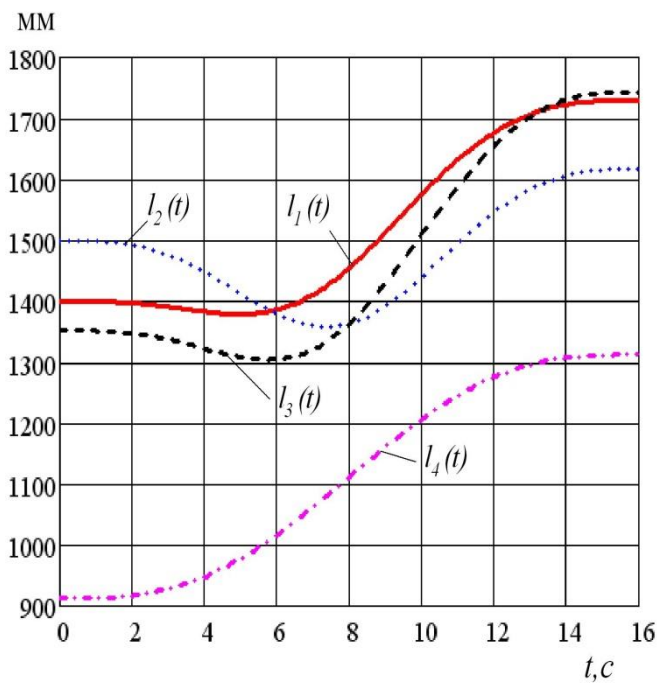


а)

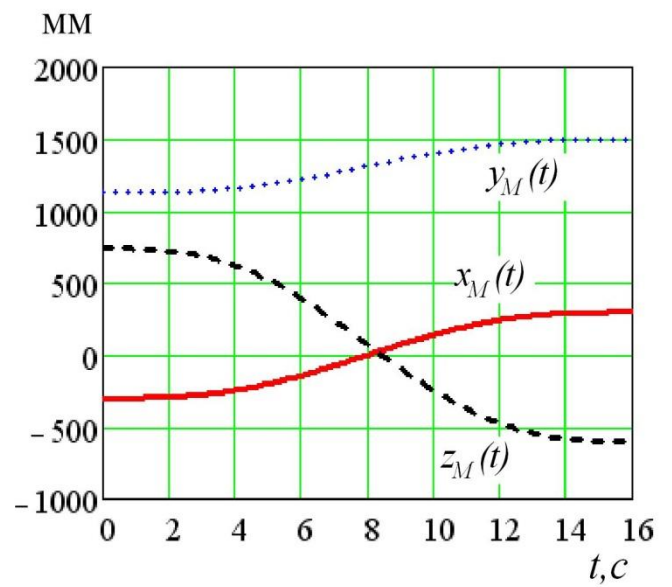


б)

Рис. 3.18. Характер изменения обобщенных (а) и декартовых (б) координат по времени при синусоидальном законе перемещения штоков актуаторов при перемещении захвата по неопределенной траектории



а)



б)

Рис. 3.19. Характер изменения обобщенных (а) и декартовых (б) координат по времени при синусоидальном законе перемещения штоков актуаторов при перемещении захвата по прямой

После решения задачи позиционирования и перемещения захвата по прямой, задавшись требованием изменения обобщённых координат по условию «мягкого» трогания и останова и по заранее неизвестной траектории строятся проекции траектории захвата на координатные плоскости (рисунок 3.20) и в пространстве (рисунок 3.21).

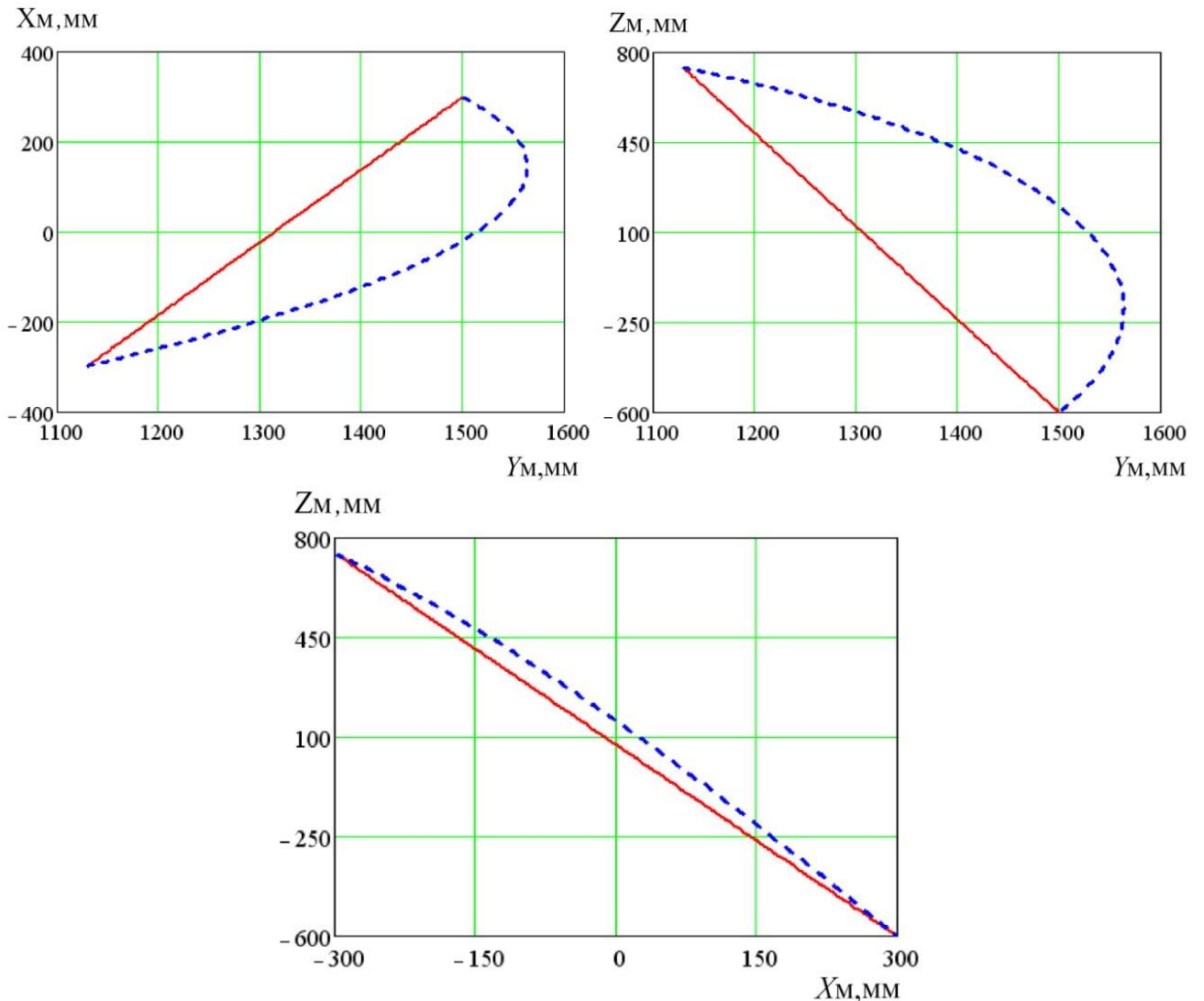


Рисунок 3.20 - Проекция траектории захвата на координатные плоскости:

— - перемещение по прямой; - - - - перемещение по неопределённой траектории

Движение захвата по неопределённой траектории происходит в одной плоскости, радиус кривизны ρ этой траектории изменяется незначительно на всем участке перемещения захвата (рисунок 3.22).

Законы изменения скорости звеньев переменной длины представлены на рисунке 3.23, а), а также характер изменения ускорения исполнительных звеньев переменной длины, показан на рисунке 3.23, б).

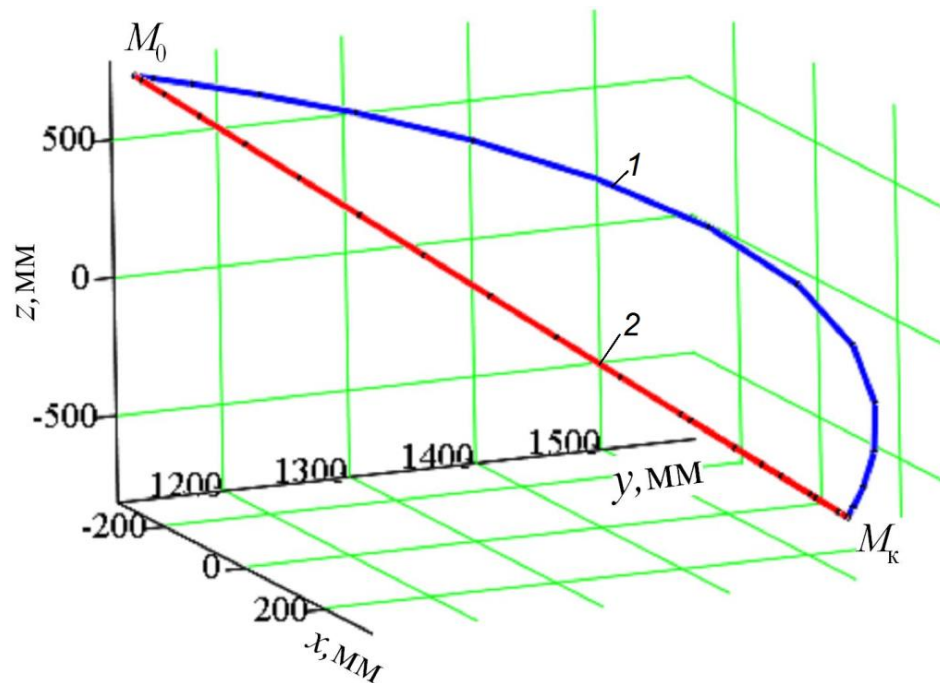


Рисунок 3.21 – Траектории захвата в пространстве: 1 - перемещение захвата по неопределённой траектории; 2 - перемещение захвата по прямой

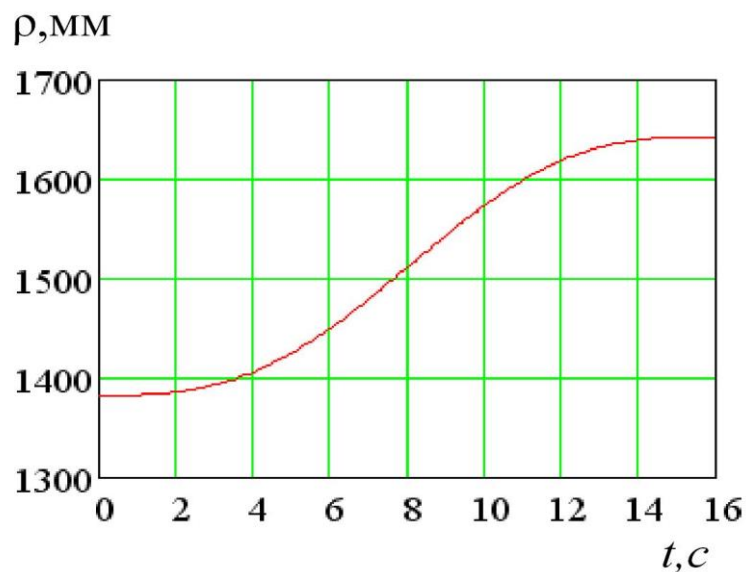


Рисунок 3.22 - Изменение радиуса кривизны при движении захвата по неопределенной траектории

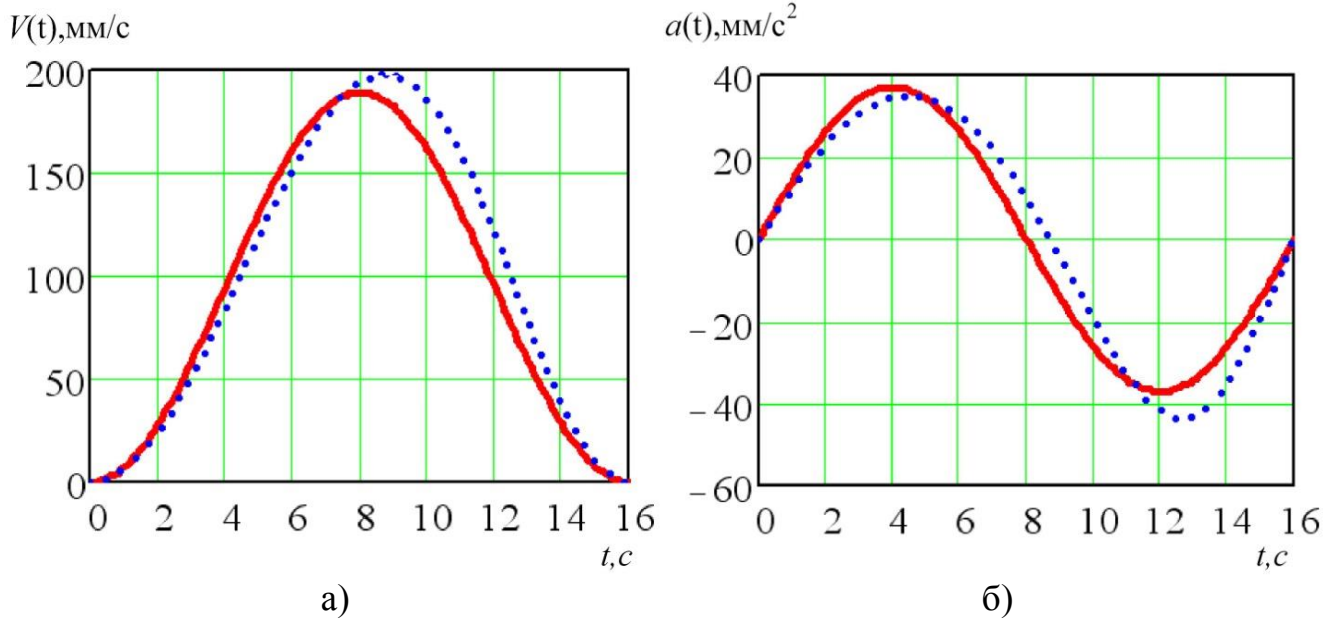


Рисунок 3.23 - Изменение скорости и ускорения звена l_2 : — - перемещение по прямой; - перемещение по неопределённой траектории

Скорость и ускорение линейных приводов (рис.3.23) при перемещении по прямой несколько выше, по сравнению со скоростью приводов при перемещении по неопределённой траектории. При перемещении захвата по неопределенной траектории ее длина составляет 1594 мм, а длина траектории захвата по прямой составляет 1514 мм, т.е. длина неопределенной траектории больше на 5%, при этом абсолютное отклонение от прямой составляет 216 мм, что составляет 13,5 % от длины траектории.

3.8. Условия существования прямолинейных траекторий в пределах зоны обслуживания

Перемещение захвата по прямой возможно только в том случае, когда все точки отрезка M_0M_k принадлежат зоне обслуживания манипулятора. Поэтому необходимо разработать алгоритм, в котором предусмотрен анализ принадлежности траектории зоне обслуживания и синтез технически реализуемой траектории.

Рассматриваемые в настоящей работе манипуляторы параллельно-последовательной структуры имеют зону обслуживания, которая не является выпуклым множеством возможных координат в силу геометрических параметров манипулятора и ангулярной зоны действия. Вследствие чего, при планировании прямолинейных траекторий следует проверять принадлежность отрезка траектории выпуклой области.

Условие принадлежности прямолинейной траектории зоне обслуживания проверяется следующим образом. Если для любой пары точек $M_0 M_1 \in \mathbf{D}$ отрезок $[M_0 M_1] \in \mathbf{D}$, то область, которой принадлежит отрезок будет выпуклой. Пусть траектория представляет отрезок $[M_0(x_{m0}, y_{m0}, z_{m0}) M_1(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1})]$ (рисунок 3.24), тогда, согласно уравнению прямой (3.22) $(x - x_0) \cdot (y_1 - y_0) = (y - y_0) \cdot (x_1 - x_0)$

$$y = y_0 + \frac{(x - x_0) \cdot (y_1 - y_0)}{x_1 - x_0}. \quad (3.37)$$

Представляя точку внутри отрезка $[M_0 M_1]$ в виде

$$x = (1 - \alpha)x_0 + \alpha x_1, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (3.38)$$

замечаем, что соотношение (3.38) эквивалентно следующему выражению

$$x = \delta_0 x_0 + \delta_1 x_1, \quad \delta_0 + \delta_1 = 1 \quad \delta_0 \geq 0, \quad \delta_1 \geq 0. \quad (3.39)$$

Тогда, используя выражение (3.38), уравнение прямой $M_0 M_1$ можно преобразовать следующим образом

$$\begin{aligned} y[(1 - \alpha)x_0 + \alpha x_1] &= y_0 + \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} \cdot ((1 - \alpha)x_0 + \alpha x_1 - x_0) = y_0 + \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} (x_0 - \alpha x_0 + \alpha x_1 - x_0) = \\ &= y_0 + \frac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} \cdot \alpha (x_1 - x_0) = y_0 + \alpha (y_1 - y_0). \end{aligned} \quad (3.40)$$

Аналогично определим

$$z[(1 - \alpha)x_0 + \alpha x_1] = z_0 + \alpha (z_1 - z_0). \quad (3.41)$$

При $0 \leq \alpha \leq 1$ получаем параметрическую форму прямой, соответственно график функций $z(x)$ лежит ниже прямой $M_0 M_1$, а график функции $y(x)$ находится левее прямой $M_0 M_1$ (согласно рисунка 3.24). Это обстоятельство подтверждает принадлежность прямолинейной траектории выпуклому множеству, а

соответственно, задача конфигурации манипулятора, описанная в разделе 3.6, будет решена корректно.

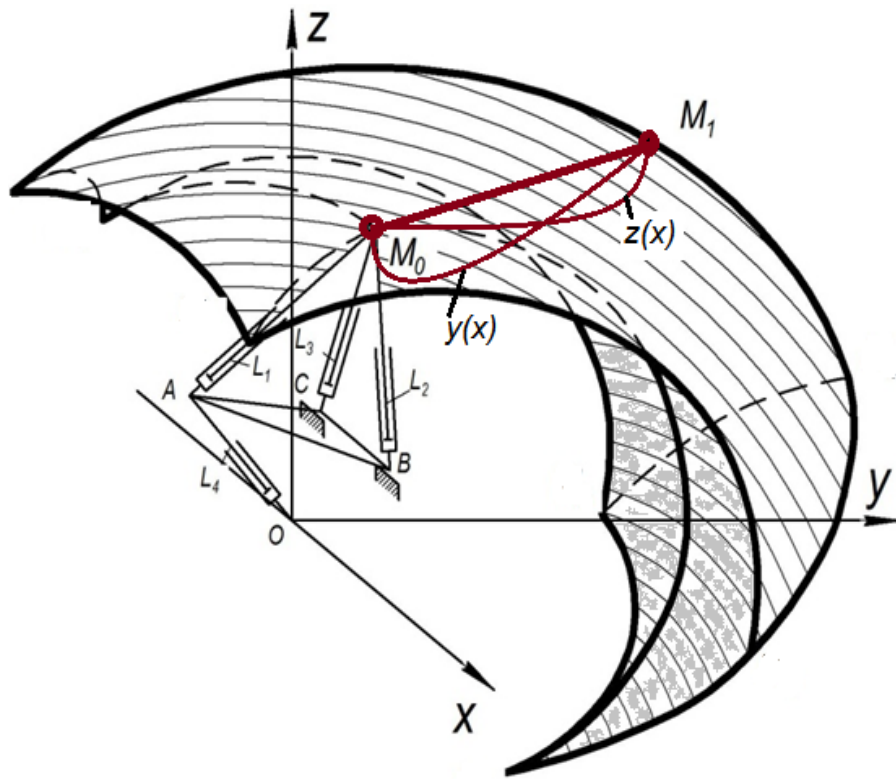


Рисунок 3.24 – К определению принадлежности прямой выпуклой функции

При реализации прямолинейной траектории, возможны такие конечные точки позиционирования захвата манипулятора, для которых линейные скорости штоков звеньев 1, 2 и 3 изменяют знак, т. е. совершают в относительном движении возвратно – поступательные движения. Так из рисунка 3.24 видно, что при движении захвата манипулятора по прямой M_0M_1 , линейные скорости штоков звеньев 2 и 3 изменяют знак. Условие, при котором линейные скорости штоков звеньев 2 и (или) 3 всегда больше нуля, состоит в выполнении неравенства $\beta \geq \pi/2$ и (или) $\gamma \geq \pi/2$ (рисунок 3.25). Здесь β и γ углы между осями соответствующих звеньев и траекторией точки M . Например, при движении захвата по прямой M_0M_2 (рисунок 3.25), наблюдается постоянство знаков линейных скоростей штоков этих звеньев, так как в этом случае углы β и γ между осями звеньев 2 и 3 и прямой M_0M_2 больше $\pi/2$.

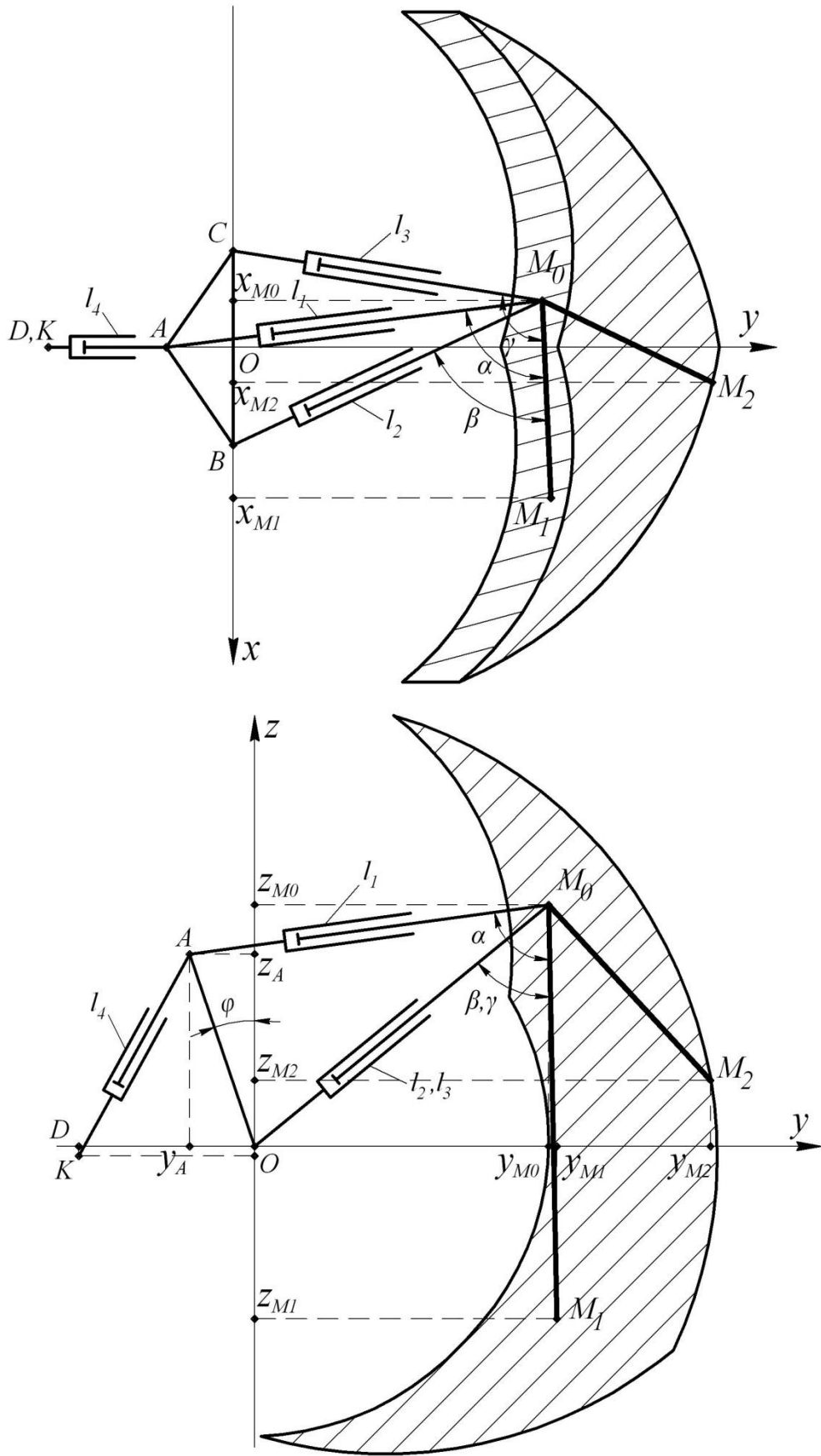


Рисунок 3.25- К определению знака линейной скорости звеньев 2 и 3

Линейные скорости штоков звеньев 2 и 3 отрицательны в том случае, когда эти углы меньше $\pi/2$, и, одновременно, длина траектории, точки перемещения захвата, не превышает $M_0M_k \leq l_2(T)\cos\beta$ для звена 2, и $M_0M_k \leq l_3(T)\cos\gamma$ для звена 3. Таким образом, для получения аналитических условий постоянства знака линейных скоростей штоков звеньев 2 и 3, необходимо решить задачу вычисления углов β и γ между прямыми, проходящими через оси звеньев 2 и 3 и прямой M_0M_k .

Уравнение прямой, проходящей через точки B и M_0 (ось звена 2) имеет вид

$$\frac{x-OB}{x_{M_0}-OB} = \frac{y}{y_{M_0}} = \frac{z}{z_{M_0}}, \quad (3.42)$$

а проходящей через точки C и M_0 (ось звена 3)

$$\frac{x+OB}{x_{M_0}+OB} = \frac{y}{y_{M_0}} = \frac{z}{z_{M_0}}. \quad (3.43)$$

Значения углов β и γ между осями звеньев 2 и 3 и прямой M_0M_k равны углам между их соответствующими направляющими векторами

$$\beta = \arccos \left[\pm \frac{(x_{M_0}-OB)(x_{M_k}-x_{M_0}) + y_{M_0}(y_{M_k}-y_{M_0}) + z_{M_0}(z_{M_k}-z_{M_0})}{\sqrt{(x_{M_0}-OB)^2 + (y_{M_0})^2 + (z_{M_0})^2} \cdot \sqrt{(x_{M_k}-x_{M_0})^2 + (y_{M_k}-y_{M_0})^2 + (z_{M_k}-z_{M_0})^2}} \right], \quad (3.44)$$

$$\gamma = \arccos \left[\pm \frac{(x_{M_0}+OB)(x_{M_k}-x_{M_0}) + y_{M_0}(y_{M_k}-y_{M_0}) + z_{M_0}(z_{M_k}-z_{M_0})}{\sqrt{(x_{M_0}+OB)^2 + (y_{M_0})^2 + (z_{M_0})^2} \cdot \sqrt{(x_{M_k}-x_{M_0})^2 + (y_{M_k}-y_{M_0})^2 + (z_{M_k}-z_{M_0})^2}} \right]. \quad (3.45)$$

Условие, при котором линейная скорость штока звена 1 (рисунок 3.26) не изменяет знак имеет вид

$$V'_M - V'_A \geq 0, \quad (3.46)$$

где проекции скоростей точек M и A на ось звена 1 имеют вид

$$V'_M = V_M \cdot \cos \alpha = \sqrt{\left(\frac{dx_M}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_M}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz_M}{dt}\right)^2} \cdot \cos \alpha. \quad (3.47)$$

$$V'_A = V_A \cdot \cos \delta = \frac{d\varphi}{dt} \cdot OA \cdot \cos \delta, \quad (3.48)$$

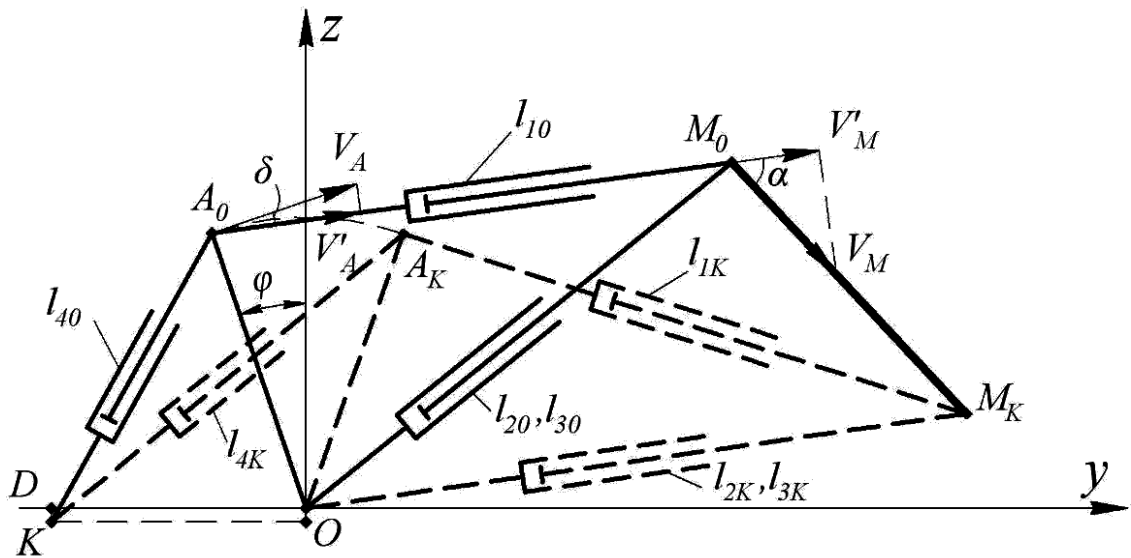


Рисунок 3.26 - К определению знака линейной скорости звена 1

Значения углов α и δ определяются как углы между двумя прямыми в пространстве AM_0 , M_0M_k и AM_0 , OA , соответственно.

Выполнение условий (3.44), (3.45) и (3.46) обеспечивает реализацию прямолинейной траектории, при отработке которой, линейные скорости штоков звеньев 1, 2 и 3 не изменяют свой знак. Таким образом, реализуется наиболее благоприятный режим, с точки зрения нагружения электродвигателя линейных приводов.

3.9. Реализация движения выходного звена манипулятора-трипода по заданным криволинейным траекториям

Не во всех случаях прямолинейная траектория применима для перемещения объектов манипулирования, часто возникают задачи обхода препятствий, как это показано на рисунках 3.13 и 3.14. Применение в случаях обхода препятствий кусочно-линейных участков траектории чаще всего даже удлиняет суммарную длину перемещения груза, резкое изменение направления перемещения выходного звена вызывает возникновение инерционных нагрузок на перемещаемый груз и манипулятор в целом.

В общем случае, кривую в пространстве можно задать как результат совместного решения двух уравнений

$$F_1(x_M, y_M, z_M) = 0, \quad F_2(x_M, y_M, z_M) = 0.$$

Одним из вариантов криволинейных траекторий может быть дуга окружности. Для реализации траектории по дуге окружности, принадлежащей зоне обслуживания манипулятора-трипода, необходимо задать радиус дуги R и координаты центра окружности в точке $O(x_0, y_0, z_0)$ (рисунок 3.27). При этом окружность определится как контур сферы в диаметральном сечении. Уравнение окружности в пространстве

$$(x_M - x_0)^2 + (y_M - y_0)^2 + (z_M - z_0)^2 = R^2. \quad (3.49)$$

Уравнение плоскости, секущей сферу в диаметральном сечении

$$a(x_M - x_0) + b(y_M - y_0) + c(z_M - z_0) = 0 \quad (3.50)$$

где a, b, c – параметры плоскости, неравные одновременно нулю.

Совместное решение уравнений (3.49) и (3.50) позволяет получить выражения для декартовых координат точки M выходного звена манипулятора-трипода (рисунок 3.27):

$$x_M = x_0 + \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2}}}, \quad y_M = y_0 + \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{b^2}{c^2}}}, \quad z_M = z_0 + \frac{R}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{b^2}}}. \quad (3.51)$$

С другой стороны, координаты точки B при движении по сфере радиуса R можно задать как

$$\begin{aligned} x_M &= x_0 + R \cdot \sin \Theta \cdot \cos \psi, \\ y_M &= y_0 + R \cdot \sin \Theta \cdot \sin \psi, \\ z_M &= z_0 + R \cdot \cos \Theta. \end{aligned} \quad (3.52)$$

где $\Theta \in (0; \pi]$, $\psi \in [0; 2\pi)$.

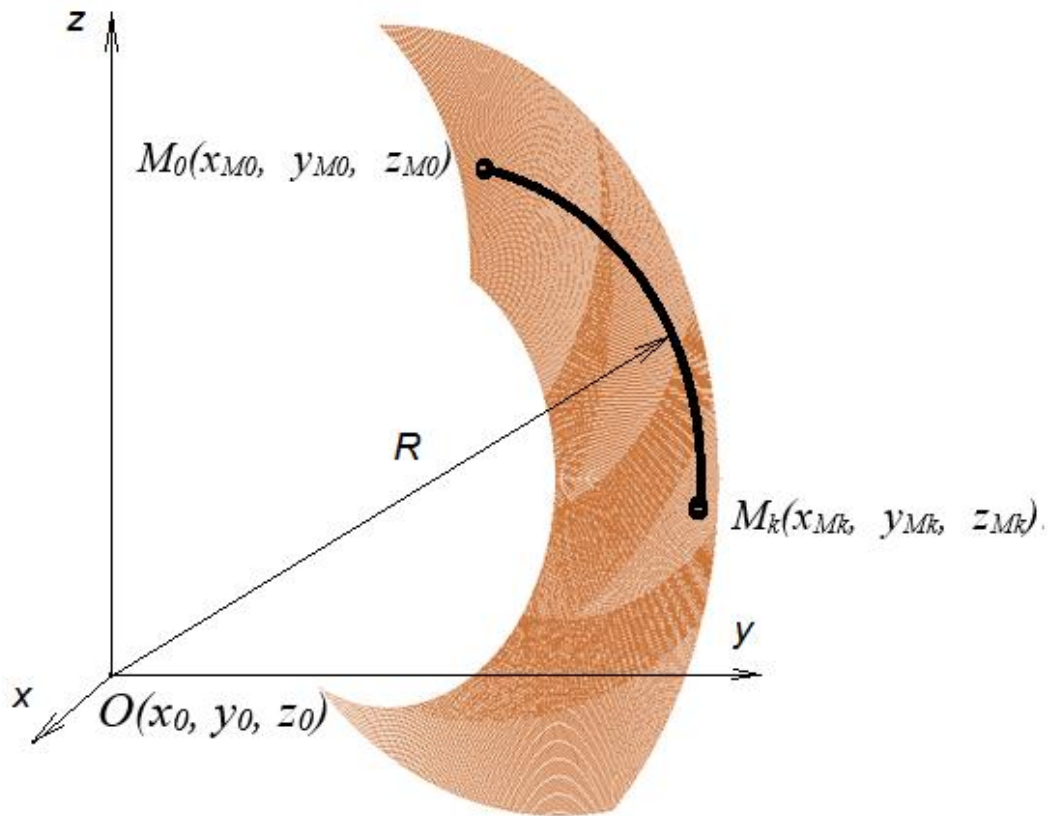


Рисунок 3.27 – Задание траектории захвата манипулятора в виде дуги окружности

Например, задав для изменения углов Θ и ψ закон «мягкого» трогания и останова согласно выражению (3.34), т.е.

$$\Theta(t) = \Theta_K \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \text{ и } \psi(t) = \psi_K \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right].$$

Рассматривая движение по дуге окружности в пределах зоны обслуживания в базовой плоскости манипулятора yOz , для которого выражения изменения обобщенных координат (3.15) манипулятора с учетом (3.52) примут вид

$$\begin{aligned} l_1(t) &= \sqrt{(y_0 + R \cdot \cos(\psi(t)))^2 + (z_0 + R \cdot \sin(\psi(t)) - z_A)^2}, \\ l_2(t) &= \sqrt{x_B^2 + (y_0 + R \cdot \cos(\psi(t)))^2 + (z_0 + R \cdot \sin(\psi(t)))^2}, \\ l_3(t) &= \sqrt{x_C^2 + (y_0 + R \cdot \cos(\psi(t)))^2 + (z_0 + R \cdot \sin(\psi(t)))^2}. \end{aligned} \quad (3.53)$$

Результаты моделирования движения захвата манипулятора-трипода по дуге окружности представлены на рисунке 3.28.

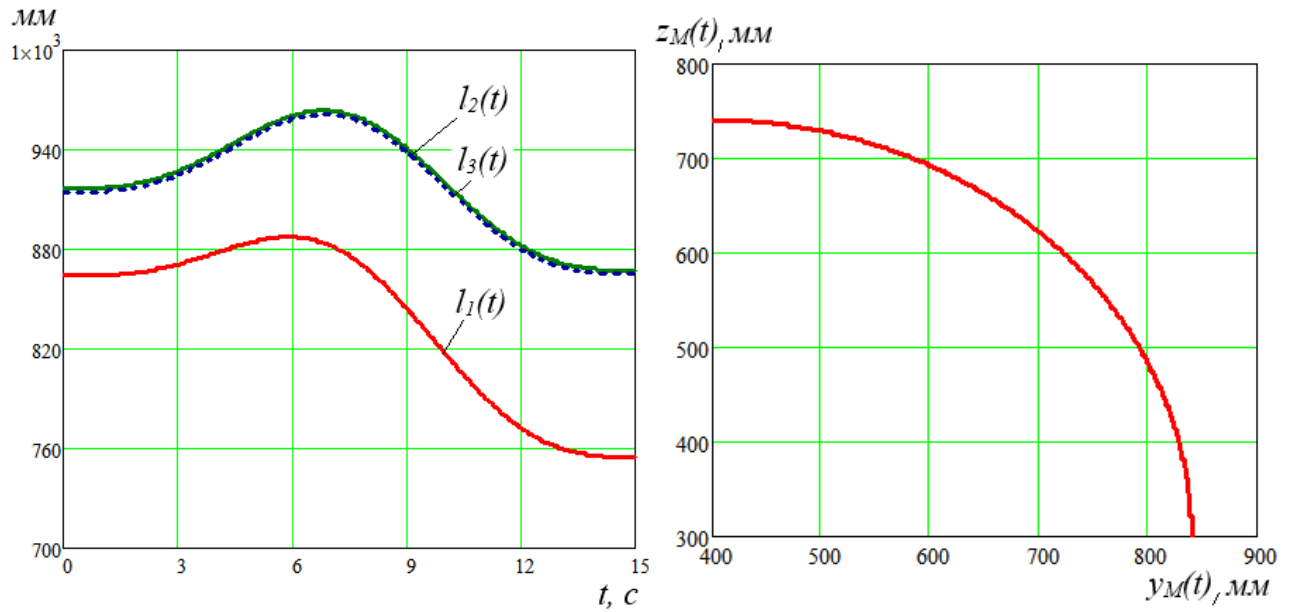


Рисунок 3.28 – Характер изменения обобщенных координат и траектория при движении захвата манипулятора по дуге окружности

В случае задания траектории в виде параболы, описываемой уравнением

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.54)$$

Реализацию перемещения точки М выходного звена трипода можно задать следующими функциями:

$$x_M(t) = x_{MK} \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right], \quad (3.55)$$

$$y_M(t) = a \cdot x_M^2(t) + b \cdot x_M(t) + c.$$

Если же необходимо реализовать пространственное движение по параболической поверхности, лежащей в пределах зоны обслуживания, то закон движения по третьей координате можно записать как

$$z_M(t) = z_{MK} \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right]. \quad (3.56)$$

Результаты моделирования движения захвата манипулятора-трипода по параболической поверхности – двояковыпуклой кривой представлены на рисунке 3.29.

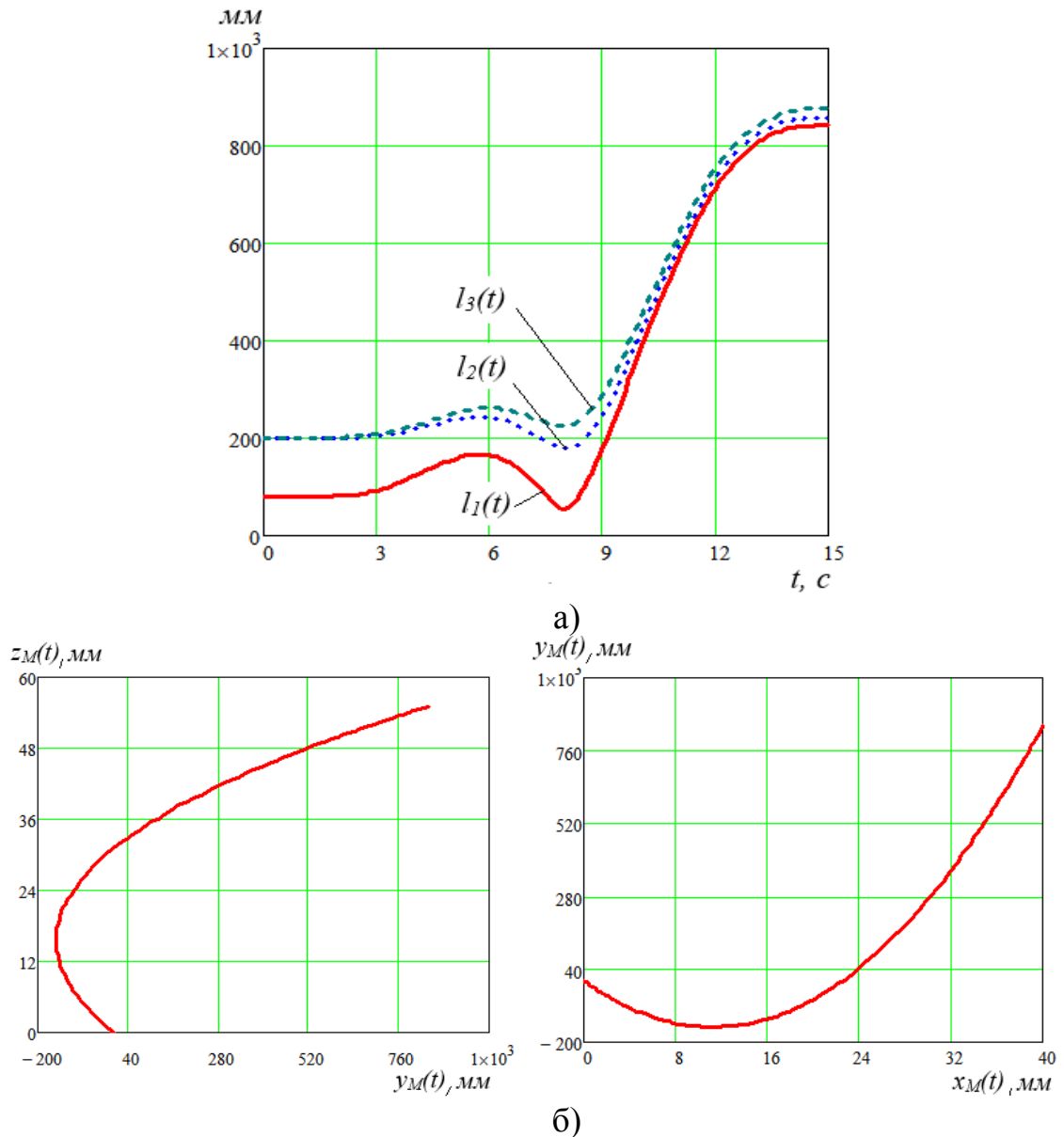


Рисунок 3.29 - Характер изменения обобщенных координат (а) и траектория (б) при движении захвата манипулятора по параболической поверхности

Задав законы изменения декартовых координат выходного звена манипулятора-трипода в виде требуемых функций $x_M(t)=f_1(t)$, $y_M(t)=f_2(t)$, $z_M(t)=f_3(t)$ тогда в общем случае движения выражения для изменения обобщенных координат примут вид

$$\begin{aligned}
 l_1(t) &= \sqrt{f_1(t)^2 + (f_2(t)^2 + OA \cdot \sin \varphi)^2 + (f_3(t)^2 - OA \cdot \cos \varphi)^2}, \\
 l_2(t) &= \sqrt{(f_1(t)^2 - OB)^2 + f_2(t)^2 + f_3(t)^2}, \\
 l_3(t) &= \sqrt{(f_1(t)^2 + OB)^2 + f_2(t)^2 + f_3(t)^2}.
 \end{aligned} \tag{3.57}$$

Таким образом, движение выходного звена манипулятора-трипода может быть реализовано по различным траекториям. Однако при планировании траекторий следует предпочитать те законы, при реализации которых как можно меньше исполнительных звеньев манипулятора совершают возвратно-поступательные движения.

Выводы по главе

Решением прямой задачи кинематики получены зависимости для определения декартовых координат захвата (обобщенные координаты объекта) по обобщенным координатам манипулятора (длины звеньев), позволяющие реализовать формирование объема рабочей зоны обслуживания по выбранному критерию устойчивости.

Получены силовые характеристики усилий в звеньях манипулятора-трипода и построены геометрико-статические характеристики манипулятора-трипода с поворотным основанием.

Сформулирована кинематическая управляющая матрица, являющаяся универсальной для предложенного семейства манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода.

Рассмотрены варианты планирования траекторий для конкретного технологического процесса погрузки-разгрузки контейнеров манипулятором-триподом на подвижном основании.

Решена задача определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно – последовательной структуры для задаваемого положения захвата, нахождением локального минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев, с ограничениями типа равенств и неравенств, наложенных на значения обобщенных координат.

Выведены условия знакопостоянства относительных скоростей исполнительных звеньев манипулятора параллельно-последовательной структуры при движении выходного звена – захвата по прямой.

Решена задача обеспечения требуемой прямолинейной траектории захвата манипулятора-трипода из условия обеспечения «мягкого» трогания и останова, а также реализовано движение выходного звена манипулятора по синусоидальному закону изменения ускорения по заранее неопределенной траектории, по дуге окружности, по параболической поверхности в пределах зоны обслуживания.

Выведены условия существования прямолинейных траекторий в пределах зоны обслуживания манипулятора-трипода на подвижном основании.

4. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ

Выбор динамической модели, адекватно описывающей режимы работы манипуляционной системы, зависит от ее структурной схемы и задач динамики, которые необходимо решать. В процессе проектирования манипуляторов возникают следующие задачи:

- определение движущих сил, необходимых для реализации требуемых движений захвата. На основании этих расчетов производят выбор двигателей, обеспечивающих эти движения;
- определение динамических нагрузок в кинематических парах, необходимых для проведения прочностных расчетов;
- динамический синтез программных движений захвата;
- определение динамических ошибок, возникающих при реализации программных движений.

Решение этих задач связано с интегрированием дифференциальных уравнений движения манипулятора.

Известно несколько способов составления дифференциальных уравнений движения манипуляторов: с использованием уравнений Лагранжа 2-ого рода, уравнений Лагранжа с неопределенными множителями, уравнений Аппеля, принципа наименьшего принуждения Гаусса, метода кинетостатики [125, 145, 146, 161, 169, 172, 219, 221, 268, 349, 372]. В последние годы широко применяются методы моделирования динамики технических систем с помощью автоматического формирования уравнений движения и численных методов их решения [85, 86, 212].

4.1. Обоснование расчетной схемы манипулятора

Так как манипулятор представляет собой многомассовый пространственный механизм, то динамика его движений описывается сложной системой нелинейных

дифференциальных уравнений [28, 33, 48, 52, 53, 89, 125], и применение аналитических методов исследования и решение задач синтеза его движений затруднено. Вместе с тем из-за ошибок при определении значений параметров модели и неточности методов расчета, сложная модель может неадекватно описывать реальные физические процессы. Анализ конструкций манипуляторов параллельной структуры показывает, что исполнительные звенья можно считать абсолютно жесткими, по сравнению с податливостью кинематических пар приводного механизма.

Для упрощения дифференциальных уравнений движения целесообразно реальный механизм заменить динамически эквивалентным [28, 33, 48, 52, 53, 89], содержащим сосредоточенные массы. Расчетную схему манипулятора с четырьмя поступательными исполнительными звеньями, предназначенного для погрузочно-разгрузочных работ представляем в виде трех сосредоточенных масс: m в месте крепления захвата (точка M), m_A в точке A поворотного основания и m_G масса груза с подвесом в точке E (рисунок 4.1).

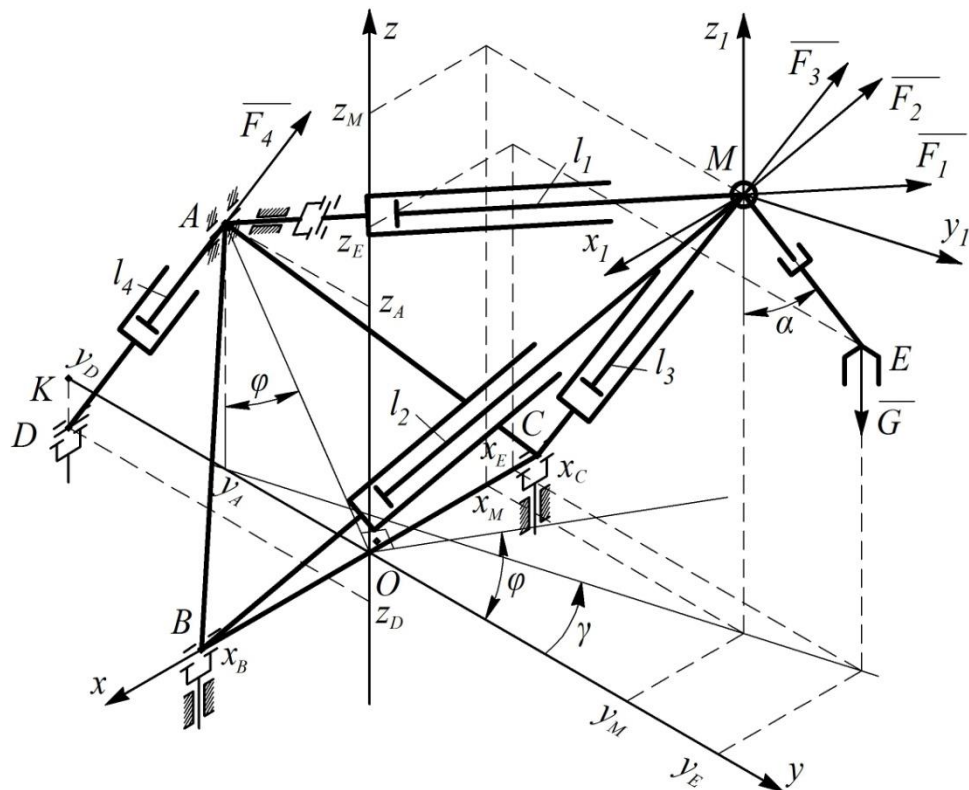


Рисунок 4.1 - Расчетная схема манипулятора – трипода на поворотном основании (трехмассовая модель)

4.1.1. Расчет приведенных масс

Масса переносимого груза является однозначно величиной известной. Массы манипулятора, приведенные к точкам A и M определяем из равенства кинетических энергий манипулятора и его модели на парциальных движениях. При перемещении точки крепления подвеса манипулятора в плоскости zOy с помощью одного первого исполнительного звена точка M перемещается по окружности радиуса OM со скоростью \vec{V}_M , вектор которой направлен перпендикулярно прямой OM (рисунок 4.2). Звенья манипулятора AM , BM , CM совершают вращательные движения вокруг неподвижных осей. Остальные звенья манипулятора неподвижны.

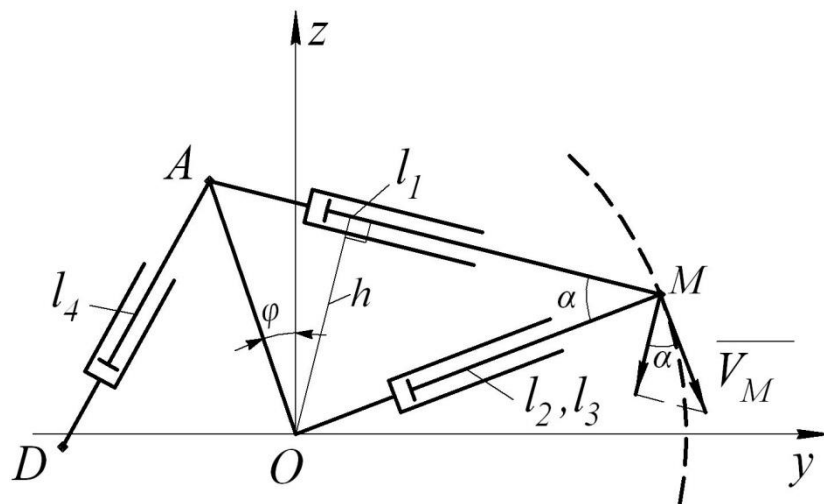


Рисунок 4.2. Расчетная схема манипулятора в плоскости продольной симметрии

Тогда из равенства кинетических энергий модели манипулятора и реального объекта, приведенная масса m равна

$$m = I_{BCM} \left(\frac{\omega_1}{V_M} \right)^2 + I_{AM} \left(\frac{\omega_2}{V_M} \right)^2, \quad (4.1)$$

где I_{BCM}, I_{AM} - моменты инерции звеньев BM, CM и AM относительно осей вращения; ω_1, ω_2 - угловые скорости звеньев BM, CM и AM относительно осей вращения.

Из рисунка 4.2. видно

$$\omega_1 = \frac{V_M}{OM}, \quad \omega_2 = \frac{V_M \cos \alpha}{AM}, \quad \sin \alpha = \frac{h}{OM}, \quad h = \frac{OA(y \cos \varphi + z \sin \varphi)}{AM}.$$

Тогда

$$m = \frac{I_{BCM}}{OM^2} + \frac{I_{AM}}{AM^2} \left(1 - \frac{h^2}{OM^2} \right). \quad (4.2)$$

В выражении (4.2) приведенная масса m зависит от h и $AM = l_1(t)$. Момент инерции $I_{BCM} = const$, а момент инерции I_{AM} переменная величина. Для манипулятора – трипода, описанного в разделе 1.3 (рисунок 1.27), корпус актуатора с закрепленными на нем редуктором и двигателем, значительно превышает массу выдвижного штока, поэтому его момент инерции можно принять постоянным. На рисунке 4.3. представлена зависимость параметра $\xi(l_1) = \frac{1}{AM^2} \left(1 - \frac{h^2}{OM^2} \right)$ от величины перемещения точки M , а на рисунке 4.4. характер изменения приведенной массы от времени при удлинении звена переменной длины l_1 .

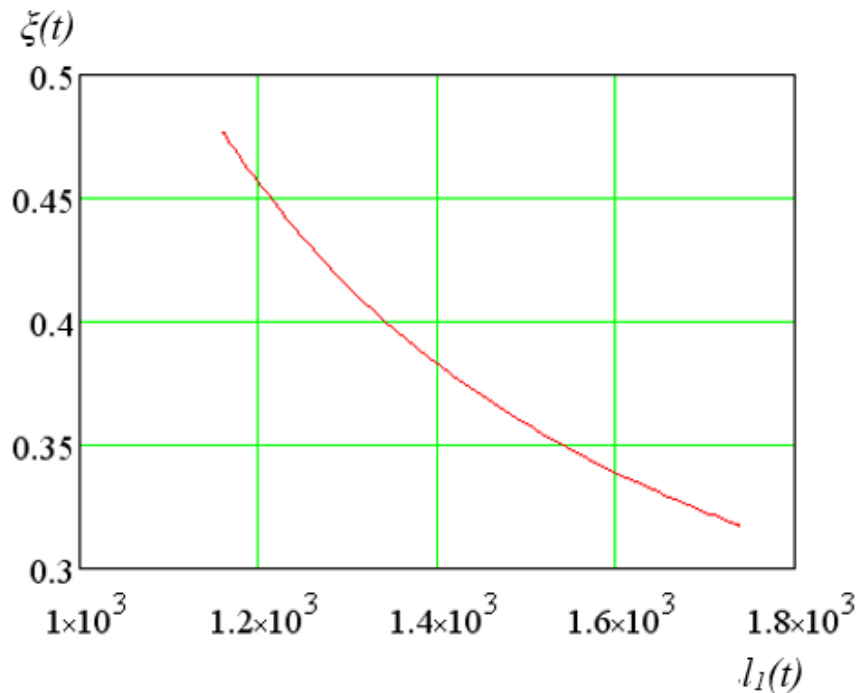


Рисунок 4.3 – Зависимость параметра $\xi(l)$ от удлинения звена переменной длины $l_1(t)$

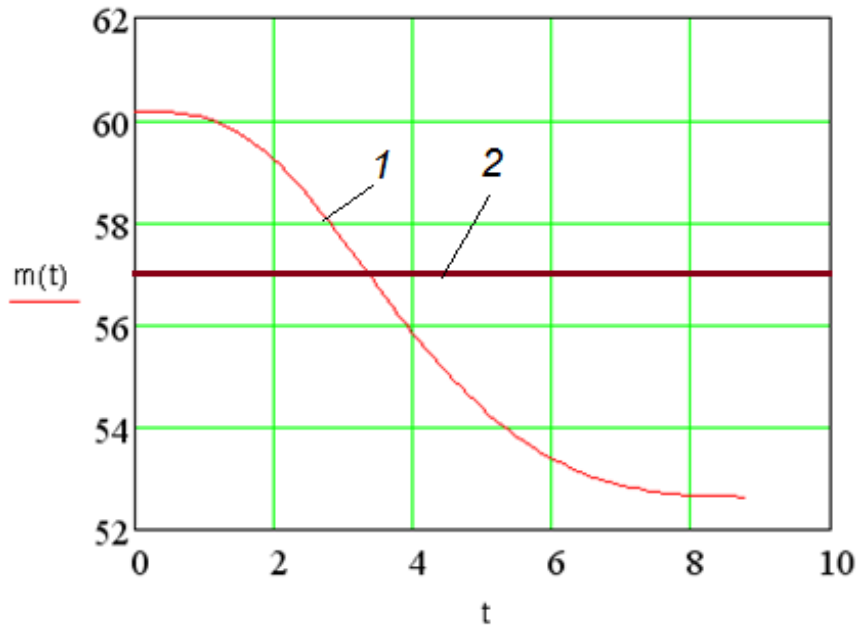


Рисунок 4.4 - Зависимость приведенной массы от времени при удлинении звена переменной длины $l_I(t)$ - кривая 1; среднее значение – 2

В дальнейших расчетах значение приведенной массы m принимается постоянной. Для рассматриваемого манипулятора она равна $m = 57 \text{ кг}$.

Для расчета приведенной массы m_A рассматривается перемещение точки подвеса только при работе четвертого исполнительного звена. В этом случае точки расположения масс m и m_A принадлежат одному твердому телу, совершающему вращательное движение вокруг неподвижной оси Ox и состоящему из поворотного основания и звеньев 1, 2, 3 (рисунок 4.1). Тогда, из условия равенства кинетических энергии математической модели манипулятора и его физического аналога, находится значение приведенной массы

$$m_A = \frac{I_{ABCM}}{OA^2} - m \cdot \left(\frac{OM}{OA} \right)^2, \quad (4.3)$$

где I_{ABCM} - момент инерции поворотного основания и звеньев 1, 2, 3 манипулятора.

Для рассматриваемого манипулятора она равна $m_A = 43 \text{ кг}$.

4.2. Уравнения движения трехмассовой модели манипулятора

Дифференциальные уравнения Лагранжа с неопределенными множителями для обобщенных декартовых координат точки крепления подвеса $M[x(t), y(t), z(t)]$ и захвата с грузом $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$ относительно абсолютной системы координат, и угла $\varphi(t)$ наклона основания манипулятора можно получить, используя формализм Лагранжа [38, 258, 261]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} - \frac{d\Phi}{dq_k} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \frac{\partial f_i}{\partial q_k}, \quad k = 1 \div 7, \quad (4.4)$$

где $T = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2}m_G(\dot{x}_E^2 + \dot{y}_E^2 + \dot{z}_E^2) + \frac{1}{2}m_A \cdot O_1A^2 \cdot \dot{\varphi}^2$ - кинетическая энергия манипулятора; $\Pi = mg \cdot z + m_A g \cdot O_1A \cdot \cos \varphi + m_G g \cdot z_E$ - потенциальная энергия; $\Phi = \frac{1}{2}b(\dot{x}_E^2 + \dot{y}_E^2 + \dot{z}_E^2)$ - функция рассеивания Рэлея; b - коэффициент линейного вязкого сопротивления.

Уравнения голономных связей между обобщенными координатами точки крепления подвеса, захвата с грузом и длинами исполнительных звеньев $l_1(t), l_2(t), l_3(t), l_4(t)$ (обобщенные координаты манипулятора) имеют вид (рисунок 4.1)

$$\begin{aligned} f_1 &= \sqrt{x^2 + (y + OA \cdot \sin \varphi)^2 + (z - OA \cdot \cos \varphi)^2} - l_1(t) = 0, \\ f_2 &= \sqrt{(x - OB)^2 + y^2 + z^2} - l_2(t) = 0, \\ f_3 &= \sqrt{(x + OB)^2 + y^2 + z^2} - l_3(t) = 0, \\ f_4 &= \sqrt{(OK - OA \cdot \sin \varphi)^2 + (OA \cdot \cos \varphi - DK)^2} - l_4(t) = 0, \\ f_5 &= \sqrt{(x - x_E)^2 + (y - y_E)^2 + (z - z_E)^2} - l_5 = 0, \\ f_6 &= x_E(y + OA \sin \varphi) - x(y_E + OA \sin \varphi) = 0, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где l_5 - постоянная длина подвеса груза (рисунок 4.1); геометрические размеры OA, OB, OK и KD манипулятора и точек крепления на основании.

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение манипулятора с голономными связями (4.5), полученных с помощью уравнений (4.4) имеет вид

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= F_1 \frac{x}{ml_1} + F_2 \frac{x-OB}{ml_2} + F_3 \frac{x+OB}{ml_3} + F_5 \frac{x-x_E}{ml_5} - \frac{\lambda_6}{m} (z_E + OA \cdot \sin \varphi), \\
 \ddot{y} &= F_1 \frac{y + OA \cdot \sin \varphi}{ml_1} + F_2 \frac{y}{ml_2} + F_3 \frac{y}{ml_3} + F_5 \frac{y-y_E}{ml_5} + \frac{\lambda_6}{m} x_E, \\
 \ddot{z} &= F_1 \frac{z - OA \cdot \cos \varphi}{ml_1} + F_2 \frac{z}{ml_2} + F_3 \frac{z}{ml_3} + F_5 \frac{z-z_E}{ml_5} - g, \\
 \ddot{\varphi} &= F_1 \frac{y \cdot \cos \varphi + z \cdot \sin \varphi}{OA \cdot m_A l_1} + F_4 \frac{DK \cdot \sin \varphi - OK \cdot \cos \varphi}{OA \cdot m_A l_4} - \lambda_6 \frac{(x-x_E)}{OA \cdot m_A} \cdot \cos \varphi + \frac{g}{OA} \sin \varphi, \\
 \ddot{x}_E &= -F_5 \frac{x-x_E}{m_G l_5} + \frac{\lambda_6}{m_G} (y + OA \cdot \sin \varphi) - 2n\dot{x}_E, \\
 \ddot{y}_E &= -F_5 \frac{y-y_E}{m_G l_5} - \frac{\lambda_6}{m_G} x - 2n\dot{y}_E, \\
 \ddot{z}_E &= -F_5 \frac{z-z_E}{m_G l_5} - g - 2n\dot{z}_E,
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

где $F_k, k=1 \div 4$ - движущие усилия в звеньях манипулятора; F_5 - усилие в подвесе; λ_6 - множитель Лагранжа, имеющий размерность коэффициента линейной жесткости; $n = \frac{b}{2m_G}$ - коэффициент затухания.

Результаты численных исследований позволяют сформулировать технические требования к приводам, разрабатываемых образцов манипулятора.

Так, задавшись программными законами $l_1^*(t), l_2^*(t), l_3^*(t), l_4^*(t)$ изменения обобщенных координат манипулятора, необходимыми для выполнения какого-либо технологического процесса, можно определить необходимые движущие

усилия F_k^* , $k=1\div 4$ и параметрическую траекторию $x_E(t), y_E(t), z_E(t)$. Например, принимая закон изменения исполнительных звеньев в виде [145]

$$l_k^*(t) = [l_k^*(T) - l_k^*(0)] \cdot \left(10 \frac{t^3}{T^3} - 15 \frac{t^4}{T^4} + 6 \frac{t^5}{T^5}\right), \quad (4.7)$$

для значений времени перемещения равное $T = 10$ с и $l_k^*(T) - l_k^*(0) = 0.4$ м, получаем

законы изменения движущих сил (рисунок 4.5) и угла $\alpha = \arccos\left(\frac{z - z_E}{l_5}\right)$

отклонения подвеса от вертикали (рисунок 4.6). Закон изменения обобщенных координат (4.7) обеспечивает начало и окончание движения с нулевыми значениями скорости и ускорения поступательного движения исполнительного звена, полученное в [145] кинематическим синтезом законов изменения обобщенных координат манипулятора.

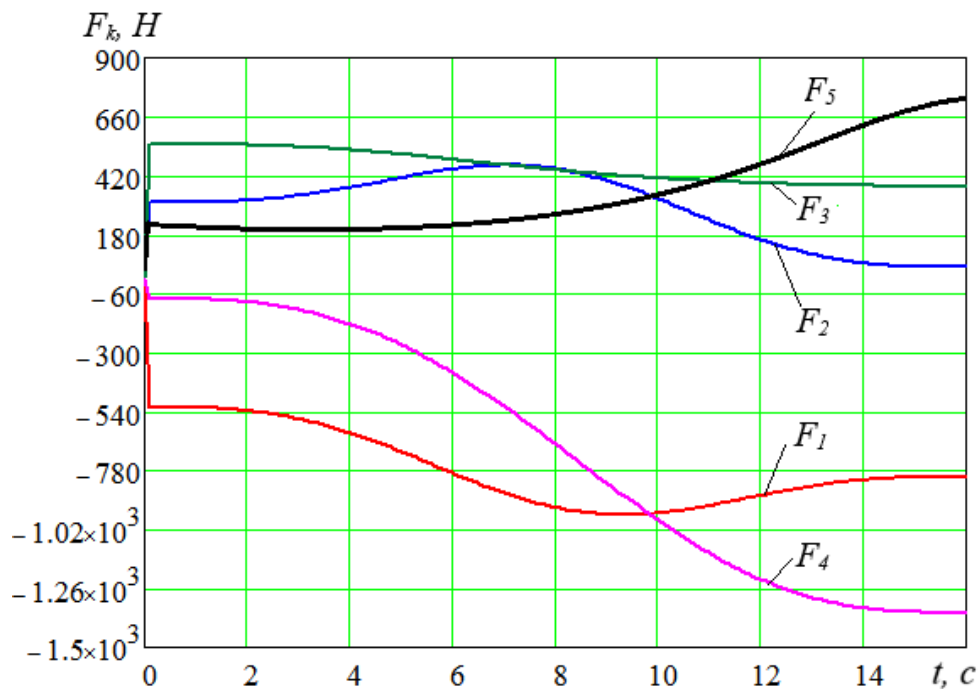


Рисунок 4.5 - Закон изменения движущих сил при движении по заранее не определенной траектории

При изменении обобщенных координат манипулятора по закону (4.7) траектория захвата определяется параметрическими уравнениями (3.7) и представлена на рисунке 4.7.

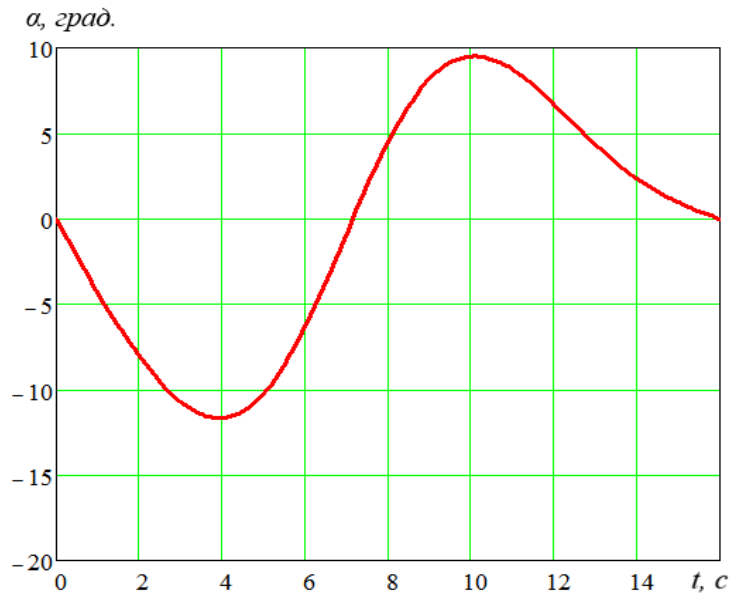


Рисунок 4.6 - Закон изменения угла отклонения подвеса от вертикали

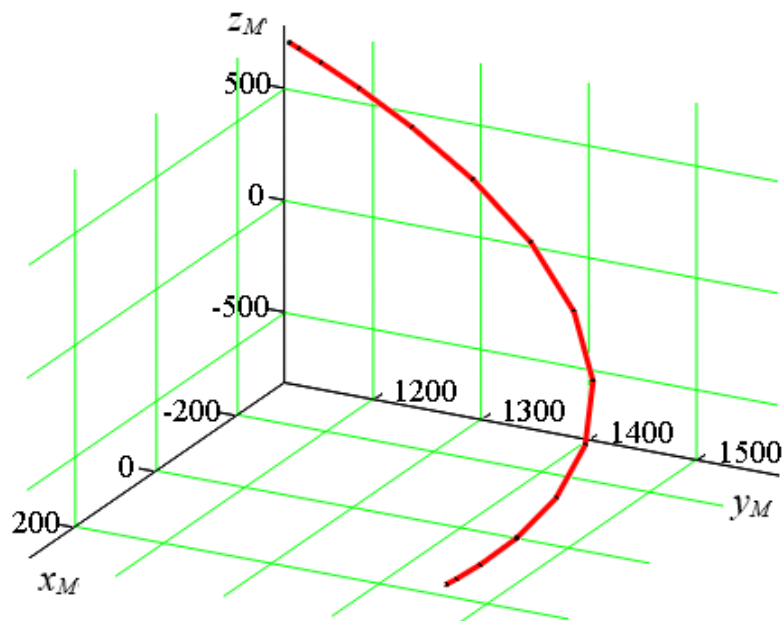


Рисунок 4.7 - Траектория захвата

Уравнения (4.6) позволяют определить движущие силы и при осуществлении требуемой задаваемой траектории захвата. Так при реализации движения захвата по прямой (3.53) по закону изменения дуговой координаты, обеспечивающего трогание и остановку захвата с нулевыми значениями скорости и ускорения

$$S(t) = S(T) \cdot \left(10 \frac{t^3}{T^3} - 15 \frac{t^4}{T^4} + 6 \frac{t^5}{T^5} \right), \quad (4.8)$$

получаем законы изменения движущих сил (рисунок 4.8) и программные законы изменения обобщенных координат $l_1^*(t)$, $l_2^*(t)$, $l_3^*(t)$, $l_4^*(t)$ манипулятора (рисунок 4.9).

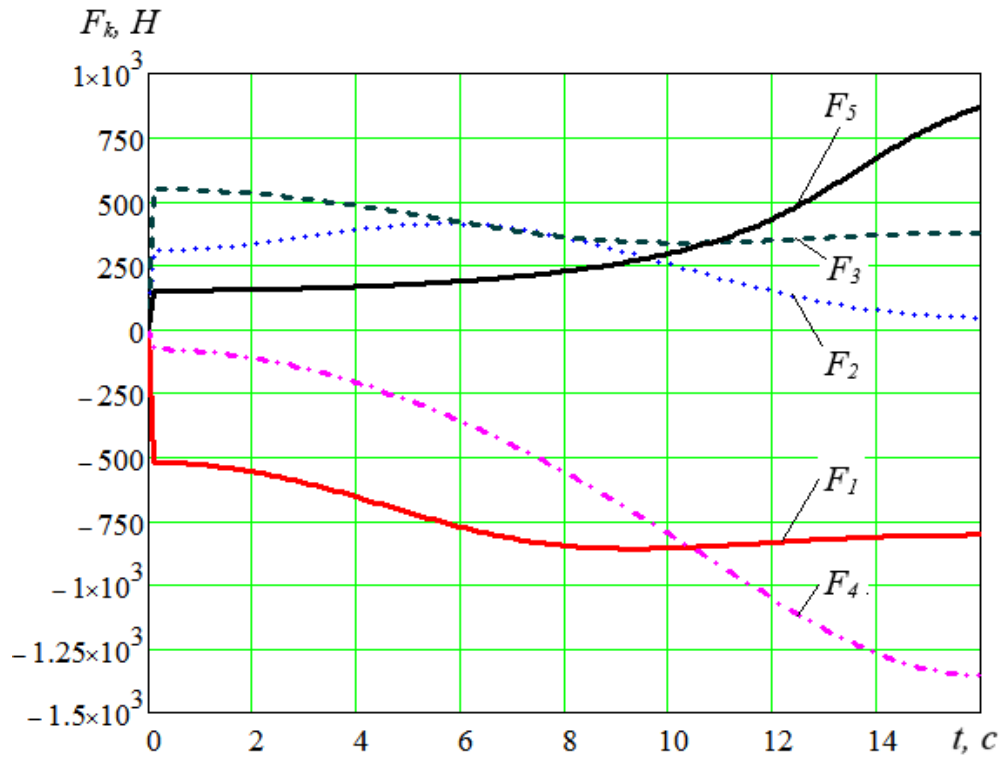


Рисунок 4.8 - Закон изменения движущих сил при движении захвата по прямой

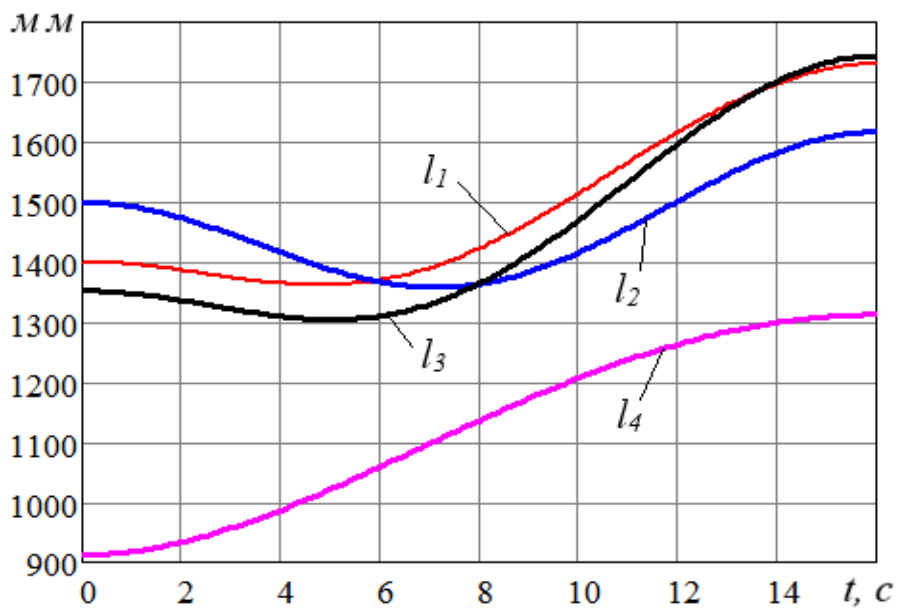


Рисунок 4.9 - Закон изменения обобщенных координат манипулятора при движении захвата по прямой

Статическая характеристика электромеханического привода с учетом внутренних потерь на трение *САНВ-21 series* компании «SKFgroup» имеет вид

$$F_k = ru_k(t) - s\dot{i}_k, \quad (4.9)$$

где F_k - управляющие силы, реализуемые актуаторами; r, s - коэффициенты, зависящие от параметров двигателя; $u_k(t)$ - управляющее напряжение; \dot{i}_k - скорость перемещения штока актуатора.

Зависимость (4.9) [397] представлена на рисунке 4.10.

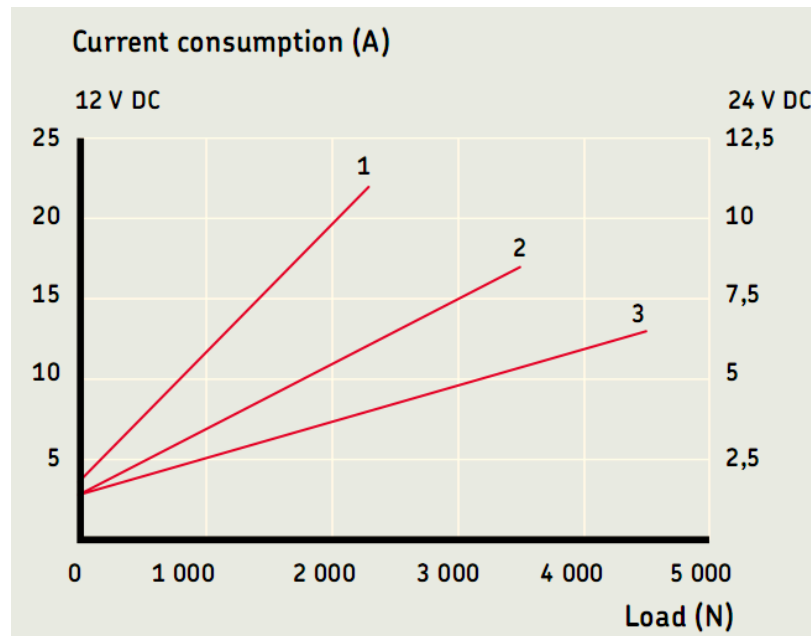


Рисунок 4.10 - Статическая характеристика актуатора САНВ-21

Значения постоянных параметров характеристики (4.9) равны $r = 56 \frac{H}{\%}$, $s = 52 \frac{H \cdot c}{M}$.

На рисунках 4.11, 4.12 приведены результаты численных исследований зависимости моментов сил сопротивления на валу электродвигателя перемещения захвата манипулятора в плоскости yOz [$u_2(t) = u_3(t)$] при прямоугольном законе изменения управляющих напряжений $u_k(t) = const, t_1 > t \geq 0, u_k(t) = 0, t \geq t_1$. Нагрузка на захват равна 420 Н.

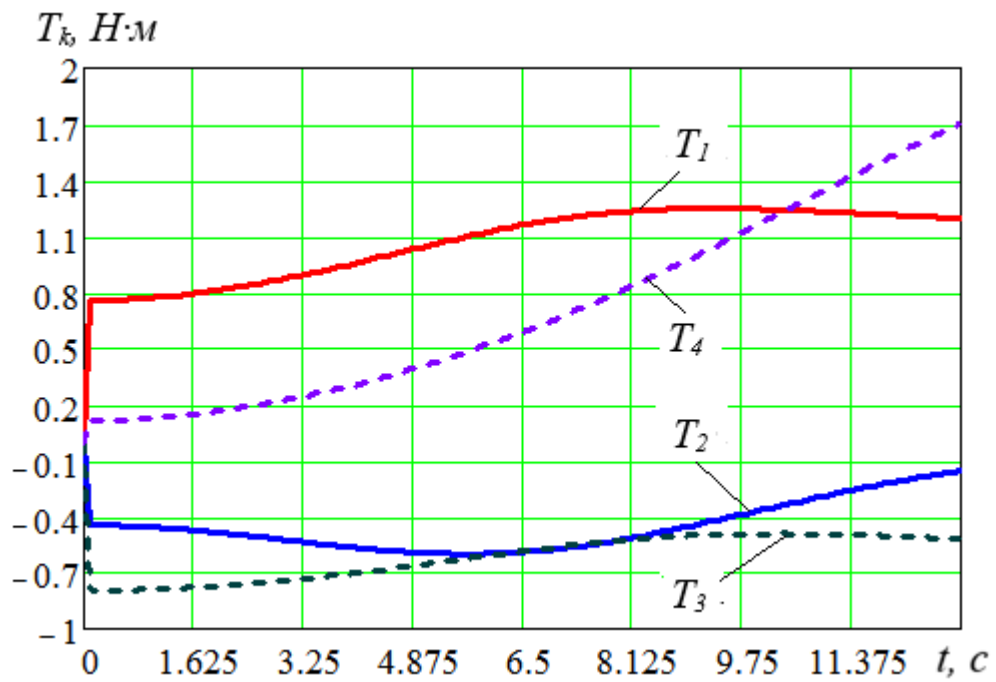


Рисунок 4.11 - Зависимости моментов сил сопротивления на валу электродвигателя исполнительных цилиндров при их выдвигении

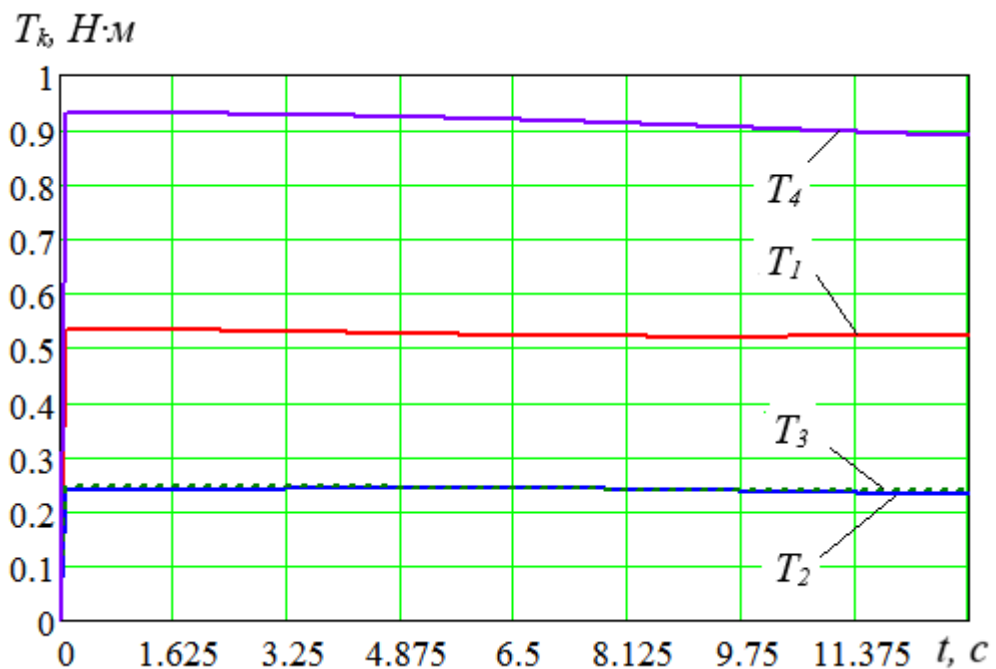


Рисунок 4.12 - Зависимости моментов сил сопротивления на валу электродвигателя исполнительных цилиндров при их втягивании

4.3. Динамика привода с упругой самотормозящейся передачей

Для грузовых манипуляторов статические ошибки, вызванные деформацией элементов механизма приводов, являются существенными и определяют точность позиционирования. При реализации задач траекторного и контурного управления необходимо определять динамические ошибки, значения которых зависят от параметров собственных колебаний электромеханической системы привода. Анализ динамических характеристик привода манипулятора, необходим и при разработке систем управления [193, 242, 368, 369, 371, 376, 385].

4.3.1. Дифференциальные уравнения привода с учетом податливости передаточного механизма

Каждое исполнительное звено манипуляторов (табл.2.1) состоит из электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением, необратимого червячного редуктора и винтовой передачи (рисунок 4.13).

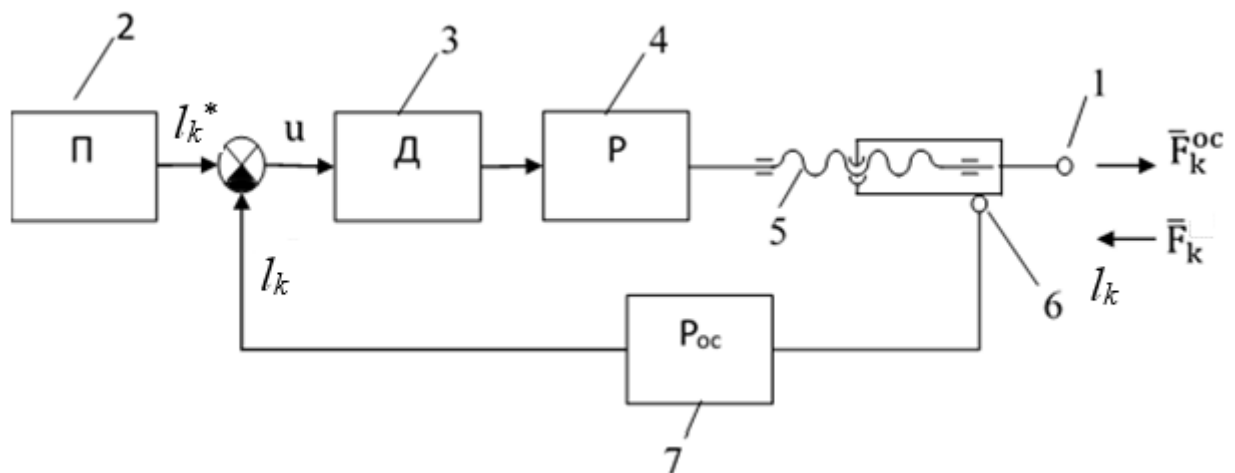


Рисунок 4.13 - Структурная схема приводного механизма исполнительного звена манипулятора; 1 – шток; 2 – устройство программного управления; 3 – электродвигатель; 4 – червячный редуктора; 5 – винтовая передача; 6 – датчик обратной связи; 7 – регулятор обратной связи

Механизм передачи движения от двигателя к перемещаемой массе считается трехмассовой системой, состоящей из ротора электродвигателя с червяком, червячного колеса с винтом и гайки со штоком. Тогда модель привода имеет три степени свободы. В качестве обобщенных координат k привода выбираем угол поворота α_{1k} выходного вала двигателя (червяка), угол поворота α_{2k} червячного колеса и угол поворота α_{3k} винта при входе в гайку исполнительного цилиндра. Вследствие податливости передачи они отличаются на величину угловой деформации [105].

Динамическая характеристика приводного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением имеет вид [99]

$$\tau \dot{T}_k + T_k = r u_k(t) - s \omega_{1k}, \quad (4.10)$$

где T_k – момент на валу двигателя; τ – электромагнитная постоянная времени; r, s – коэффициенты, зависящие от параметров двигателя; $u_k(t)$ – управляющее напряжение; ω_{1k} – угловая скорость на валу двигателя.

Дифференциальные уравнения вращательного движения червяка с ротором электродвигателя, червячного колеса с винтом электроцилиндра и поступательного движения гайки со штоком исполнительного звена, имеют вид

$$I_1 \dot{\omega}_{1k} = T_k - T_{1k} - T_{c1} \cdot \text{sign} \omega_{1k}, \quad (4.11)$$

$$I_2 \dot{\omega}_{2k} = T_{2k} - T_{3k} - T_{c2} \cdot \text{sign} \omega_{2k}, \quad (4.12)$$

$$m_3 \ddot{j}_k = F_k^{oc} - F_k, \quad (4.13)$$

где I_1, I_2 – моменты инерции червяка с ротором и червячного колеса с винтом; $\dot{\omega}_{1k}, \dot{\omega}_{2k}$ – угловые ускорения ротора электродвигателя и червячного колеса; T_{1k}, T_{2k}, T_{3k} – моменты, приложенные к червяку, к червячному колесу редуктора и к гайке со стороны винта; T_{c1}, T_{c2} – постоянные моменты сил сопротивления, приложенные к червяку и к валу червячного колеса; m_3 – масса гайки со штоком исполнительного звена; F_k^{oc} – осевая движущая сила; F_k – усилие на штоке, определяемое нагрузкой при работе манипулятора.

Моменты на валу червячного колеса и на червяке связаны соотношением [99, 124]

$$T_{2k} = T_{1k} \cdot i \cdot \eta = c_{1\varphi} \cdot \left(\frac{\alpha_{1k}}{i} - \alpha_{2k} \right) \cdot i \cdot \eta, \quad (4.14)$$

где $c_{1\varphi}$ - приведенная жесткость упругой связи между валом двигателя и червячным колесом; η - коэффициент полезного действия редуктора; i - передаточное отношение конического и червячного редукторов.

При ведущем червяке $T_{1k} \cdot \omega_{1k} > 0$ коэффициент полезного действия равен $\eta = \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg}(\beta_1 + \rho_1)}$. Здесь β_1 - угол подъема винтовой линии червяка; ρ_1 - приведенный угол трения.

Если $T_{1k} \cdot \omega_{1k} < 0$ движение невозможно, вследствие необратимости редуктора. В этом случае в механической передаче произойдет динамическое или силовое заклинивание [99].

Момент на ведущем вращающемся винте связан с осевой силой, действующей на гайку со штоком, выражением

$$T_{3k} = c_{2\varphi} (\alpha_{2k} - \alpha_{3k}) = 0,9 F_k^{oc} \frac{d_3}{2} \cdot \operatorname{tg}(\beta_3 + \rho_3), \quad (4.15)$$

где $c_{2\varphi}$ - жесткость винта на кручение; β_3 , ρ_3 - угол подъема винтовой линии и приведенный угол трения, соответственно; d_3 - средний диаметр резьбы винта.

Угловая скорость винта связана с линейной скоростью перемещения исполнительного звена соотношением

$$\dot{\alpha}_{3k} = \frac{2\pi}{pn} j_k, \quad (4.16)$$

где p - шаг резьбы, мм;

n - число заходов резьбы.

4.3.2. Условия отсутствия силового и динамического заклинивания

Крутящий момент на валу электродвигателя находим, решая совместно уравнения (4.11) – (4.16)

$$T_k = I_1 \dot{\omega}_{1k} + a_2 \frac{m_3 I_2}{c_{2\varphi}} \ddot{l}_k + a_1 \ddot{l}_k(t) + a_2 \cdot \frac{I_2}{c_{2\varphi}} \ddot{F}_k + a_2 \cdot F_k + T_{c1} \text{sign} \omega_{1k} + \frac{T_{c2}}{i\eta} \text{sign} \omega_{2k}, \quad (4.17)$$

$$\text{где } a_1 = I_2 \frac{2\pi}{pn i \eta} + a_2 m_3, \quad a_2 = \frac{0.45 d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{i\eta}.$$

Тогда из (4.11)

$$T_{1k} = T_k - I_1 \dot{\omega}_{1k} - T_{c1} \cdot \text{sign} \omega_{1k}, \quad (4.18)$$

и условия отсутствия силового и динамического заклинивания имеют вид, ($T_{1k} > 0$, если $\omega_{1k} > 0$ и $T_{1k} < 0$, если $\omega_{1k} < 0$)

при $\omega_k > 0$

$$F_k + \ddot{F}_k \frac{I_2}{c_{2\varphi}} \geq - \frac{T_{c2}}{0.45 d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} - \ddot{l}_k \frac{m_3 I_2}{c_{2\varphi}} - \ddot{l}_k (m_3 + I_2 \frac{2\pi}{0.45 p n d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}), \quad (4.19)$$

и при $\omega_k \leq 0$

$$F_k + \ddot{F}_k \frac{I_2}{c_{2\varphi}} \leq \frac{T_{c2}}{0.45 d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} - \ddot{l}_k \frac{m_3 I_2}{c_{2\varphi}} - \ddot{l}_k (m_3 + I_2 \frac{2\pi}{0.45 p n d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}), \quad (4.20)$$

Таким образом, выражение (4.17) определяет необходимое значение момента на валу электродвигателя, а при нарушении условий (4.19, 4.20) в передаче произойдет силовое или динамическое заклинивание, что может привести к неустойчивой работе привода и даже к его поломке. По максимальному значению необходимого момента производят выбор электродвигателя.

Из системы алгебраических (4.5, 4.14, 4.15) и дифференциальных уравнений (4.6, 4.11 -4.13, 4.16), задаваясь законами изменения управляющих напряжений $u_k(t)$ в приводных электродвигателях, находятся неизвестные координаты точки подвеса $x(t), y(t), z(t), \varphi(t)$ и координаты груза $x_E(t), y_E(t), z_E(t)$; обобщенные

координаты манипулятора $l_k(t)$; усилия в звеньях F_k и подвесе F_5 , а также моменты на валу электродвигателей T_k , моменты на червяке T_{1k} и червячном колесе T_{2k} ; угловые координаты $\alpha_{1k}, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}, (k=1 \div 4)$.

Для грузовых манипуляторов, при небольших значениях ускорений переносимого груза, выражения для момента на валу приводного двигателя (4.17) и условия (4.19, 4.20) отсутствия силового и динамического заклинивания упрощаются

$$T_k = I_1 \dot{\omega}_{1k} + a_1 \ddot{l}_k(t) + a_2 \cdot F_k + T_{c1} \text{sign} \omega_{1k} + \frac{T_{c2}}{i\eta} \text{sign} \omega_{2k}, \quad (4.21)$$

при $\omega_k > 0$

$$F_k \geq -\frac{T_{c2}}{0.45d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} - \ddot{l}_k \left(m_3 + I_2 \frac{2\pi}{0.45pn d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} \right), \quad (4.22)$$

и при $\omega_k \leq 0$

$$F_k \leq \frac{T_{c2}}{0.45d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} - \ddot{l}_k \left(m_3 + I_2 \frac{2\pi}{0.45pn d_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)} \right). \quad (4.23)$$

В отсутствии внешних сил и сил сопротивления динамическое заклинивание происходит при изменении знака \ddot{l}_k , то есть при торможении (4.22, 4.23). При наличии сил сопротивления и выключенном двигателе ($T_k = 0$),

учитывая, что при $\ddot{l}_k \approx 0$, $\dot{\omega}_{1k} \cong \frac{2\pi}{pn} i \cdot \ddot{l}_k$, находим

$$\ddot{l}_k = -\frac{T_{c1} \text{sign} \omega_{1k} + \frac{T_{c2}}{i\eta} \text{sign} \omega_{2k}}{I_1 \frac{2\pi}{pn} i + I_2 \frac{2\pi}{pn i \eta} + \frac{0.45d_3 m_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{i\eta}}. \quad (4.24)$$

Подставляя это выражение в (4.21), находим, что для отсутствия динамического заклинивания должно выполняться условие

$$\frac{T_{c2}}{T_{c1}} > \frac{I_2 \frac{2\pi}{pn i \eta} + \frac{0.45d_3 m_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{i\eta}}{I_1 \frac{2\pi}{pn} i}. \quad (4.25)$$

При выполнении этого условия в необратимой червячной передаче торможение будет происходить с постоянным ускорением. Нарушение этого условия может привести к динамическому заклиниванию.

4.3.3. Устойчивость движения привода исполнительных звеньев манипулятора

Для момента на валу электродвигателя из (4.17), с учетом приближенного равенства для угловой скорости вала электродвигателя

$$\omega_{1k} \cong \frac{2\pi i}{pn} \dot{l}_k + \left(\frac{i}{c_{2\varphi}} + \frac{1}{c_{1\varphi}\eta} \right) 0.45d_3(m_3\ddot{l}_k + \dot{F}_k) \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3),$$

получаем выражение для расчета момента электродвигателя

$$\begin{aligned} T_k = & a_2 m_3 i \left[\frac{i\eta}{c_{2\varphi}} \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) + \frac{I_1}{c_{1\varphi}} \right] \ddot{l}_k + \left[\left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) \frac{2\pi i}{pn} + a_2 m_3 \right] \ddot{l}_k(t) + \\ & + a_2 i \left[\frac{i\eta}{c_{2\varphi}} \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) + \frac{I_1}{c_{1\varphi}} \right] \ddot{F}_k + a_2 \cdot F_k + T_{c1} \operatorname{sign} \omega_{1k} + \frac{T_{c2}}{i\eta} \operatorname{sign} \omega_{2k}, \end{aligned} \quad (4.26)$$

где, как и ранее, $a_1 = I_2 \frac{2\pi}{pn i \eta} + a_2 m_3$, $a_2 = \frac{0.45 d_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{i\eta}$.

Подставляя (4.21) в (4.6), и пренебрегая производными выше третьего порядка, получаем дифференциальное уравнение относительно $l_k(t)$

$$\begin{aligned} & \left[\tau \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) \frac{2\pi i}{pn} + \tau a_2 m_3 + a_2 m_3 i \eta \left(\frac{1}{c_{2\varphi}} + \frac{1}{c_{1\varphi}\eta} \right) \right] \ddot{l}_k(t) + \left[\left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) \frac{2\pi i}{pn} + a_2 m_3 \right] \ddot{l}_k(t) + \\ & + s \frac{2\pi i}{pn} \dot{l}_k(t) = r u_k - a_2 \cdot F_k - \tau a_2 \cdot \dot{F}_k - a_2 i \left[\frac{i\eta}{c_{2\varphi}} \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) + \frac{I_1}{c_{1\varphi}} \right] \ddot{F}_k - \\ & - T_{c1} \operatorname{sign} \omega_{1k} - \frac{T_{c2}}{i\eta} \cdot \operatorname{sign} \omega_{2k}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Если пренебречь величиной электромагнитной постоянной времени электродвигателя τ (статическая характеристика электродвигателя), то уравнение (4.27) принимает вид

$$\begin{aligned} & \left[s \cdot a_2 m_3 i \eta \left(\frac{i}{c_{2\varphi}} + \frac{1}{c_{1\varphi} \eta} \right) \right] \ddot{i}_k(t) + \\ & + \left[\left(I_1 + \frac{I_2}{i^2 \eta} \right) \frac{2\pi i}{pn} + a_2 m_3 \right] \dot{i}_k(t) + s \frac{2\pi i}{pn} i_k(t) = \\ & = r u_k - a_2 \cdot F_k - T_{c1} \operatorname{sign} \omega_{1k} - \frac{T_{c2}}{i \eta} \cdot \operatorname{sign} \omega_{2k}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Дифференциальное уравнение (4.28) линейное неоднородное с постоянными коэффициентами. Известна теорема, устанавливающая связь устойчивости решений неоднородного линейного уравнения с устойчивостью решений однородного уравнения. Она гласит, что «линейное неоднородное дифференциальное уравнение устойчиво (асимптотически устойчиво) тогда и только тогда, когда устойчиво (асимптотически устойчиво) соответствующее однородное уравнение». Также справедлива теорема, об устойчивости решений однородного дифференциального уравнения: «Для устойчивости линейного однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами необходимо и достаточно, чтобы корни характеристического уравнения имели неположительные вещественные части, причем элементарные делители, соответствующие корням характеристического уравнения с нулевой вещественной частью, были простыми» [123, 298].

Характеристическое уравнение для (4.28) имеет вид

$$\begin{aligned} & \left[s \cdot 0.45 d_3 m_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3) \cdot \left(\frac{1}{c_{2\varphi}} + \frac{1}{c_{1\varphi} \eta} \right) \right] \lambda^3 + \\ & + \left(I_1 \frac{2\pi i}{pn} + I_2 \frac{2\pi}{pn i \eta} + \frac{0.45 d_3 m_3 \operatorname{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{i \eta} \right) \lambda^2 + s \frac{2\pi i}{pn} \lambda = 0. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Два его корня заведомо имеют отрицательные вещественные части, а один равен нулю, следовательно, уравнение (4.28) устойчиво асимптотически.

4.3.4. Анализ динамических ошибок

Определение динамических ошибок сводится к интегрированию дифференциальных уравнений (4.6, 4.11-4.13, 4.16), из которых определяются законы изменения обобщенных координат манипулятора $l_k(t)$, ($k=1 \div 4$), тогда динамические ошибки получаются по формулам

$$\psi_k = l_k(t) - l_k^*(t), \quad \dot{\psi}_k = \dot{l}_k(t) - \dot{l}_k^*(t), \quad (k=1 \div 4). \quad (4.30)$$

Задачей управления манипулятором является уменьшение отклонений реализуемых движений захвата от задаваемых.

Информация о величине динамических ошибок $\psi_k, \dot{\psi}_k$, ($k=1 \div 4$) используется для формирования управляющих сигналов в системе управления манипулятором с обратными связями [146, 195, 267, 270, 278].

Перепишем уравнение (4.28) в виде

$$\begin{aligned} \tau_1^2 \ddot{l}_k(t) + \tau_2 \dot{l}_k(t) + \dot{l}_k(t) = r \frac{pn}{2\pi si} u_k - a_2 \frac{pn}{2\pi si} \cdot F_k - \\ - T_{c1} \frac{pn}{2\pi si} \text{sign} \omega_{1k} - T_{c2} \frac{pn}{2\pi si^2 \eta} \cdot \text{sign} \omega_{2k}. \end{aligned} \quad (4.31)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} \tau_1^2 = \frac{0.45 d_3 p n m_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{2\pi i} \left(\frac{i}{c_{2\varphi}} + \frac{1}{c_{1\varphi} \eta} \right), \text{ и} \\ \tau_2 = \frac{I_1}{s} + \frac{I_2}{si^2 \eta} + \frac{0.45 d_3 p n m_3 \text{tg}(\beta_3 + \varphi_3)}{2\pi si^2 \eta}. \end{aligned}$$

Выбирая программное управление $u_k^*(t)$, соответствующее выбранным программным движениям $l_1^*(t), l_2^*(t), l_3^*(t), l_4^*(t)$ $u_k(t) = u_k^*(t) - \Delta u$ и, подставляя (4.30) в (4.31), получаем

$$\tau_1^2 \ddot{\psi}_k(t) + \tau_2 \dot{\psi}_k(t) + \psi_k(t) = -r \frac{pn}{2\pi si} \Delta u_k, \quad (4.32)$$

В операторной форме передаточная функция, связывающая динамическую ошибку с управляющим сигналом в системе управления без обратной связи, имеет вид

$$W_{uv} = \frac{r \frac{pn}{2\pi si}}{p(\tau_1^2 p^2 + \tau_2 p + 1)}. \quad (4.33)$$

Передаточная функция, связывающая динамическую ошибку в замкнутой системе управления с возмущением (рис.4.14), имеет вид

$$W_{\phi v} = \frac{1}{p(\tau_1^2 p^2 + \tau_2 p + 1) + r \frac{pn}{2\pi si} \cdot W_{oc}(p)}, \quad (4.34)$$

где $W_{oc}(p)$ - передаточная функция регулятора обратной связи.

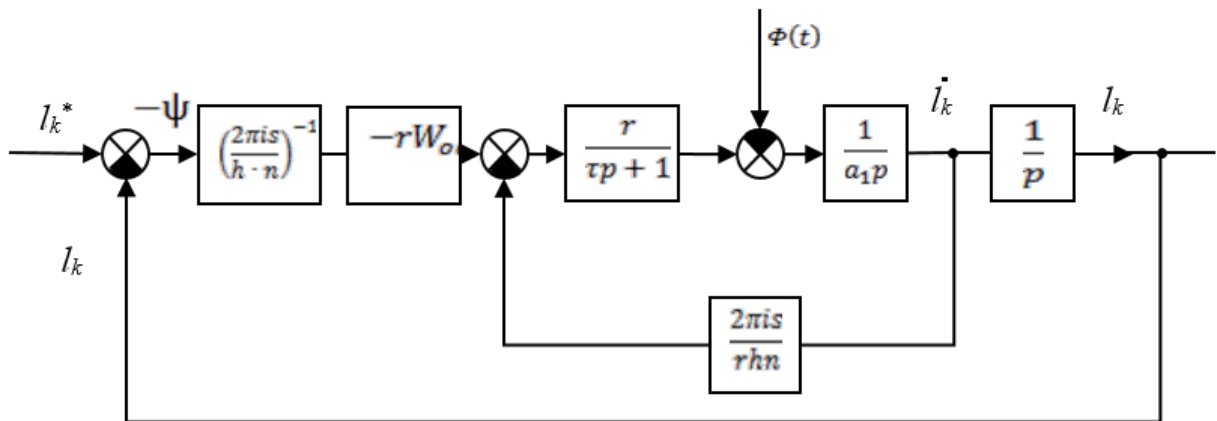


Рисунок 4.14 – Функциональная схема замкнутой системы управления с возмущением

При использовании пропорционального регулятора (П – регулятора) $W_{oc}(p) = k_1 = const$. Такой регулятор применяется в позиционных системах управления, так с его помощью можно значительно уменьшить статическую ошибку. В случае применения пропорционально – дифференциального (ПД) регулятора $W_{oc}(p) = k_1 + k_2 p$, система управления становится астатической, управление осуществляется по скорости и применяется в контурных системах

управления. Также часто используются пропорционально – интегрально – дифференциальные (ПИД) регуляторы $W_{oc}(p) = k_1 + k_2 p + \frac{k_3}{p}$, статическая ошибка, которых также равна нулю при действии постоянного возмущения.

4.4. Результаты численных экспериментов

Для анализа энергетических возможностей манипулятора (энергетически допустимой зоны обслуживания), возможно в качестве «стандартных» траекторий захвата принять прямолинейную траекторию. В качестве стандартных принимаем перемещение точки крепления подвеса по вертикали и горизонтали в направлениях осей Oz и Oy (рисунок 4.1) из крайних положений, допускаемых теоретической зоной обслуживания манипулятора.

Численные исследования проводились с манипулятором со следующими параметрами: максимальный допустимый момент на валу электродвигателя $T_{k,max} = 0.55$ Н·м; максимальная нагрузка толкания и втягивания, соответствующая этому моменту равна 2300 Н; первый исполнительный цилиндр изменяет свою длину в пределах $l_1 = (1465 \pm 305)$ мм, второй и третий в пределах $l_{2,3} = (1445 \pm 305)$ мм, четвертый $l_4 = (1072 \pm 229)$ мм; максимальная скорость при полной нагрузке 45 мм/с, в отсутствии нагрузки 65 мм/с. В результате решения задачи идентификации [387, 388] для разработанного манипулятора получено $m = 57$ кг, $m_A = 45$ кг.

В качестве иллюстрации полученных результатов на рисунке 4.15 приведены зависимости усилий в исполнительных цилиндрах для перемещения захвата по горизонтали вдоль оси Oy (рисунок 4.1) с массой переносимого груза 32 кг.

Зависимости усилий в исполнительных звеньях не превышают предельно допустимой нагрузки.

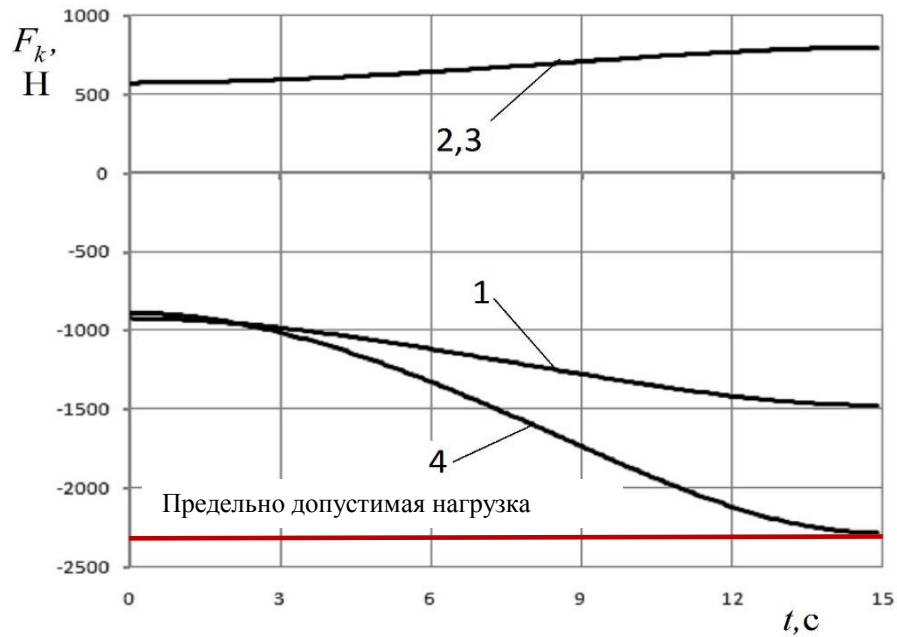


Рисунок 4.15 - Зависимость усилий, развиваемых исполнительными цилиндрами при их выдвигении

Время перемещения захвата определено из условия не превышения максимальной допустимой скорости выдвигения цилиндра, начальное положение захвата (точка M_0) соответствует минимальным длинам цилиндров, а конечное положение захвата (точка M_K) соответствует максимальной длине цилиндров 2 и 3 (рисунок 4.16). Масса переносимого груза определена из условия не превышения допускаемого усилия толкания и втягивания, при этом относительные ускорения перемещения штоков не превышают 20 мм/с^2 и вторые и третьи слагаемые в формулах (4.19, 4.20) практически не влияют на конечный результат.

Из графиков (рисунок 4.15) видно, что на всей траектории движения цилиндры 1 и 4 растянуты, а цилиндры 2 и 3 сжаты. При перемещении захвата из начального положения в конечное положение ($\omega_k > 0$), усилия в приводах цилиндров 2, 3 направлены в стороны противоположные направлениям перемещения штоков и опасность возникновения режима силового или динамического заклинивания для них отсутствует (4.19). Усилие в приводе ограничено предельно допустимым значением (рисунок 4.15). При перемещении

захвата в обратном направлении ($\omega_k \leq 0$), усилия в приводах этих же цилиндров совпадают по направлению с перемещением их штоков, и необходима проверка на возможность возникновения режима динамического заклинивания (4.19). Расчеты показывают, что необходимое значение момента сил сопротивления на валу червячного колеса, при котором отсутствует риск возникновения динамического заклинивания, для этого режима движения не превышает 0.6 Нм.

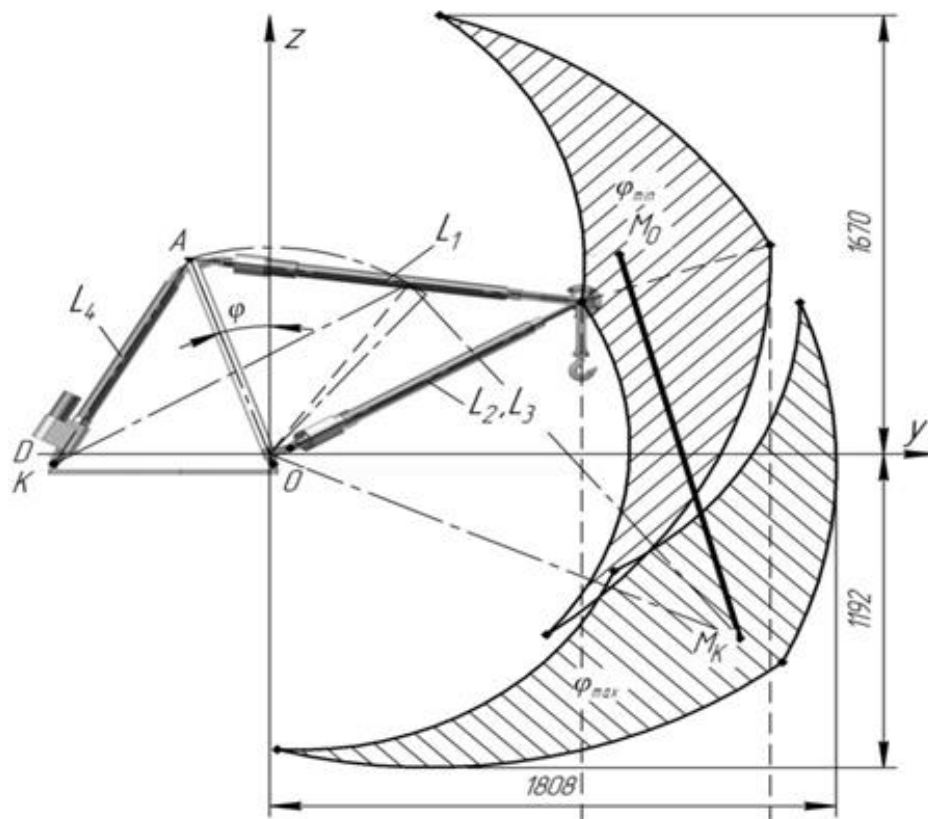


Рисунок 4.16 - Сечения рабочей зоны манипулятора при двух предельных значениях угла поворота основания. M_0M_k - прямолинейная траектория точки крепления подвеса

Для приводов звеньев 1 и 4 ситуация обратная. При удлинении звена 1 ($\omega_k > 0$) усилия в этих звеньях направлены в сторону перемещения захвата, и необходима проверка на возможность возникновения режима силового или динамического заклинивания (4.19). Тогда как при обратном движении ($\omega_k \leq 0$), работоспособность привода определяется допустимым значением усилия на

штоке исполнительного цилиндра (4.20). На рисунке 4.17 приведены значения моментов сил сопротивления на валу червячного колеса, при которых отсутствует возможность возникновения режима динамического заклинивания. В случае опасности возникновения режима заклинивания необходимо либо уменьшить массу переносимого груза, либо усложнить приводной механизм [99].

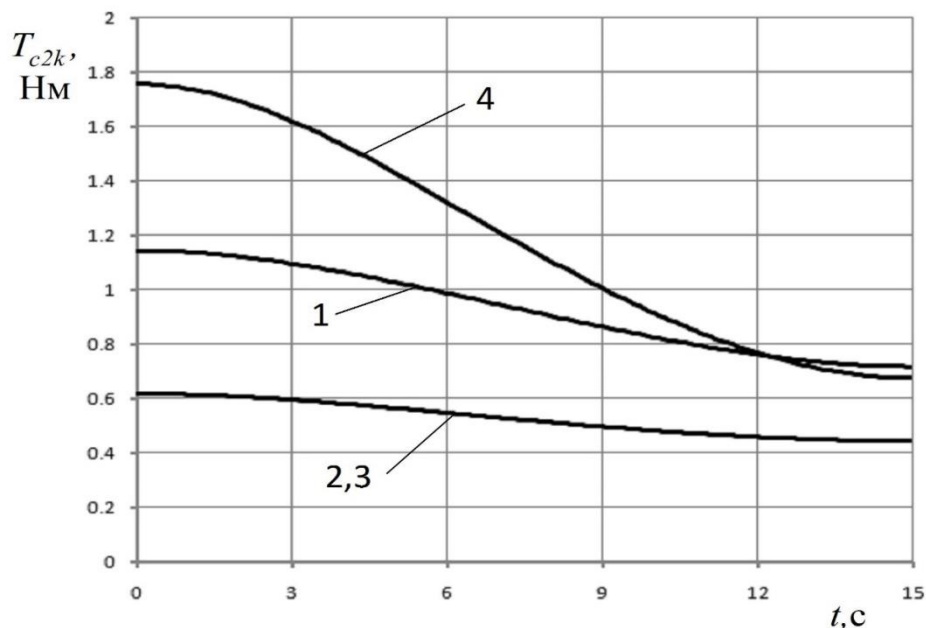


Рисунок 4.17 - Зависимости моментов сил сопротивления на валу червячного колеса при втягивании

На рисунках 4.18 и 4.19 приведены теоретические зависимости моментов на валу электродвигателя для режимов перемещения захвата манипулятора — выдвигание соответствующего цилиндра (рисунок 4.18), втягивание соответствующего цилиндра (рисунок 4.19).

В процессе численного моделирования движения захвата манипулятора контролировались условия отсутствия динамического и силового заклинивания.

Таким образом, установлено, что нагрузочная способность манипулятора зависит не только от конструктивных параметров его звеньев и мощности приводных двигателей, но и от направления перемещения груза по траектории. При перемещении захвата по прямолинейной траектории возможны варианты перемещения захвата, при которых угловая скорость приводного двигателя

изменяет знак. В этих случаях в системе управления необходимо предусмотреть вычислительный блок проверки на возможность возникновения режима динамического заклинивания.

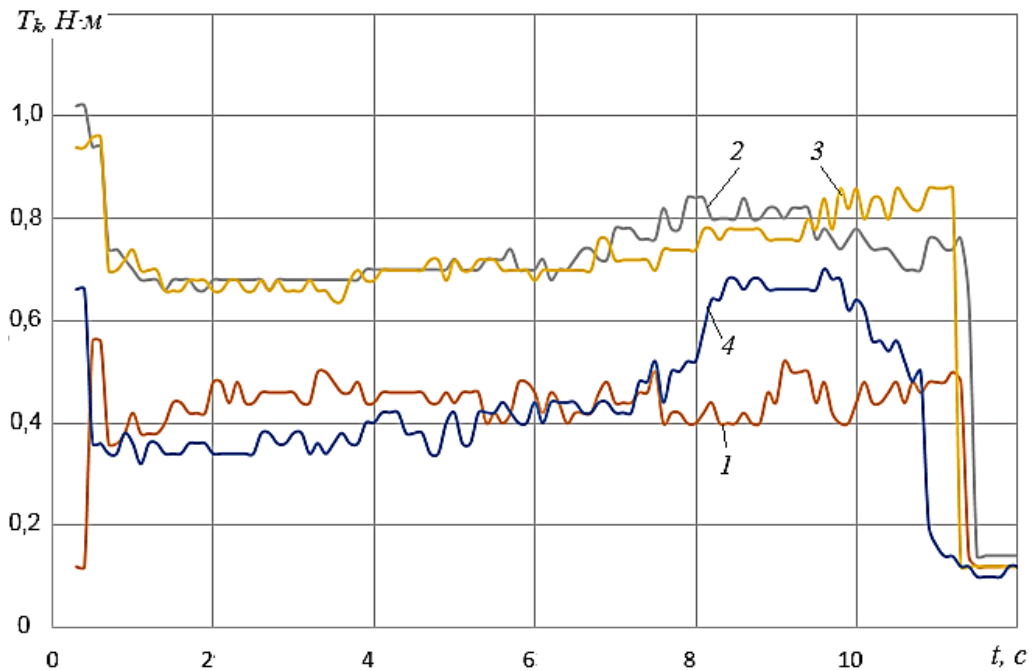


Рисунок 4.18 - Зависимость момента электродвигателя при выдвигении цилиндров: 1, 2, 3, 4 – номера соответствующих исполнительных звеньев

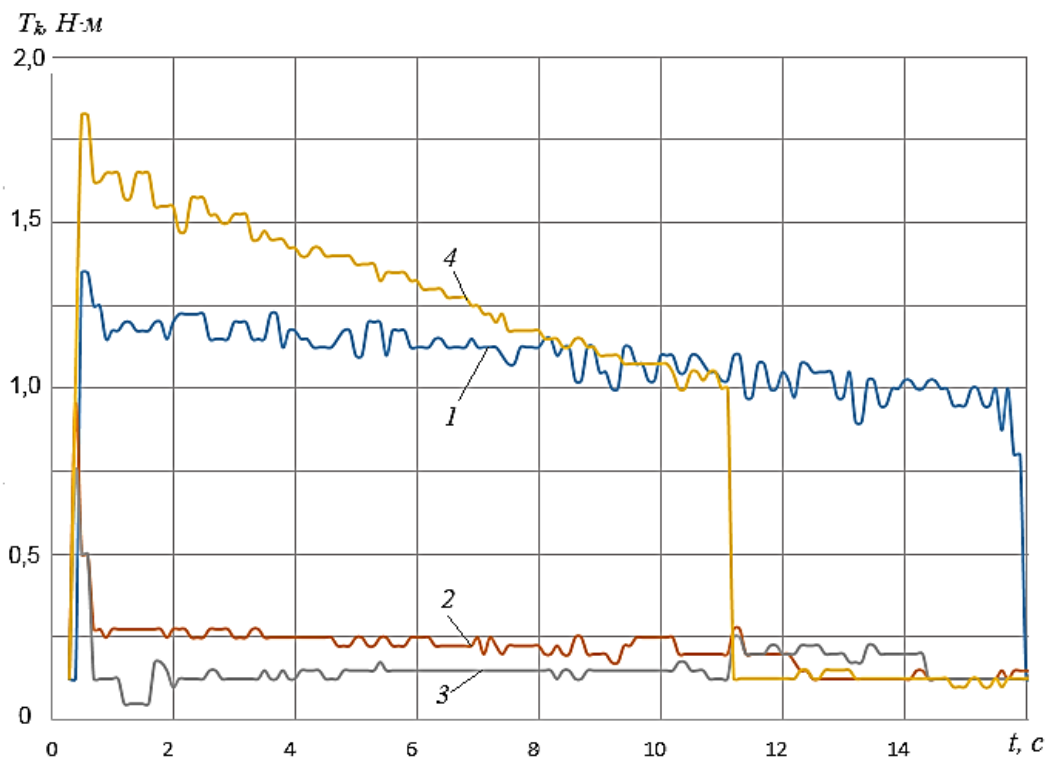


Рисунок 4.19 - Зависимость момента электродвигателя при втягивании цилиндров: 1, 2, 3, 4 – номера соответствующих исполнительных звеньев

Полученные аналитические выражения для оценки функциональных возможностей манипулятора позволяют проводить проектирование следящего привода манипулятора – трипода [12, 176].

4.5. Динамический синтез оптимальных законов перемещения исполнительных звеньев манипулятора

Разработка оптимальных 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 выходного звена манипулятора разделяется на три этапа – позиционирование, задание или синтез траектории в пространстве и определение либо синтез закона движения по траектории [6, 31, 32, 57, 60, 63, 65, 67, 83, 183, 188, 237, 387].

Манипуляторы параллельной структуры способны обеспечить достаточно высокие динамические характеристики при относительно небольшой металлоёмкости. Однако отсутствие развитой системы управления препятствует широкому применению таких манипуляторов.

В данном разделе представлен аналитический метод синтеза систем управления манипуляторов, построенных на основе пространственного механизма параллельно-последовательной структуры с четырьмя исполнительными поступательными парами. Кинематическая схема параллельно-последовательного манипулятора, в котором оси трёх исполнительных цилиндров линейного перемещения геометрически сходятся в одной точке, представлена на рисунке 4.1.

Число обобщённых координат манипулятора превышает число обобщённых координат захвата, т.е. манипулятор имеет ненулевую маневренность и заданному конечному положению захвата соответствует бесконечное множество его

конфигураций [363]. В этом случае появляется возможность проводить оптимизационный синтез траекторий и законов движения захвата манипулятора по траектории из начального положения в заданное конечное положение [22].

4.5.1. Постановка задачи

Если динамические процессы объекта исследования описываются n мерным вектором состояния системы $x(t)$ и m мерным вектором управления $u(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$ дифференциальными уравнениями вида

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t), \quad x \in R^n, u \in R^m, \quad (4.35)$$

и область допустимых управлений $U_{\text{Доп}}$ является множеством ограниченных непрерывных функций $u(t)$ на интервале $[t_1, t_1]$, то для критерия качества

$$I = V(x(t_2), t_2) + \int_{t_1}^{t_2} L(x, u, t) dt, \quad (4.36)$$

где $L(x, u, t)$ - действительная, непрерывная функция, дифференцируемая по x и t ; $V(x(t_2), t_2)$ - действительная функция конечного состояния, которая может уточняться при последующих итерационных процессах, то задачей оптимального управления является отыскание такого управления $u(t)$, что функционал (4.36) достигает минимального значения. Эту задачу нахождения оптимального программирования управления относят к задачам вариационного исчисления [24, 34, 84].

Выражения необходимых условий оптимальности, при заданном интервале времени $[t_1, t_2]$ процесса, зависят от вида граничных условий, накладываемых на переменные состояния $x(t_1), x(t_2)$. Так, для фиксированных значений некоторых переменных состояния в момент окончания процесса, необходимые условия оптимальности имеют вид [34]

$$\frac{\partial H(x, u, \mu)}{\partial u} = 0, \quad (4.37)$$

$$\dot{\mu}(t) = - \left[\frac{\partial H(\bar{x}, u, \bar{\mu}, t)}{\partial x} \right]^T, \quad (4.38)$$

где $H[x(t), u(t), \mu(t), t] = L[x(t), u(t), t] + \mu^T(t) \cdot f[x(t), u(t), t]$ - скалярная вспомогательная функция (гамильтониан); $\mu(t)$ - функции чувствительности критерия I на вариации $x(t)$.

Таким образом, для того чтобы найти $u(t) \in U_{\text{дон}}$, при котором критерий качества достигает минимального значения, необходимо решить двухточечную краевую задачу, т. е. решить систему (4.35, 4.38) дифференциальных уравнений порядка $2n$ [34] с n граничными условиями на левом конце $x(t_1) = x_1$ и n граничными условиями на правом конце

$$\mu_j(t_2) = \begin{cases} \gamma_j, & \overline{j=1, q}, \\ \frac{\partial V(x(t_2), t_2)}{\partial x_j(t_2)}, & \overline{j=q+1, n}, \end{cases}, \quad (4.39)$$

где q - количество заданных заранее компонент вектора состояния $x(t_2)$ при $t = t_2$.

Вектор управления $u(t)$ находится из (4.37).

Если функция $H[x(t), u(t), \mu(t)]$ явно от времени не зависит, а $u(t)$ - оптимальное управление $\left(\frac{\partial H(x, u, \mu)}{\partial u} = 0 \right)$, то $\dot{H} = 0$ или $H = \text{const}$ - первый интеграл системы (4.35, 4.38).

Для того, чтобы критерий качества достигал локального минимума выполнения условий (4.37) недостаточно. Если функция $H[x(t), u(t), \mu(t)]$ гладкая и ограничения на управления отсутствуют, то необходимые и достаточные условия локального минимума критерия (4.36) можно записать в виде

$$\frac{\partial H(x, u, \mu, t)}{\partial u} = 0, \quad \frac{\partial^2 H(x, u, \mu, t)}{\partial u^2} \geq 0. \quad (4.40)$$

4.5.2. Синтез оптимальных программных усилий при заданной конечной конфигурации манипулятора

Число степеней свободы захвата манипулятора, изображенного на рисунке 4.1. равно трем $x(t), y(t), z(t)$, а число независимых обобщенных координат манипулятора равно четырем $l_k(t)$, $k = 1 \div 4$, то манипулятор обладает не нулевой маневренностью. То есть заданному конечному положению захвата $x(T), y(T), z(T)$, может соответствовать несколько возможных конфигураций манипулятора $l_k(T)$, $k = 1 \div 4$.

Задача позиционирования - перевод звеньев манипулятора из положения $M_0[x(0), y(0), z(0)]$ в конечное положение $M_f[x(T), y(T), z(T)]$ решена в главе 3 из условия минимума изменения длин исполнительных звеньев в зависимости от усилий, действующих на них. Достижение оптимального решения обеспечивается необходимыми условиями стационарности квадратичной функции (3.32) [29, 165]. Таким образом, находится конечная конфигурация манипулятора, определяемая значениями длин исполнительных звеньев манипулятора $l_k(T)$. После решения задачи позиционирования, возникает задача определения законов изменения обобщенных координат $l_k(t)$.

Ниже приводится решение задачи синтеза траектории и закона движения точки крепления подвеса захвата по траектории по методу, изложенному в разделе 4.2. При этом все переменные состояния известны в начальный $t_0 = 0$ и в конечный $t_f = T$ моменты времени.

Дифференциальные уравнения Лагранжа с неопределенными множителями для обобщенных декартовых координат точки крепления подвеса $M[x(t), y(t), z(t)]$ и захвата с грузом $E[x_E(t), y_E(t), z_E(t)]$ относительно абсолютной системы координат, и угла $\varphi(t)$ наклона основания манипулятора можно записать в форме системы дифференциальных уравнений первого порядка

$$\dot{x}_1 = x_2,$$

$$\dot{x}_2 = F_1 \frac{x_1}{ml_1} + F_2 \frac{x_1 - OB}{ml_2} + F_3 \frac{x_1 + OB}{ml_3} + F_5 \frac{x_1 - x_9}{ml_5} - \frac{\lambda_6}{m} (x_{11} + OA \cdot \sin x_7),$$

$$\dot{x}_3 = x_4,$$

$$\dot{x}_4 = F_1 \frac{x_3 + OA \cdot \sin x_7}{ml_1} + F_2 \frac{x_3}{ml_2} + F_3 \frac{x_3}{ml_3} + F_5 \frac{x_3 - x_{11}}{ml_5} + \frac{\lambda_6}{m} x_9,$$

$$\dot{x}_5 = x_6,$$

$$\dot{x}_6 = F_1 \frac{x_5 - OA \cdot \cos x_7}{ml_1} + F_2 \frac{x_5}{ml_2} + F_3 \frac{x_5}{ml_3} + F_5 \frac{x_5 - x_{13}}{ml_5} - g,$$

$$\dot{x}_7 = x_8,$$

(4.41)

$$\dot{x}_8 = F_1 \frac{x_3 \cdot \cos x_7 + x_5 \cdot \sin x_7}{OA \cdot m_A l_1} + F_4 \frac{DK \cdot \sin x_7 - OK \cdot \cos x_7}{OA \cdot m_A l_4} - \lambda_6 \frac{(x_1 - x_9)}{OA \cdot m_A} \cdot \cos x_7 + \frac{g}{OA} \sin x_7,$$

$$\dot{x}_9 = x_{10},$$

$$\dot{x}_{10} = -F_5 \frac{x_1 - x_9}{m_G l_5} + \frac{\lambda_6}{m_G} (x_3 + OA \cdot \sin x_7) - 2nx_{10},$$

$$\dot{x}_{11} = x_{12},$$

$$\dot{x}_{12} = -F_5 \frac{x_3 - x_{11}}{m_G l_5} - \frac{\lambda_6}{m_G} x_1 - 2nx_{12},$$

$$\dot{x}_{13} = x_{14},$$

$$\dot{x}_{14} = -F_5 \frac{x_5 - x_{13}}{m_G l_5} - g - 2nx_{14},$$

где введены следующие обозначения:

$$x_1 = x, \quad x_3 = y, \quad x_5 = z, \quad x_7 = \varphi, \quad x_9 = x_E, \quad x_{11} = y_E, \quad x_{13} = z_E.$$

Необходимо решить задачу определения функций $x_{2S-1}(t)$, с фиксированными значениями переменных $x_{2S-1}(0) = x_{2S-1,0}$, $x_{2S-1}(T) = x_{2S-1,T}$, $x_{2S}(0) = x_{2S}(T) = 0$, $S=1,2,3,4$ в начальный и в заданный момент времени T окончания процесса перевода точки крепления подвеса захвата манипулятора из начального положения в конечное. Как правило, эта задача решается независимым выбором для каждой из обобщённых координат манипулятора $l_k(t)$

одного из законов «мягкого» трогания и останова, удовлетворяющих необходимым граничным условиям [38, 167].

Однако для грузового манипулятора целесообразно в качестве закона изменения длин исполнительных цилиндров принять законы, получающиеся в результате минимизации функционала [266]

$$I = \int_0^T [\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2 + O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2] dt. \quad (4.42)$$

Первые три слагаемых в функционале (4.42) представляют собой квадрат абсолютного ускорения точки подвеса захвата ($\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2$). Ограничение модуля этого ускорения, уменьшает величину возмущающих сил инерции, действующих на груз, переносимый на подвесе, и уменьшает амплитуду раскачивания груза при его перемещении. Четвертое слагаемое является квадратом касательного ускорения точки крепления привода, поворотного основания - $O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2$. При функционировании манипулятора этот привод является наиболее нагруженным [382], в том числе силами инерции. Так как, в прототипе исследуемого манипулятора, применяется электропривод постоянного тока с самотормозящейся механической передачей, то при значительных отрицательных ускорениях, возможно реализация режима силового или динамического заклинивания [217, 382]. Следствием является неустойчивая работа привода. В связи с этим, минимизация ускорения выходного звена (точка A) четвертого привода, является обоснованным. Управляющими функциями являются усилия в звеньях манипулятора $u_k(t) = F_k(t)$, $k = 1 \div 4$.

В соответствии с методом классического вариационного исчисления [38, 84, 261], гамильтониан $H(t)$ из (4.41) и (4.42) равен

$$H(t) = \dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2 + O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2 + \mu_1 \cdot x_2 + \mu_3 \cdot x_4 + \mu_5 \cdot x_6 + \mu_7 \cdot x_8 + \mu_9 \cdot x_{10} + \mu_{11} \cdot x_{12} + \mu_{13} \cdot x_{14} + \mu_2 \cdot \dot{x}_2 + \mu_4 \cdot \dot{x}_4 + \mu_6 \cdot \dot{x}_6 + \mu_8 \cdot \dot{x}_8 + \mu_{10} \cdot \dot{x}_{10} + \mu_{12} \cdot \dot{x}_{12} + \mu_{14} \cdot \dot{x}_{14}. \quad (4.43)$$

Необходимые условия оптимальности (4.40) записываются в виде

$$\frac{\partial H(\bar{x}, \bar{F}, \bar{\mu})}{\partial F_k} = 0. \quad (4.44)$$

Исходя из выражения(4.43), и следуя (4.44), получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial F_1} &= 2\dot{x}_2 \cdot \frac{x_1}{ml_1} + 2\dot{x}_4 \cdot \frac{x_3 + OA \sin x_7}{ml_1} + 2\dot{x}_6 \cdot \frac{x_5 - OA \cos x_7}{ml_1} + 2OA^2 \cdot \dot{x}_8 \cdot \frac{x_3 \cos x_7 + x_5 \sin x_7}{OA \cdot m_A l_1} + \\ &+ \mu_2 \cdot \frac{x_1}{ml_1} + \mu_4 \cdot \frac{x_3 + OA \sin x_7}{ml_1} + \mu_6 \cdot \frac{x_5 - OA \cos x_7}{ml_1} + \mu_8 \cdot \frac{x_3 \cos x_7 + x_5 \sin x_7}{OA \cdot m_A l_1} = 0, \\ \frac{\partial H}{\partial F_2} &= 2\dot{x}_2 \cdot \frac{x_1 - OB}{ml_2} + 2\dot{x}_4 \cdot \frac{x_3}{ml_2} + 2\dot{x}_6 \cdot \frac{x_5}{ml_2} + \mu_2 \cdot \frac{x_1 - OB}{ml_2} + \mu_4 \cdot \frac{x_3}{ml_2} + \mu_6 \cdot \frac{x_5}{ml_2} = 0, \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial H}{\partial F_3} = 2\dot{x}_2 \cdot \frac{x_1 + OB}{ml_3} + 2\dot{x}_4 \cdot \frac{x_3}{ml_3} + 2\dot{x}_6 \cdot \frac{x_5}{ml_3} + \mu_2 \cdot \frac{x_1 + OB}{ml_3} + \mu_4 \cdot \frac{x_3}{ml_3} + \mu_6 \cdot \frac{x_5}{ml_3} = 0,$$

$$\frac{\partial H}{\partial F_4} = 2OA^2 \cdot \dot{x}_8 \cdot \frac{DK \cdot \sin x_7 - OK \cdot \cos x_7}{OA \cdot m_A l_4} + \mu_8 \cdot \frac{DK \cdot \sin x_7 - OK \cdot \cos x_7}{OA \cdot m_A l_4} = 0.$$

Функции влияния $\mu_n(t)$, $n = \overline{1,12}$ определяются равенствами (4.38)

$$\dot{\mu}(t) = - \left[\frac{\partial H(\bar{x}, \bar{F}, \bar{\mu})}{\partial x} \right]^T \quad (4.46)$$

Тогда из (4.45) с учетом (4.46) следует

$$\begin{aligned} \mu_1(t) &= 2\ddot{x}_2, \quad \mu_2(t) = -2\dot{x}_2, \quad \mu_3(t) = 2\ddot{x}_4, \quad \mu_4(t) = -2\dot{x}_4, \quad \mu_5(t) = 2\ddot{x}_6, \quad \mu_6(t) = -2\dot{x}_6, \\ \mu_7(t) &= 2OA^2 \ddot{x}_8, \quad \mu_8(t) = -2OA^2 \dot{x}_8, \quad \mu_9(t) = -\dot{\mu}_{10}(t) + 2n\mu_{10}, \\ \mu_{11}(t) &= -\dot{\mu}_{12}(t) + 2n\mu_{12}, \quad \mu_{13}(t) = -\dot{\mu}_{14} + 2n\mu_{14}. \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\dot{\mu}_1(t) = \mu_{10} \frac{F_5}{m_G L_5} + \mu_{12} \frac{\lambda_6}{m_G}, \quad \dot{\mu}_3(t) = -\mu_{10} \frac{\lambda_6}{m_G} + \mu_{12} \frac{F_5}{m_G L_5}. \quad (4.48)$$

$$\dot{\mu}_5(t) = \mu_{14} \frac{F_5}{m_G L_5}, \quad \dot{\mu}_7(t) = -\mu_{10} \frac{\lambda_6}{m_G} \cdot OA \cos x_7,$$

$$\dot{\mu}_9(t) = -\mu_{10} \frac{F_5}{m_G l_5}, \quad \dot{\mu}_{11}(t) = -\mu_{12} \frac{F_5}{m_G L_5}, \quad \dot{\mu}_{13}(t) = -\mu_{14} \frac{F_5}{m_G L_5}. \quad (4.49)$$

С учетом выражений (4.47 – 4.49) гамильтониан (4.43) принимает вид

$$\begin{aligned} H(t) &= -\dot{x}_2^2 - \dot{x}_4^2 - \dot{x}_6^2 - OA^2 \cdot \dot{x}_8^2 + 2x_2 \ddot{x}_2 + 2x_4 \ddot{x}_4 + 2x_6 \ddot{x}_6 + \mu_9 \cdot x_{10} + \mu_{11} \cdot x_{12} + \mu_{13} \cdot x_{14} + \\ &+ \mu_{10} \cdot \dot{x}_{10} + \mu_{12} \cdot \dot{x}_{12} + \mu_{14} \cdot \dot{x}_{14}. \end{aligned}$$

Так как гамильтониан от времени явно не зависит, $\dot{H}(t) = 2x_2\ddot{x}_2 + 2x_4\ddot{x}_4 + 2x_6\ddot{x}_6 + 2OA^2 \cdot x_8\ddot{x}_8^2 + \dot{\mu}_9 \cdot x_{10} + \dot{\mu}_{11} \cdot x_{12} + \dot{\mu}_{13} \cdot x_{14} + \mu_{10} \cdot \ddot{x}_{10} + \mu_{12} \cdot \ddot{x}_{12} + \mu_{14} \cdot \ddot{x}_{14} = 0$, а с учетом (4.49)

$$\begin{aligned} \dot{H}(t) = & +2x_2\ddot{x}_2 + 2x_4\ddot{x}_4 + 2x_6\ddot{x}_6 + 2OA^2 \cdot x_8\ddot{x}_8^2 - \mu_{10} \frac{F_5}{m_G L_5} + \mu_{10} \cdot \ddot{x}_{10} - \mu_{12} \frac{F_5}{m_G L_5} + \mu_{12} \cdot \ddot{x}_{12} - \\ & - \mu_{14} \frac{F_5}{m_G L_5} + \mu_{14} \cdot \ddot{x}_{14} = 0 . \end{aligned} \quad (4.50)$$

Так как $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ независимые переменные, возможно принять

$$\ddot{x}_2(t) = 0, \ddot{x}_4(t) = 0, \ddot{x}_6(t) = 0 . \quad (4.51)$$

тогда с учетом (4.48) и (4.49) $\mu_{10} = 0$, $\mu_{12} = 0$, $\mu_{14} = 0$, $\ddot{x}_8 = 0$, следовательно, (4.51) является решением системы уравнений (4.41, 4.46).

В результате решения двухточечной краевой задачи, искомые функции, удовлетворяющие функционалу (4.42) имеют вид

$$\ddot{x}(t) = C_{11}, \ddot{y}(t) = C_{13}, \ddot{z}(t) = C_{15}, \ddot{\varphi}(t) = C_{17}.$$

Для $x_k(t)$, $k=1, 3, 5, 7$

$$x_k(t) = \frac{1}{6} C_{1k} t^3 + \frac{1}{2} C_{2k} t^2 + C_{3k} t + C_{4k} . \quad (4.52)$$

С учётом граничных условий постоянные интегрирования равны

$$C_{3k} = 0, C_{4k} = x_k(0), C_{1k} = -\frac{12[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3}, C_{2k} = \frac{6[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2}.$$

Тогда функции (4.52)

$$x_k(t) = \frac{-2[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3} t^3 + \frac{3[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2} t^2 + x_k(0) . \quad (4.53)$$

Таким образом, траектория точки подвеса захвата, удовлетворяющая функционалу (4.42) - прямая. Подставляя выражения $x_1 = x(t)$, $x_3 = y(t)$, $x_5 = z(t)$ и $x_7 = \varphi(t)$ в (3.15), находим программные законы изменения длин исполнительных цилиндров $l_1^*(t)$, $l_2^*(t)$, $l_3^*(t)$, $l_4^*(t)$.

Для определения возмущенного движения груза на подвесе записывается его дифференциальное уравнение в подвижной системе координат $M x_1 y_1 z_1$ с началом в точке M крепления подвеса поступательно перемещающейся относительно неподвижной системе координат (рисунок. 4.1). С учетом переносных сил инерции $F_x^i = -m_G \ddot{x}$, $F_y^i = -m_G \ddot{y}$, $F_z^i = -m_G \ddot{z}$, дифференциальное уравнение движения груза в проекции на касательную к относительной траектории имеет вид

$$L_5 \ddot{\alpha} + (g + \ddot{z}) \cdot \sin \alpha + (\ddot{x} \sin \gamma + \ddot{y} \cos \gamma) \cos \alpha + b \dot{\alpha} = 0, \quad (4.54)$$

$$\sin \gamma = \frac{x}{\sqrt{x^2 + (y + OA \cdot \sin \varphi)^2}} \geq 0, \quad \cos \gamma = \frac{y + OA \cdot \sin \varphi}{\sqrt{x^2 + (y + OA \cdot \sin \varphi)^2}} \leq 1.$$

Усилие в подвесе определяется из последнего уравнения системы (4.41)

$$F_5 = -\frac{m_G (g + \ddot{z}_E + 2n\dot{z}_E)}{\cos \alpha},$$

где $\dot{z}_E = \dot{z} + L_5 \dot{\alpha} \sin \alpha$, $\ddot{z}_E = \ddot{z} + L_5 \ddot{\alpha} \sin \alpha + L_5 \dot{\alpha}^2 \cos \alpha$.

Управляющие усилия в исполнительных звеньях манипулятора $F_k(t)$, $k = 1 \div 4$ находятся из (4.6), как решения системы алгебраических уравнений с переменными коэффициентами.

Полученные в результате решения краевой задачи выражения (4.53) использованы при расчёте параметров программного движения манипулятора-трипода на поворотном основании, в составе робототехнического комплекса РШ-7 [206]. В манипуляторе в качестве звеньев изменяемой длины применены электрические цилиндры с электродвигателями постоянного тока – линейные привода. Максимальный ход штока исполнительных звеньев составляет 610 мм. Геометрические характеристики основания манипулятора $x_B = -x_C = 355$ мм, $y_B = 690$ мм, $O_1 A = 790$ мм. Приведённые массы m и m_A равны 57 кг, 45 кг, соответственно. Максимальная скорость перемещения без нагрузки 65 мм/с. На рисунке 4.20 представлены результаты решения, рассмотренной задачи для начальных значений длин звеньев манипулятора $l_{10} = 1260$ мм, $l_{20} = 1200$ мм, $l_{30} = 1200$ мм, $l_{40} = 903$ мм. Конечные значения координат захвата: $x(T) = 0$ мм, $y(T)$

$=1600$ мм, $z(T) = -700$ мм. На рисунке 4.21 приведены законы изменения управляющих усилий.

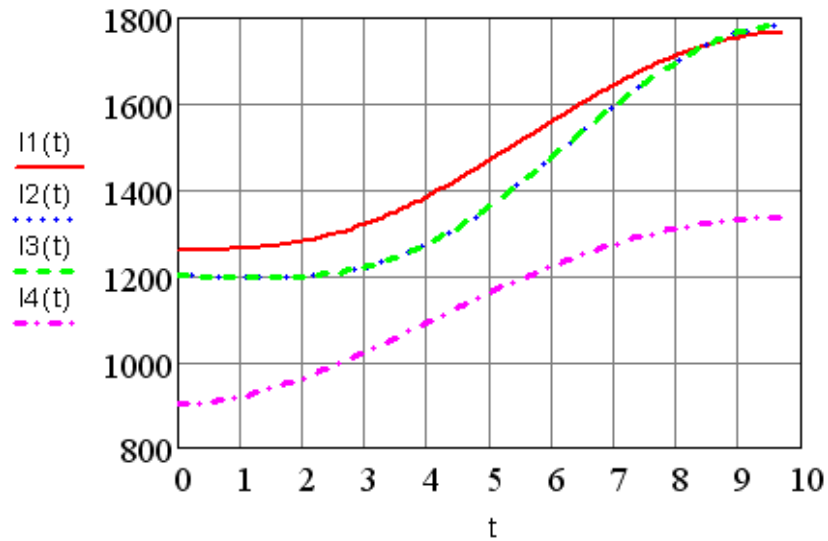


Рисунок 4.20 - Законы изменения длин звеньев

Программные усилия (рисунок 4.21), необходимые для реализации системой управления синтезированных законов движения звеньев манипулятора, находятся из решения уравнений динамики.

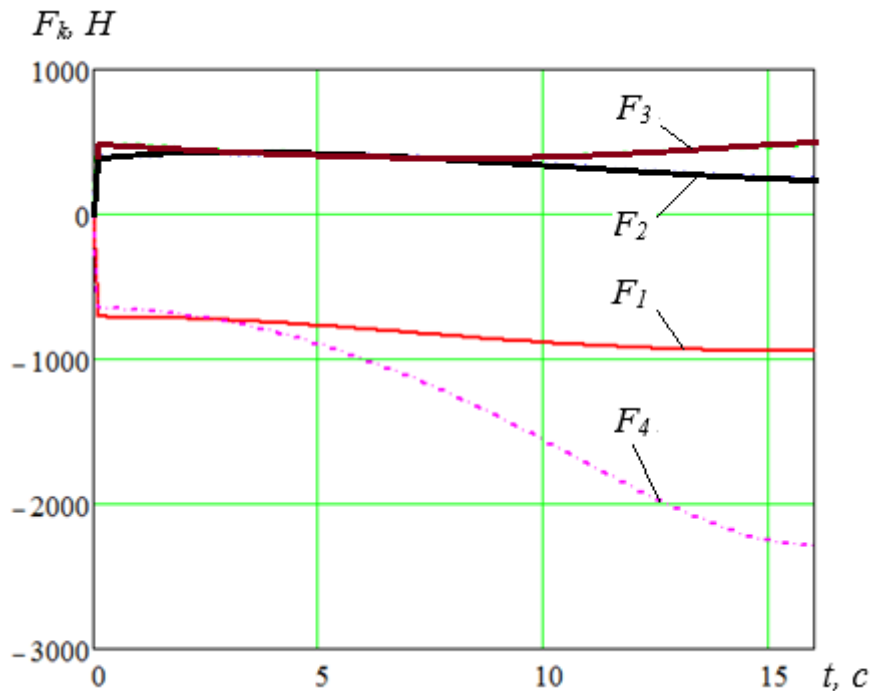


Рисунок 4.21 - Законы изменения программных управляющих усилий в исполнительных звеньях манипулятора

4.6. Синтез оптимальных программных усилий при неизвестной конфигурации манипулятора в конечный момент времени

Синтез программных управляющих усилий при перемещении захвата из начального положения $M_0[x(0), y(0), z(0)]$ в конечное положение $M_f[x(T), y(T), z(T)]$ методом, изложенным в разделе 4.5, можно провести заранее, не определяя конфигурацию $l_k(T)$, $k=1\div 4$ манипулятора в конечном положении. Используя уравнения динамики манипулятора в форме (4.41), решаем задачу определения функций $x, y, z, \varphi[x_{2S-1}(t), S=1,2,3,4]$, с фиксированными значениями переменных состояния $x_{2S-1}(0)=x_{2S-1,0}$, $x_{2S}(0)=0$, $S=1,2,3,4$, в начальный момент времени процесса перевода точки крепления подвеса захвата манипулятора, а в момент времени T окончания процесса перевода точки крепления подвеса захвата манипулятора известны только координаты $x, y, z [x_{2S-1}(T)=x_{2S-1,T}, S=1,2,3]$ и скорости $\dot{x}_{2S}(T)=0, S=1,2,3,4$. То есть, конечное значение угла поворота основания $x_7(T)=\varphi(T)$ не задано, а потому неизвестны значения длины звеньев $l_1(T)$ и $l_4(T)$. Такая необходимость может возникнуть в случае ограниченного рабочего пространства.

В этом случае критерий качества выбираем в форме

$$I = V(x_7(T)) + \frac{1}{2} \int_0^T [\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 + \dot{x}_6^2 + O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8^2] dt. \quad (4.55)$$

Здесь сохранены все обозначения разделов 4.2 и 4.5. Очевидно, что выражения для гамильтониана и функций влияния сохраняются, так же, как и вся последовательность математических операций.

Для $x_k(t)$, $k=1, 3, 5$ имеем

$$x_k(t) = \frac{1}{6} C_{1k} t^3 + \frac{1}{2} C_{2k} t^2 + C_{3k} t + C_{4k}.$$

С учётом граничных условий $x_{2S-1}(0) = x_{2S-1,0}$, $x_{2S}(0) = 0$, $x_{2S}(T) = 0$, $S=1,2,3,4$ и $x, y, z [x_{2S-1}(T) = x_{2S-1,T}, S=1,2,3]$, находятся постоянные интегрирования

$$C_{3k} = 0, C_{4k} = x_k(0), C_{1k} = -\frac{12[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3}, C_{2k} = \frac{6[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2},$$

а для координат захвата получено

$$x_k(t) = \frac{-2[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3}t^3 + \frac{3[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2}t^2 + x_k(0). \quad (4.56)$$

Таким образом, траектория захвата, удовлетворяющая функционалу (4.55) прямая.

Для определения закона изменения угла поворота основания примем в качестве функции конечного состояния следующее выражение [38]

$$V(x_7(T)) = -\frac{\mu \cdot O_1 A^2 \cdot x_7^2(T)}{2T^3}, \quad (4.57)$$

где μ - постоянный коэффициент, значение которого определяется по результатам анализа, полученного решения [38] и может корректироваться на стадии проектирования.

Согласно (4.39) граничное условие для функции влияния имеет вид

$$\lambda_7(T) = \frac{\partial \Phi[x_7(T)]}{\partial x_7(T)}. \quad (4.58)$$

Из (4.39) $\dot{\lambda}_8(T) = -\lambda_7(T) = \frac{\mu \cdot O_1 A^2 \cdot x_7(T)}{T^3}$, а из (4.57) $\lambda_8 = O_1 A^2 \cdot \dot{x}_8 = O_1 A^2 \cdot \ddot{x}_7$, тогда $\ddot{x}_7(T) = const = \ddot{x}_7(t) = \frac{\mu \cdot x_7(T)}{T^3}$, и после интегрирования с учётом граничных условий и учитывая, $x_7 = \varphi$ получаем

$$\varphi(t) = \frac{\mu \cdot \varphi(T)}{6T^3}t^3 - \frac{\mu \cdot \varphi(T)}{4T^2}t^2 + \varphi_7(0). \quad (4.59)$$

Тогда при $t=T$ определяем неизвестное значение угла поворота основания в конечный момент времени $\varphi(T) = \frac{12}{12+\mu}\varphi(0)$, а из уравнений (3.15) находятся программные законы изменения длин звеньев $l_k^*(t)$ манипулятора. Так как за

изменение угла поворотного основания отвечает четвертый привод, являющийся наиболее нагруженным [382], то значение коэффициента μ необходимо выбирать минимально возможным, учитывая ограничения на ход линейных двигателей.

Программные усилия, необходимые для реализации системой управления синтезированных законов движения звеньев манипулятора, находятся из решения уравнений (4.6) относительно управляющих усилий.

Недостатком синтезированных законов изменения длин звеньев $l_k^*(t)$ манипулятора является скачкообразное изменение ускорения захвата при $t=0$ и $t=T$.

Альтернативным законом изменения длин исполнительных звеньев при известной конечной конфигурации манипулятора является синусоидальный или степенной законы изменения ускорения, обеспечивающие условия «мягкого» касания [134], заключающиеся в равенстве нулю скорости и ускорения захвата в начальном и конечном положениях. Программные движения звеньев в этом случае принимают вид (синусоидальный закон изменения ускорения)

$$l_k(t) = l_k(T) + [l_k(T) - l_k(0)] \cdot \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right], \quad (4.60)$$

где T – время перемещения звеньев.

Тогда параметрические уравнения траектории захвата определяются из решения обратной задачи кинематики [177, 219, 232, 247, 271, 314, 355], и заранее неизвестны. При проведении расчетов, время движения всех звеньев переменной длины считаем одинаковым. Однако перемещения звеньев различны, поэтому за конечное время T принимаем время работы того звена, которое изменяет свою длину на наибольшую величину.

Полученные (4.56), (4.59) и (4.60) выражения использованы при расчёте параметров программного движения манипулятора-трипода на поворотном основании, в составе робототехнического комплекса РШ-7 [191], изображённого на рисунке 1.26, г)

4.7. Результаты численного моделирования движения захвата по заданным программным законам движения и траекториям

В результате численного моделирования движения захвата по прямой траектории по синтезированным законам получены законы изменения обобщённых координат (рисунки 4.22 и 4.25), законы изменения линейных скоростей штоков исполнительных звеньев (рисунки 4.23 и 4.26), законы изменения линейных ускорений штоков исполнительных звеньев (рисунки 4.24 и 4.27), характер изменения управляющих усилий в исполнительных звеньях (рисунок 4.28) и работа, затрачиваемая на привод исполнительных звеньев манипулятора при реализации прямой траектории и заранее неопределённой (рисунок 4.29).

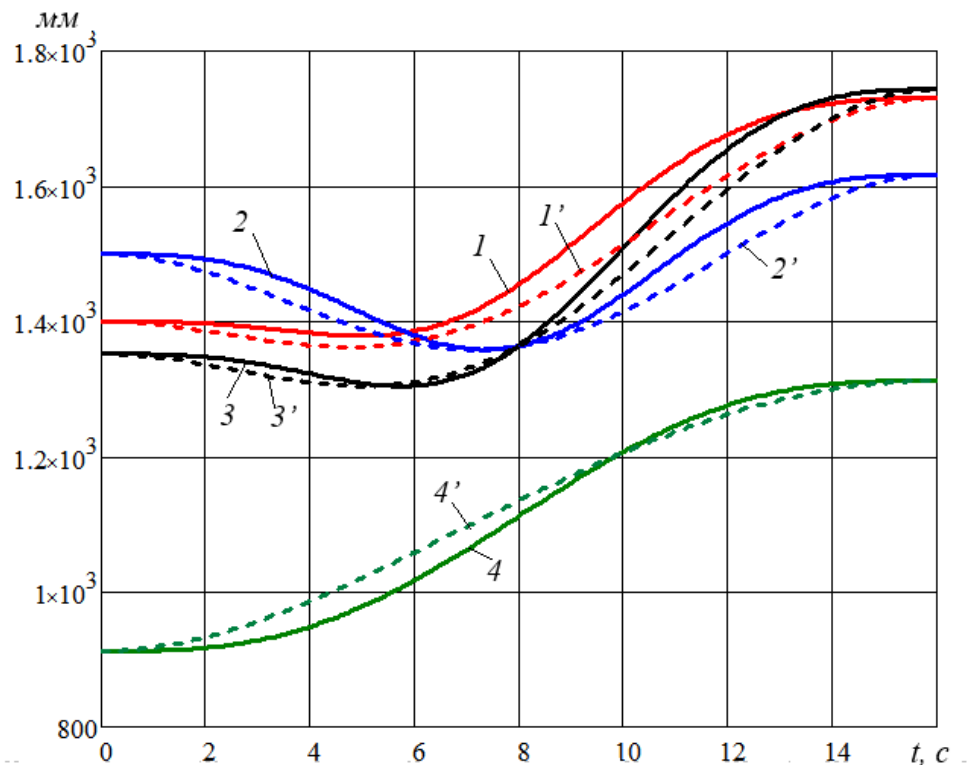


Рисунок 4.22 – Характер изменения обобщённых координат при движении захвата по прямой по синтезированным законам (раздел 4.5) – 1, 2, 3, 4 и по прямой траектории, заданной параметрически (раздел 3.7) - 1', 2', 3', 4'

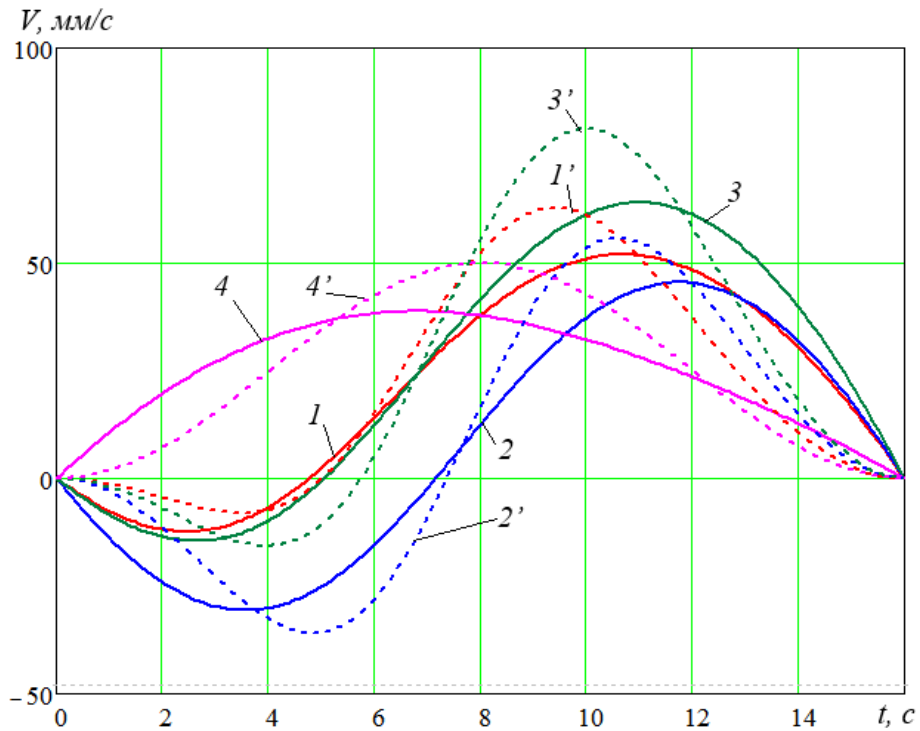


Рисунок 4.23 – Характер изменения линейных скоростей исполнительных звеньев при движении захвата по прямой по синтезированным законам (раздел 4.5) – 1, 2, 3, 4 и по прямой траектории, заданной параметрически (раздел 3.7) - 1', 2', 3', 4'

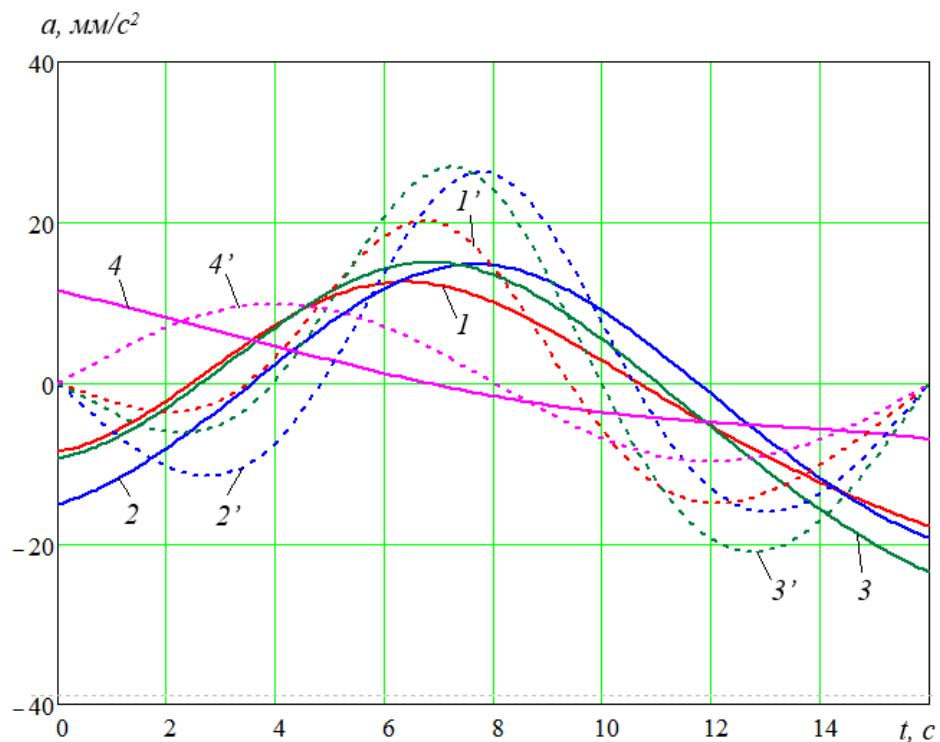


Рисунок 4.24 – Характер изменения линейных скоростей исполнительных звеньев при движении захвата по прямой по синтезированным законам (раздел 4.5) – 1, 2, 3, 4 и по прямой траектории, заданной параметрически (раздел 3.7) - 1', 2', 3', 4'

Как видно из рисунка 4.22 характер изменения обобщенных координат при движении точки крепления захвата по прямой по программным законам заданным параметрически (кривые 1', 2', 3', 4') практически идентичен характеру изменения обобщенных координат при движении по программным законам, полученным в результате динамического синтеза (кривые 1, 2, 3, 4). Идентичность кривых изменения обобщенных координат по программным законам подтверждает адекватность многомассовой динамической модели (4.6) манипулятора параллельно-последовательной структуры на основе трипода, описанной в разделе 4.2.

При реализации программных движений манипулятора по прямой по законам, полученным в результате динамического синтеза (4.53), максимальные значения скоростей штоков электроцилиндров ниже на 10...25 мм/с, чем при движении точки крепления захвата по прямой, задаваемом параметрически (3.54) (рисунок 4.23). Вследствие чего максимальные значения ускорений штоков исполнительных звеньев по законам, полученным в результате динамического синтеза (4.53) меньше на 8...12 мм/с² (рисунок 4.24), Однако хотя ускорения штоков электроцилиндров при реализации синтезированных законов программных движений (кривые 1, 2, 3, 4) изменяются более монотонно, чем при программных движениях, заданных параметрически (кривые 1', 2', 3', 4'), в момент трогания и останова происходит скачкообразное возрастание ускорений.

По результатам численного моделирования проведено сравнение результатов реализации программных движений по прямой траектории и по законам (4.53), полученным в результате динамического синтеза с результатами движения точки крепления захвата манипулятора по законам «мягкого» трогания и останова (3.59) по заранее неопределенной траектории при одинаковых конфигурациях манипулятора.

Численное моделирование для этих случаев проводилось при одинаковом времени перемещения захвата из начального положения в конечное.

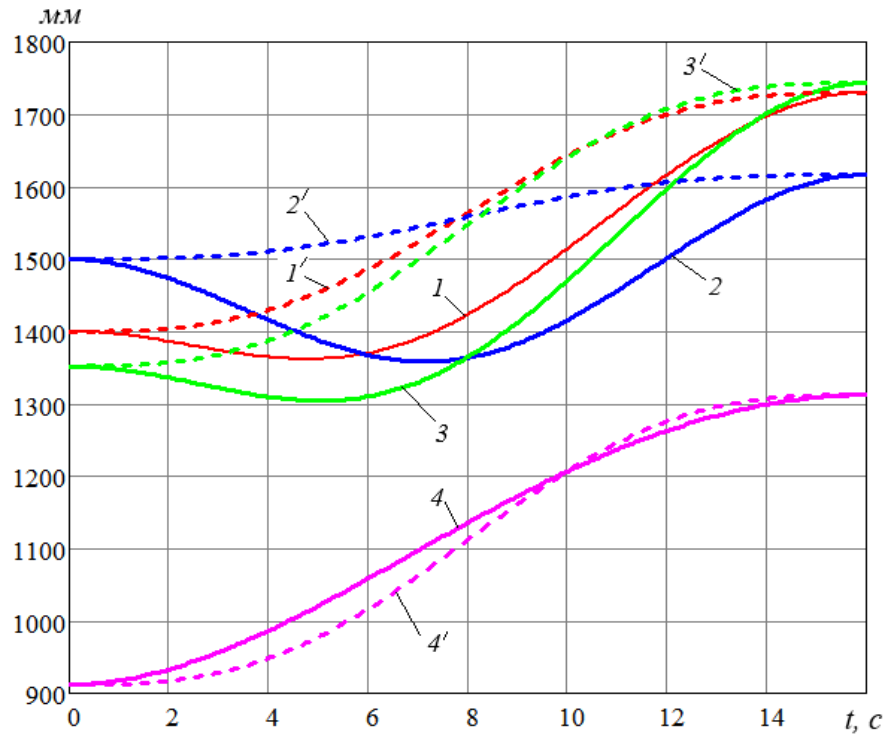


Рисунок 4.25 – Характер изменения обобщенных координат при движении захвата по прямой – 1, 2, 3, 4 и по заранее неопределенной траектории 1', 2', 3', 4'

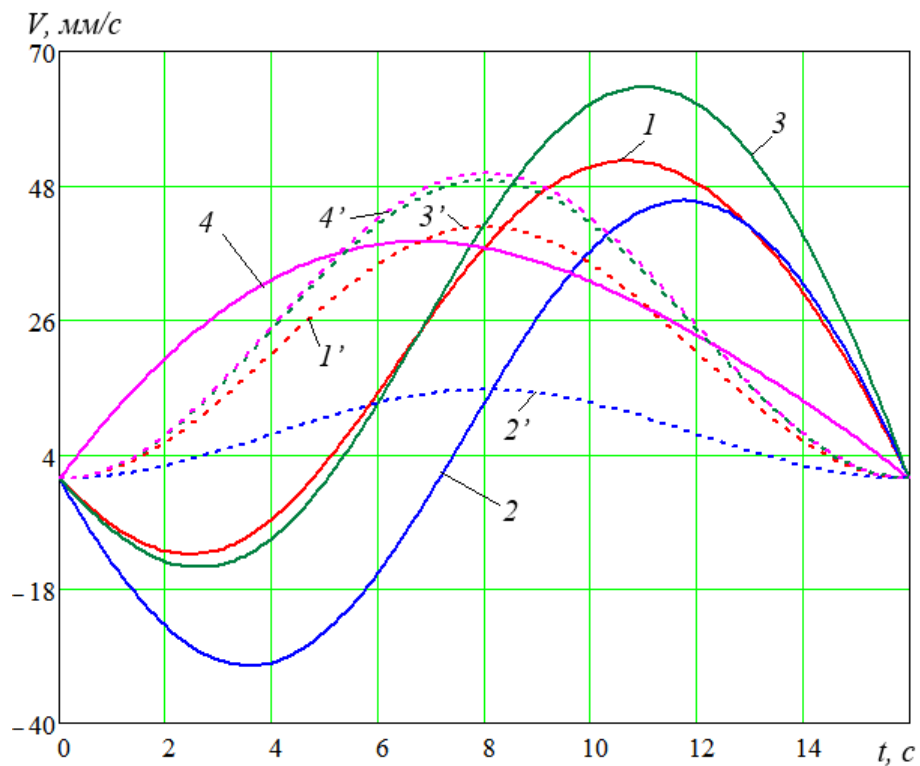


Рисунок 4.26 – Характер изменения линейных скоростей исполнительных звеньев при движении захвата по прямой – 1, 2, 3, 4 и по заранее неопределенной траектории 1', 2', 3', 4'

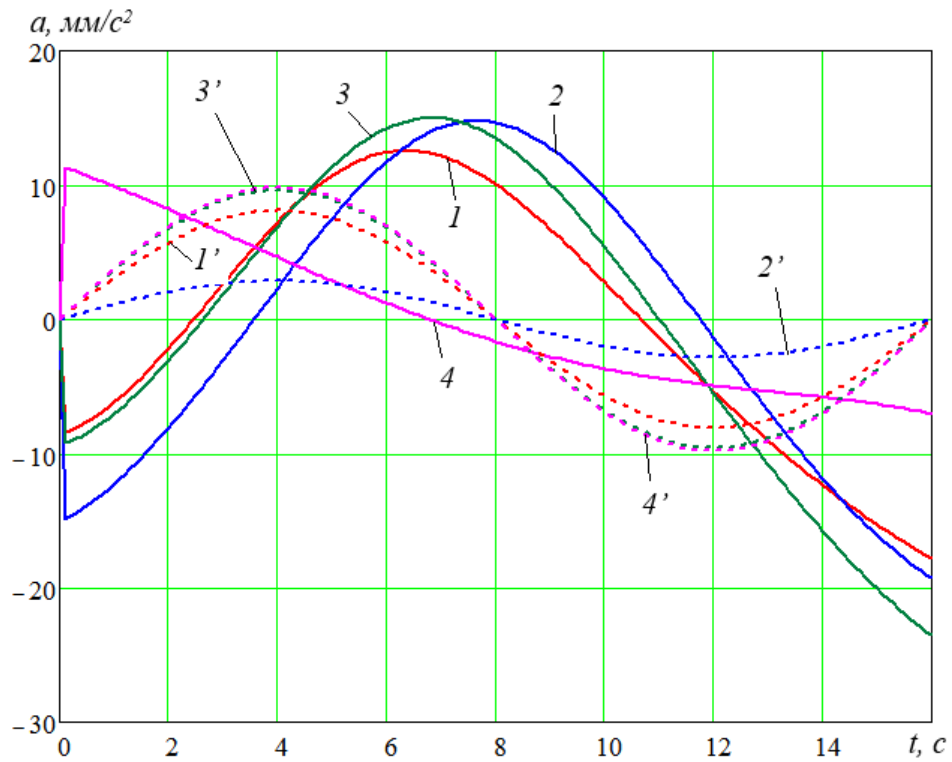


Рисунок 4.27 – Характер изменения линейных ускорений исполнительных звеньев при движении захвата по прямой – 1, 2, 3, 4 и по заранее неопределенной траектории 1', 2', 3', 4'

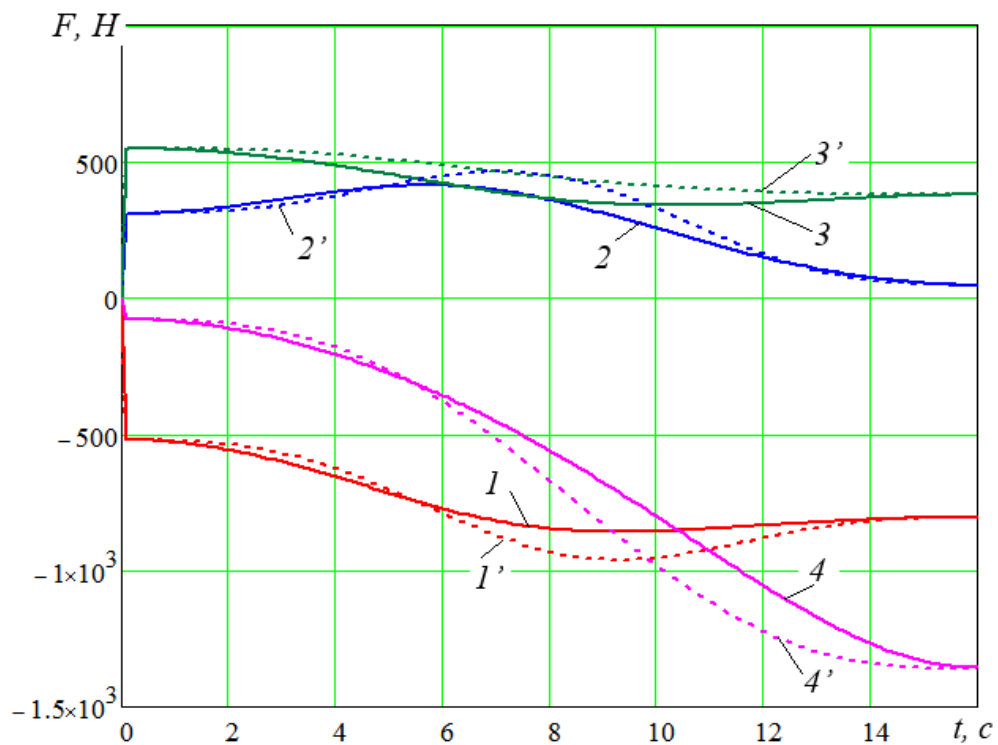


Рисунок 4.28 – Характер изменения управляющих усилий в исполнительных звеньях при движении захвата по прямой – 1, 2, 3, 4 и по заранее неопределенной траектории 1', 2', 3', 4'

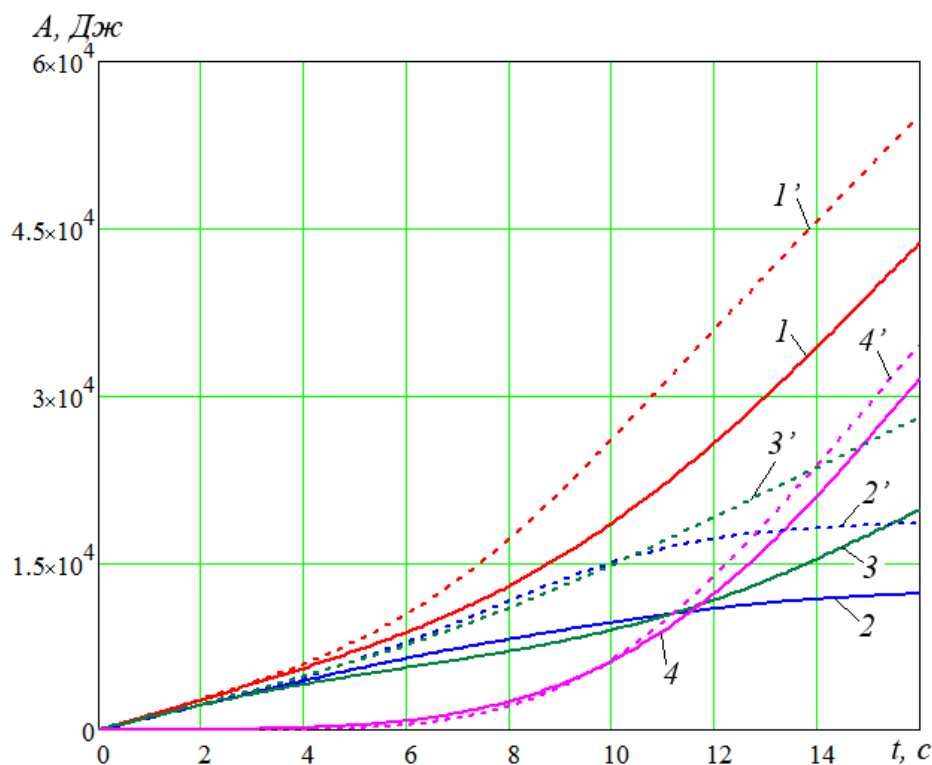


Рисунок 4.29 – Работа движущих сил, затрачиваемая на привод исполнительных звеньев при движении захвата по прямой – 1, 2, 3, 4 и по заранее неопределенной траектории 1', 2', 3', 4'

Как видно из рисунка 4.25, при движении точки крепления захвата по прямой (кривые 1, 2, 3, 4) возможны изменения направлений движения штоков (переход от втягивания к выталкиванию и наоборот), что не наблюдается при движении по заранее не определенной траектории (кривые 1', 2', 3', 4'). С целью знакопостоянства линейных скоростей штоков исполнительных звеньев при реализации движения по прямой задавались условия знакопостоянства линейных скоростей штоков (3.69, 3.70 и 3.71).

Сравнение графиков изменения линейных скоростей исполнительных звеньев (рисунок 4.26) и линейных ускорений исполнительных звеньев (рисунок 4.27) при движении захвата по прямой (кривые 1, 2, 3, 4) и по заранее неопределенной траектории (кривые 1', 2', 3', 4') показывают, что максимальные значения скоростей и ускорений штоков исполнительных звеньев меньше при движении по неопределенной траектории.

Сравнение управляющих усилий в исполнительных звеньях при реализации программных движений по прямой траектории (кривые 1, 2, 3, 4) и по законам (4.53) и по заранее неопределенной траектории (кривые 1', 2', 3', 4') по законам (3.59) показывает, что законы изменения усилий практически одинаковы в обоих случаях. Однако, следует отметить, что работа движущих сил, затрачиваемая на привод исполнительных звеньев при движении захвата по прямой (кривые 1, 2, 3, 4) меньше на 7,5...14 кДж (в зависимости от исполнительного звена) чем при движении захвата по заранее неопределенной траектории (кривые 1', 2', 3', 4').

Выводы по главе

Разработаны математические модели манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющие проводить расчеты динамики пространственного управляемого движения звеньев манипулятора, на которые наложены голономные связи. Математическая модель динамики исполнительного привода с самотормозящейся передачей, учитывает податливость звеньев и необратимые потери, позволяет исследовать ее влияние на функциональные возможности манипулятора в зоне обслуживания и сформулировать условия отсутствия динамического заклинивания привода.

Определена устойчивость движения исполнительных звеньев манипулятора – трипода на подвижном основании. Проведен анализ динамических ошибок, выведена передаточная функция, связывающая динамическую ошибку с управляющим сигналом в замкнутой системе управления с возмущением.

Представлено решение задачи динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата, позволяющих существенно снизить инерционные нагрузки на конструкцию. Получены аналитические выражения условий реализации оптимальных траекторий захвата.

Проведено сравнение кинематических параметров захвата, при его перемещении по синтезированной оптимальной траектории и по траектории,

полученной в результате решения уравнений динамики манипулятора при изменении ускорений исполнительных звеньев по синусоидальному закону.

Работа движущих сил, затрачиваемая на привод исполнительных звеньев при движении захвата по прямой меньше на 5,3%...18,2% (в зависимости от исполнительного звена) чем при движении захвата по заранее неопределенной траектории при одном и том же законе программного движения.

5. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

С целью экспериментальной проверки результатов теоретических исследований спроектировано и изготовлено два варианта систем управления, предназначенных для разных по составу и функциональным возможностям манипуляционных устройств. В первом варианте встроенная система управления реализуется по централизованной схеме с единственным мощным контроллером или одноплатным микрокомпьютером, а во втором – многопроцессорная распределенная модульная структура [129, 134, 135, 190, 194, 287].

Обе структуры предназначены для работы в супервизорном режиме, в котором анализ данных сенсорной системы, основные расчеты, формирование цели управления и планирование перемещения захвата манипулятора выполняет человек-оператор.

Разработка и экспериментальные исследования систем с централизованной и распределенной архитектурой преследовало две цели. Во-первых, требовалась экспериментальная проверка различных вариантов сетевого объединения, применяемых в системе микропроцессорных средств в различной конфигурации, с целью реализации достаточно сложных алгоритмов управления [14, 131, 138, 186, 190]. Вторая задача заключалась в разработке и исследовании возможностей реконфигурируемых типовых модулей управления исполнительными механизмами – электроприводами разных типов. Кроме того, условия эксплуатации манипуляторов потребовали дополнение их набором сенсорных модулей для пространственной ориентации, глобальной навигации и системой технического зрения, открывающими возможности по применению системы для управления в реальном времени различными робототехническими комплексами такими, как роботы-манипуляторы, мобильные роботы и комплексы этих устройств.

Экспериментальные исследования проводились на манипуляторе с четырьмя поступательными исполнительными звеньями, установленном на поворотной платформе (рисунок 5.1), техническая характеристика приведена в таблице 5.1.



Рисунок 5.1 – Внешний вид экспериментальной установки: 1- манипулятор параллельно-последовательной структуры на основе трипода; 2 – управляющая ЭВМ; 3 – электронный блок системы управления

Таблица 5.1

Техническая характеристика манипулятора

Максимальная грузоподъемность, кг	130
Максимальная высота подъема крюка (от стойки), мм	1670
Максимальный вылет крюка в продольной плоскости (влево и вправо) от его продольной оси, мм	1240
Максимальный вылет захвата от передней кромки платформы, мм	1800
Масса манипулятора, кг	80
Электропитание, В	24

5.1 Архитектура системы управления

Основные архитектурные особенности системы управления манипулятором параллельной структуры, прежде всего, обусловлены заданной механической конструкцией и характером predetermined программных движений.

В режиме дистанционного управления разработанная встраиваемая система представляет собой аппаратно-программное звено нижнего уровня. Архитектура встраиваемой системы управления выбирается и зависит от сложности и набора решаемых задач в каждом конкретном случае с учетом определенных конструктивных особенностей и функций механизмов, а также условий их эксплуатации.

При разработке состава элементов системы решалась задача программной реализации на каждом из типовых модулей с неизменяемой аппаратной средой максимально полного набора функций. С этой целью в структуре разработанных элементов системы заложены свойства масштабируемости и модульности, расширяющих области возможного применения системы. В перспективе большое значение имеет возможность применения этих элементов системы управления для частичной или полной реализации режима автономной работы манипулятора.

Во встраиваемой системе реализация алгоритмов управления обеспечивается вычислительными и информационными ресурсами на двух уровнях. На верхнем уровне системы управления находятся промышленные компьютеры, или мощные контроллеры с *ARM*-архитектурой. Нижний уровень представлен набором модулей, в состав которых входят модули управления исполнительными двигателями постоянного тока или сервоприводами, модули обработки измерительной информации с различными по типу сенсорами, устройство технического зрения, модули пространственного позиционирования и навигации и ряд других. На основе предложенной модульной структуры могут быть построены системы для аппаратно-программного управления различными манипуляторами и робототехническими устройствами [5, 25, 27, 50, 80, 81, 107].

5.2. Схемная реализация централизованной системы управления манипуляторами

Структурная схема системы управления приводами манипулятора мобильного робота показана на рисунке 5.2. Это централизованная однопроцессорная информационно-управляющая система, предназначенная для работы в супервизорном режиме.

Основным компонентом в системе является модуль управления исполнительными устройствами – двигателями постоянного тока, построенный 32-разрядном контроллере семейства *STM32*. Программное обеспечение модуля реализовано в двух вариантах, отвечающих требованиям централизованной и распределенной архитектурам.

Исполнительным механизмом звена манипулятора является линейный двигатель постоянного тока – актуатор. В разработанном устройстве применяются актуаторы *САНВ-21 series* компании «*SKFgroup*». Номинальное напряжение электродвигателя составляет 24 В. Скорость движения штока регулируются за счет изменения управляющего ШИМ-сигнала. Данные двигатели не имеют встроенной системы управления, но оснащены датчиком обратной связи для определения текущего состояния устройства. Обратная связь реализована в виде линейного потенциометра, отражающая абсолютное значение длины выдвинутого штока, т.е. выполняющего функции абсолютного энкодера. Сигнал следящей обратной связи U_{OC} (рисунок 5.2) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) блока управления движением приводами – основного структурного компонента системы управления.

Система управления работает с исполнительными механизмами системы, имеющей до 5 степеней подвижности, осуществляет текущий контроль состояния линейных приводов и реализует программно - заданные законы перемещения рабочей точки.

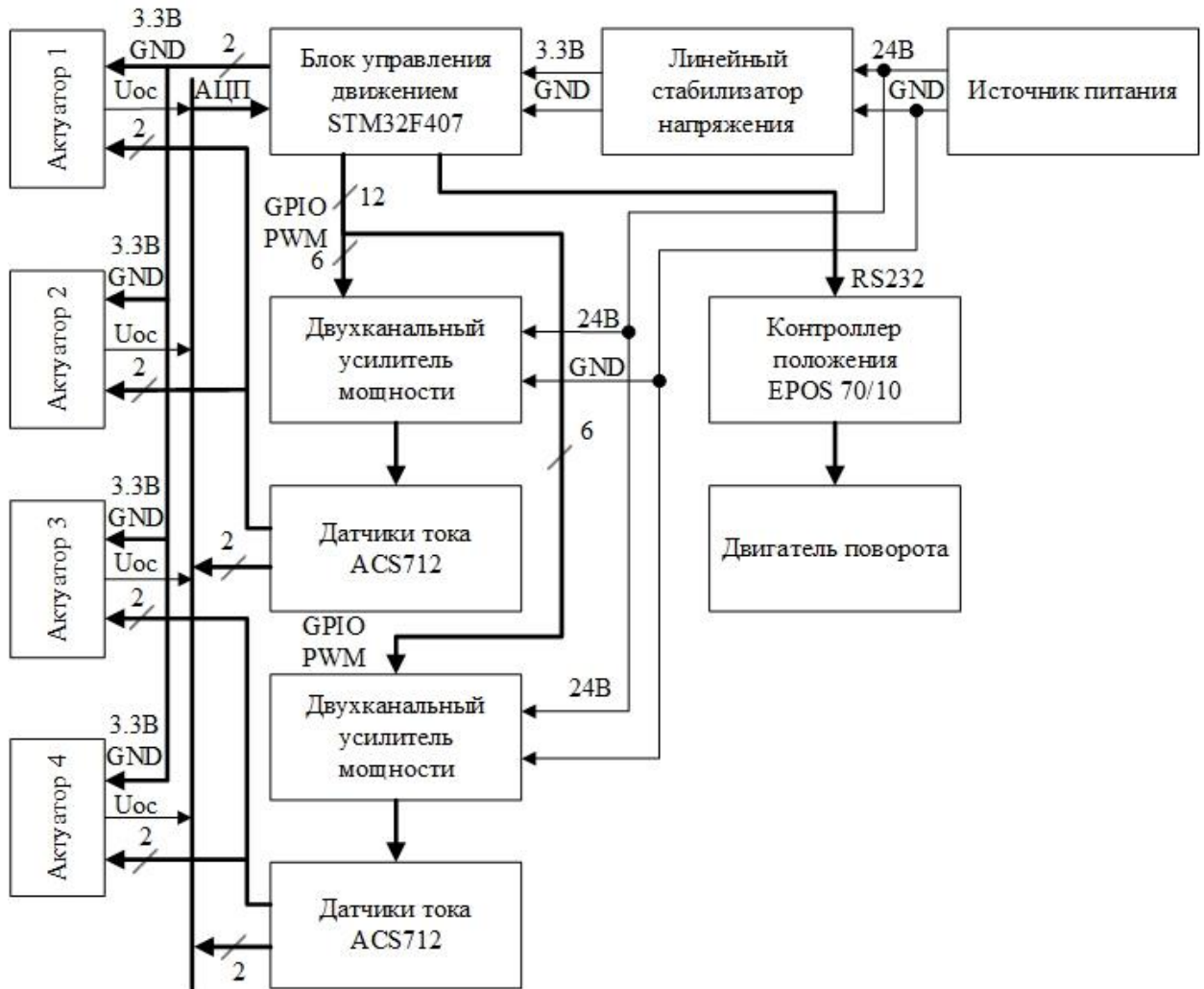


Рисунок 5.2 - Структурная схема системы управления приводами манипулятора

Система построена на основе 32-разрядного микроконтроллера семейства *STM32F407* с архитектурой *ARM Cortex-M4F*. Достаточно высокая тактовая частота процессора и большой объем встроенной памяти обеспечивают необходимые вычислительные ресурсы для решения задач управления. Кроме того, в контроллере имеется широкий набор периферийных устройств, АЦП и контроллеры интерфейсов *USB 2.0*, *Ethernet*, *RS-232*, *CAN*.

В контур управления ШИМ-сигналами, генерируемыми встроенными таймерами микроконтроллера, включаются микросхемы мостовых усилителей. Функции усилителя выполняет схема двухканального полного *H*-моста на микросхемах *VNH3SP30*. Максимальный ток по каждому каналу до 30А. Реверсирование вращения двигателя (направление движения штока) задается

управляющими сигналами на цифровых выводах *GPIO* контроллера. Для измерения тока, протекающего по обмоткам приводного двигателя, в разрыв цепи: выход мостового усилителя – силовая обмотка привода включается датчик тока в интегральном исполнении *ACS 712*. Выходной аналоговый сигнал датчика, пропорциональный протекающему току, поступает на вход встроенного АЦП контроллера. Сигнал от датчика содержит информацию, необходимую для оценки момента на валу двигателя и определения состояния останова или заклинивания штока исполнительного звена.

В стендовых испытаниях использовалась проводная связь встроенной системы с компьютером оператора. Вместе с тем, предусмотрена возможность управления по беспроводному каналу связи от удаленного компьютера. Связь обеспечивается с помощью *WiFi* - модуля, подключенного к одному из *USB* портов бортового контроллера.

В качестве альтернативного варианта реализована организация беспроводного канала связи с помощью радиомодема. Хорошие эксплуатационные характеристики по надежности, дальности связи показали приемо-передатчики серии *YS-1100*. Радиомодем предназначен для работы в частотном диапазоне 433МГц и позволяет организовать беспроводную двустороннюю передачу данных на расстоянии до 500 метров между двумя устройствами с *USB* и *RS-232 (UART)* интерфейсами. Большая выходная мощность (17 дБм) и высокая чувствительность (-112 дБм) позволяют обеспечить надежную передачу данных даже в условиях промышленных шумов.

В системе дистанционного управления электроприводами задачи удаленного компьютера оператора заключаются в расчете координированного движения всех приводов в режиме реального времени по заданной математической модели и выдаче управляющих команд на встроенную бортовую систему и обработке данных из цепи обратной связи [164].

В данном случае роль модуля управления двигателями сводится к предварительной обработке сигналов обратной связи от энкодеров и датчиков тока в обмотках приводов, а также формированию ШИМ-сигналов с заданным

коэффициентом заполнения по командам от удаленной ЭВМ оператора. Модуль может управлять системой, включающей до четырех линейных приводов, имеющих абсолютные энкодеры с аналоговым выходом, а при соответствующей программной настройке энкодеры с частотным выходом инкрементного типа, и один привод, управляемый контроллером положения *EPOS 70/10*. На плате модуля предусмотрены соединители для установки приемопередатчика радиоканала и *WiFi*-модуля.

С точки зрения полноты выполняемых функций модуль может рассматриваться как универсальный элемент управления механизмами, имеющими до 4 степеней подвижности.

Дополнительные эксплуатационные возможности обеспечивает установка манипулятора на поворотную платформу. Вращение платформы осуществляется приводом поворота, выполненном на линейном двигателе *RTG 060-100* компании «*Maxon motors*». Привод включает серводвигатель (*RE - 50*), планетарный редуктор, тормоз, датчик положения (энкодер *HEDL 9140*, 500 имп/об) и поставляется с программируемым контроллером положения *EPOS 70/10*. Программно в контроллере задается широкий спектр функций управления двигателями постоянного тока. Конфигурирование контроллера осуществляется в среде *EPOS Studio*. К ведущему процессору контроллер положения подключается по стандартным интерфейсам *USB* и *RS-232C* или по сети *CANopen*.

5.3. Схемная реализация распределенной системы управления манипуляторами

В централизованной системе управления, показанной на рисунке 5.2, большая часть операций по планированию и их реализации выполняется на удаленном компьютере оператора. Кроме того, во встроенной системе управления в центральном контроллере сосредоточены все основные функции управления нижнего уровня. В этом случае система управления оказывается жестко связанной с механической конструкцией манипулятора, слабо поддается

масштабированию и переносу (“портированию”) на другие робототехнические комплексы.

С целью построения модульной и масштабируемой системы управления разработан набор типовых модулей, позволяющих выбирать архитектуру системы, ориентированную на решение конкретной прикладной задачи. В основе этого набора, как и в предыдущем случае, находится модуль управления двигателем постоянного тока.

На рисунке 5.3 приведена структура системы управления манипулятором - триподом с 4 степенями подвижности, построенная на типовых модулях управления отдельными электроприводами.

Особенностью предложенной топологии локальных шин в системе управления является широкое применение беспроводных каналов связи для организации обмена данными между периферийными контроллерами и центральным процессором. Помимо более высокой скорости передачи при наличии множества подвижных взаимосвязанных механических узлов беспроводные каналы повышают надежность обмена данными.

Применение в качестве центрального блока обработки данных промышленных компьютеров, таких как *ARBOR FPC7702*, или одноплатных микрокомпьютеров типа *Raspberry Pi 2/3* позволяют перенести наиболее ресурсоемкие задачи управления на встраиваемую систему, приближая возможность реализации автономного режима работы.

Модуль управления электроприводом построен на основе 32-разрядного микроконтроллера *STM32F100RB*. В составе модуля одноканальный мостовой драйвер *VNH2SP30-E* и минимальный набор схем обвязки, включающий два линейных электронных стабилизатора и набор соединителей для стандартных аналоговых и цифровых интерфейсов. В модуле программно реализованы основные операции по обработке данных сенсорной системы и алгоритмы управления приводом: цифровые фильтры, вычислитель расстояния по данным от энкодера, ПИД-регулятор, генератор ШИМ-сигналов, формирователь сигналов управления по заданной траектории перемещения штока исполнительного звена.

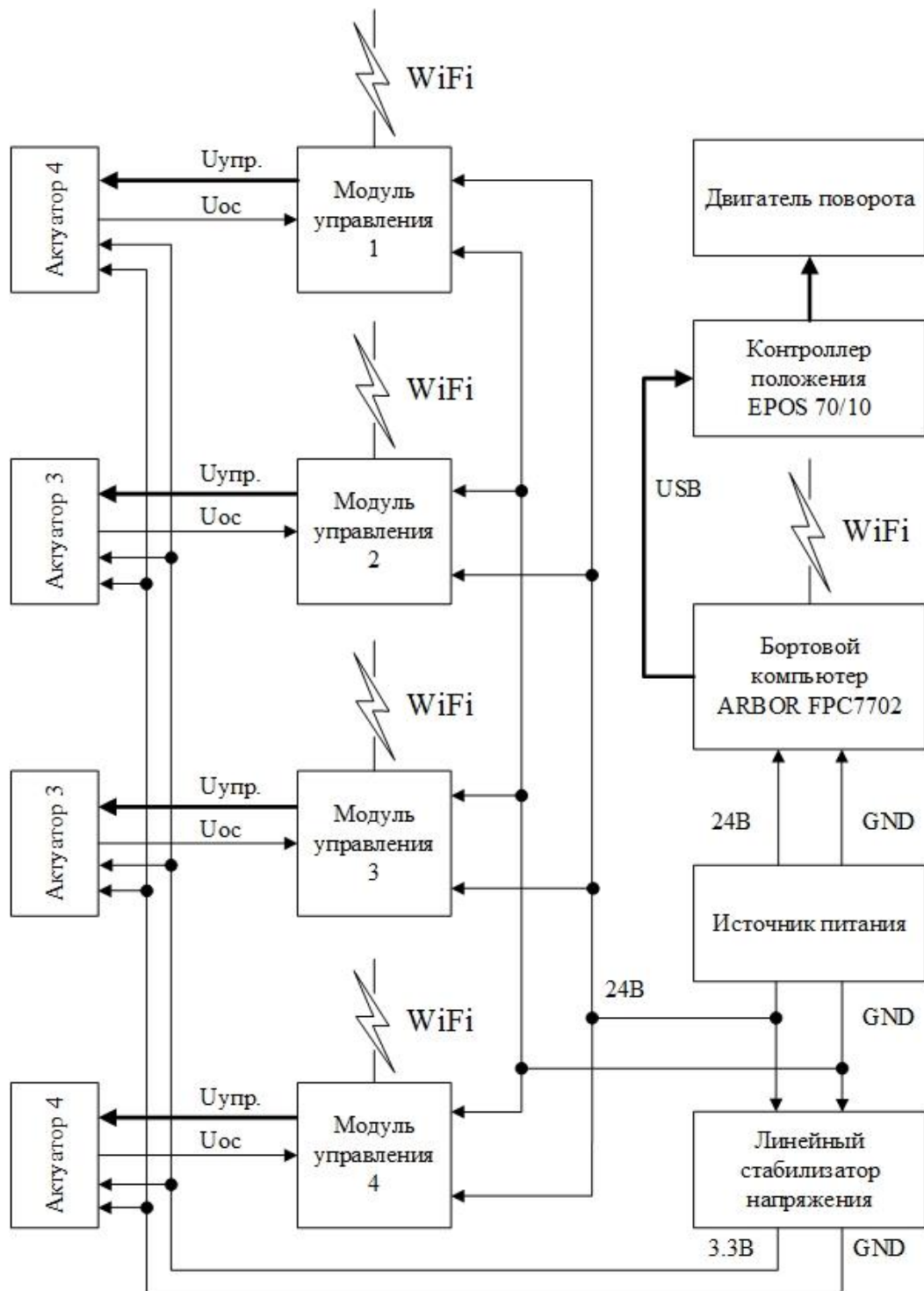


Рисунок 5.3. - Структурная схема распределенной системы управления приводами манипулятора

Элементы сенсорной системы, которые могут быть подключены к модулю, соединены с платой по стандартным схемам: ИК-датчик расстояния по интерфейсу *SPI*, УЗ-дальномер по одной из *GPIO* линий контроллера, датчик тока

в разрыв выходной цепи мостового усилителя, а встроенный энкодер в зависимости от типа актуатора ко входу аналого-цифрового преобразователя или при частотном выходе энкодера к цифровым линиям контроллера. Связь с центральным контроллером осуществляется с помощью *WiFi* - модема на базе схемы *ESP 8266-12F*. Модем подключается к порту *UART* микроконтроллера *STM32F100RB*.

Внешний вид платы модуля управления в сборе показан на рисунке 5.4.

На рисунке 5.5 показана принципиальная схема модуля управления исполнительным механизмом – электроприводом. Программная настройка контроллера позволяет выбирать тип двигателя. Питание платы модуля от источника +24 В. Понижение напряжения до необходимых уровней +5 В для интегральных схем обрاملения и +3,3 В для контроллера осуществляется с помощью двух последовательно включенных электронных стабилизаторов – LM2596 и LM1117. На штыревые разъемы платы выведены линии портов микроконтроллера для подключения дальномеров и энкодеров электроприводов.

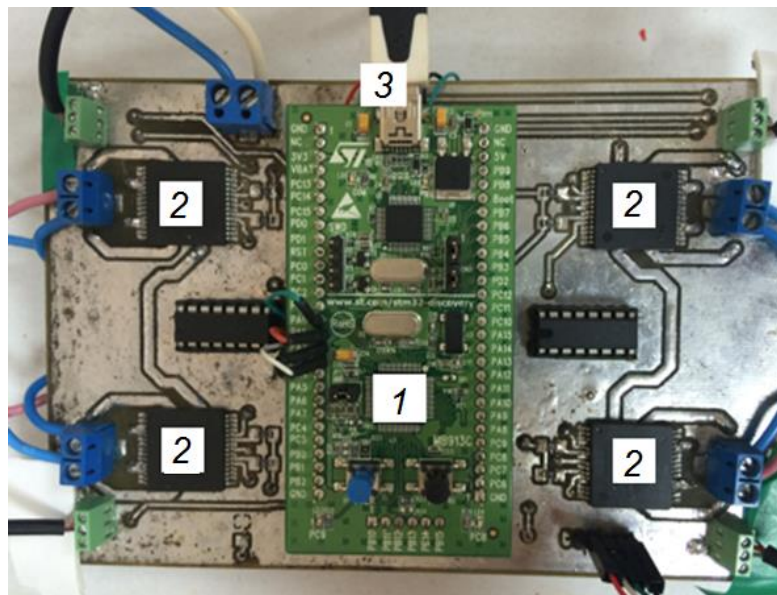


Рисунок 5.4 – Внешний вид платы модуля управления исполнительным механизмом манипулятора: 1 – плата микроконтроллера; 2 – мостовые усилители; 3 – *USB* – интерфейс

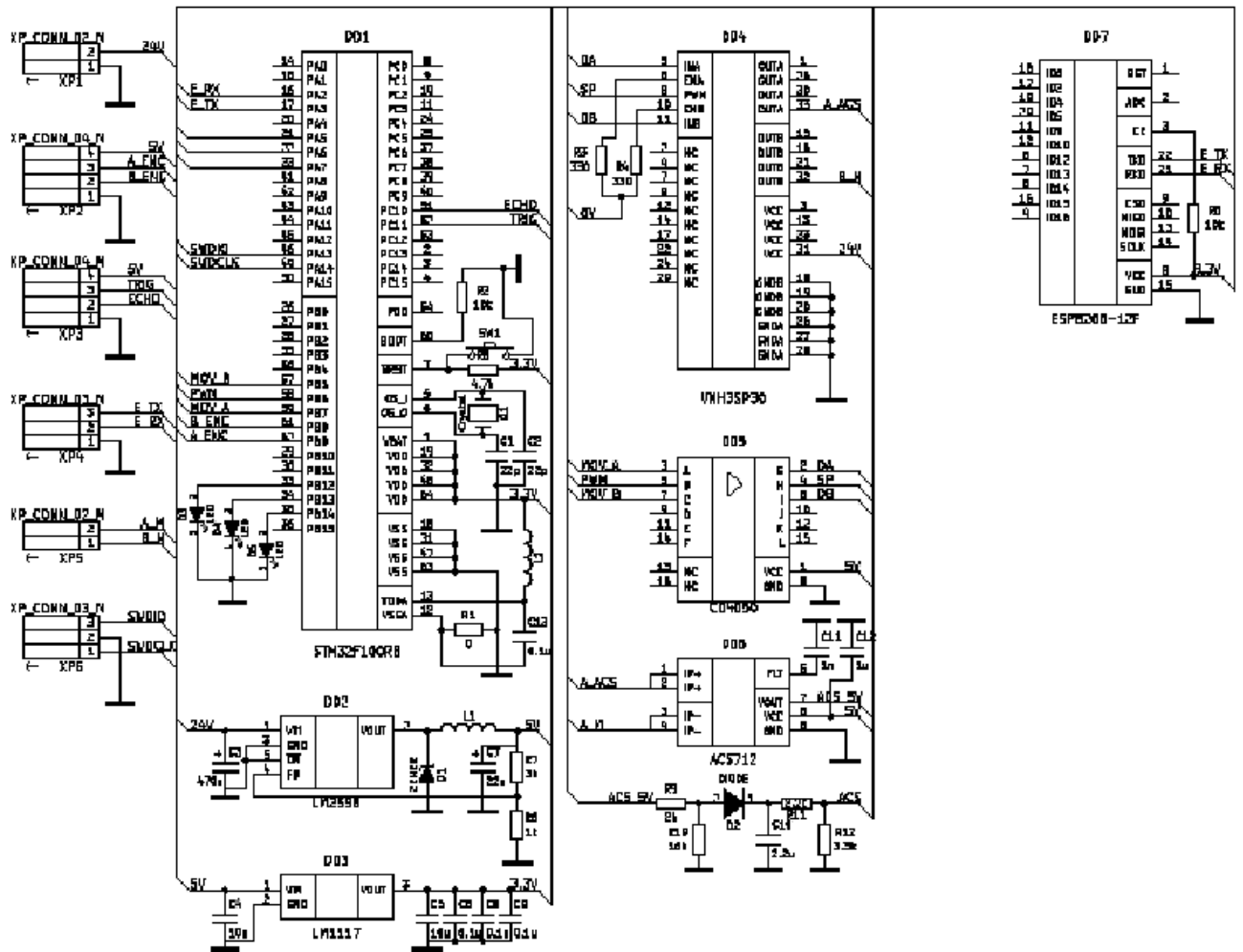


Рисунок 5.5 - Принципиальная схема модуля управления исполнительным механизмом – электроприводом

В экспериментальной установке для встраиваемой системы управления в качестве ведущего вычислителя верхнего уровня использовались различные типы одноплатных компьютеров и микроконтроллеров. Одноплатный микрокомпьютер *Raspberry Pi 2* и микроконтроллер *STM32F437* в супервизорном режиме полностью выполняли функции интеллектуальных коммуникаторов между удаленной ЭВМ и контроллерами нижнего уровня. Однако ресурсов этих вычислителей недостаточно для поддержки автономного режима, в частности, для работы с системами технического зрения.

Применение мощных промышленных компьютеров типа *ARBOR FPC7702* повышает эффективность разработанных алгоритмов обработки изображений и траекторий движения рабочих звеньев, но быстродействие системы остается

невысоким. Существенно повысить скорость работы позволят применение технологий *CUDA* и графических процессоров. С другой стороны, включение видеокарт с графическими процессорами или ускорителей на платформах компании *NVIDIA* приведет к резкому повышению энергопотребления, что сделает проблематичным их применение во встраиваемых бортовых системах.

5.4. Программное обеспечение системы управления

В супервизорном режиме программное обеспечение, разработанное для управления электроприводами манипулятора, разделено на два уровня. Верхний уровень представляет программный модуль, исполняемый на управляющем компьютере. Он реализует набор функций для вычисления основных параметров алгоритмов управления актуаторами манипулятора в реальном времени в зависимости от заданных режимов работы. Нижний уровень включает модули управления отдельными исполнительными механизмами манипулятора, выполняемыми на микроконтроллере бортовой системы. В зависимости от исполнения встроенной системы управления (централизованная с единственным контроллером во встроенной системе или распределенная многопроцессорная система) функции управления на верхнем и нижнем уровнях могут перераспределяться, но в целом сохраняется клиент-серверная архитектура, в которой клиентское приложение выполняется на удаленном ведущем компьютере, а серверная часть передается встроенной бортовой системе управления.

Программное обеспечение системы управления манипулятором на компьютере оператора реализует ряд функций верхнего уровня. К числу основных относятся:

- расчет параметров траектории движения захвата манипулятора;
- графический интерфейс пользователя для задания режима и параметров перемещения рабочей точки манипулятора и отображения ее текущего состояния;

- формирование команд управления во встраиваемую бортовую систему в соответствии с заданным режимом и параметрами по заданным законам перемещения захвата манипулятора и актуаторов;
- выполнение операций обмена информацией по беспроводному каналу связи.

Обмен информацией между управляющими программами верхнего и нижнего уровней осуществляется по протоколу, основанному на разработанной системе команд управления.

Программы верхнего уровня написаны на языке *C#* в среде разработки *Visual Studio 2013*. Они выполняют вычисления для реализации заданных алгоритмов перемещения захвата манипулятора, отображение в интерфейсных окнах задаваемых и текущих параметров и формирование команд управления для модулей нижнего уровня.

Модули нижнего уровня написаны на языке *C* в среде разработки *Keil uVision (MDK-ARM)* и загружаются в память программ микроконтроллера посредством программатора/отладчика *ST-Link*.

Все основные сигналы управления исполнительными устройствами манипулятора-трипода, включающими линейные приводы манипулятора генерируют микроконтроллер в централизованной системе или микроконтроллеры в распределенной модульной структуре. Модули нижнего уровня принимают сигналы обратной связи от исполнительных устройств, обрабатывают поток измерительной информации от сенсорной системы (датчики тока, дальномеры, а в расширенном варианте от устройства технического зрения).

На рисунке 5.6 показан программный интерфейс оператора на управляющем компьютере. Основное окно разделено на несколько областей.

Раздел “Текущие значения” отображает основные характеристики всех четырех линейных приводов манипулятора в реальном времени. По этим данным от сенсорной системы встроенного блока управления рассчитываются текущие координаты рабочей точки манипулятора.

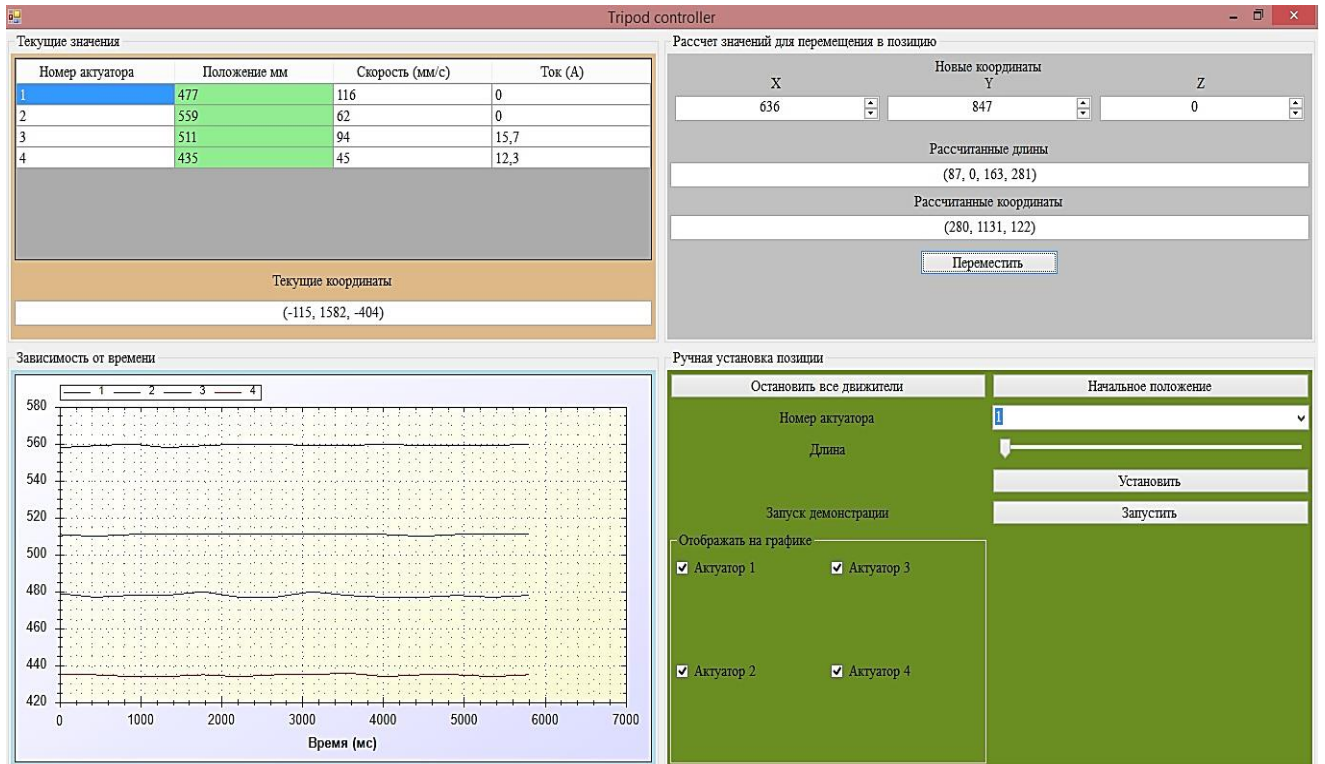


Рисунок 5.6 – Программный интерфейс оператора

В разделе “Расчет значений для перемещения в позицию” задаются параметры для линейных приводов, обеспечивающих перемещение манипулятора в новое положение по заданным трехмерным координатам. При этом вычисляются длины штоков линейных приводов, а по их значениям и координаты рабочей точки для сравнения с заданными координатами.

Раздел “Зависимость от времени” показывает временные характеристики каждого из приводов, выбранных в поле “Отображать на графике”. На графике отображаются значения одного из выбранных текущих параметров - положение, скорость, ток.

Раздел “Ручная установка позиции” позволяет установить значение длины для выбранного привода вручную, перевести манипулятор в начальное положение, остановить все двигатели, запустить демонстрационный проверочный режим, в котором поочередно на всех приводах устанавливаются максимальные длины подвижных элементов.

5.5 Особенности системного программного обеспечения модулей нижнего уровня

При управлении электроприводами манипулятора одна из основных проблем заключается в повышении скорости реакции микроконтроллеров на изменения измерительных сигналов от датчиков состояния приводов. В рассмотренных вариантах структур – централизованной (рисунок 5.2) на микроконтроллере *STM32F407* и распределенной (рисунок 5.3) на микроконтроллерах *STM32F100 RB* в реальном масштабе времени происходит опрос состояния нескольких датчиков на каждом приводе. Независимо от формы сигналов (цифровые или аналоговые) требуется их предварительная обработка по выполнению фильтрации шумов, коррекции искажений и расчетов при косвенных измерениях. В частности, при использовании простейших методов обработки по алгоритму скользящего среднего на выполнение подпрограмм цифровой обработки данных по отдельным информационным входам может занимать несколько десятков мс.

В этих условиях наиболее эффективный способ переключения для вызова подпрограмм обработки измерительных данных и решения задач их последующей обработки предоставляет операционная система реального времени (ОСРВ). Для разработки управляющего ПО исполнительным блоком использовалась ОСРВ *FreeRTOS*. Преимущество этой ОСРВ, по сравнению с другими известными системами, в основном, сводятся в более развитых средствах поддержки и открытым исходным кодом, мультиплатформенности, простотой установки на микроконтроллерах семейства *STM32F1/F4* и минимальными требованиями к вычислительным ресурсам.

Операционная система *FreeRTOS* сохраняет все преимущества многопоточной программы:

- Многозадачность. Механизм многозадачности обеспечивает переключение в соответствии с алгоритмом работы планировщика;

- Временная база с удобным программным интерфейсом для отсчета интервалов времени и выполнения каких-либо действий в определенные моменты времени;
- Обмен данными между задачами с удобным механизмом организации очередей данных;
- Синхронизация, реализуемая с помощью нескольких механизмов синхронизации: мьютексов, семафоров, критических секций.

В тоже время использование ОСРВ приводит к определенным накладным расходам. В частности, к ним относятся выделение дополнительных объемов памяти программ для хранения ядра ОСРВ и памяти данных для хранения стека каждой задачи, семафоров, очередей, мьютексов и других объектов ядра операционной системы. Неизбежными оказываются затраты времени процессора на переключение между задачами.

В установленной на микроконтроллерах *STM32F1/F4* версии ОСРВ размер ядра *FreeRTOS* не превышает 9 кбайт. С помощью основных настроек системы из файла *FreeRTOSConfig.h* через макроопределения установлены следующие параметры: набор системных функций, количество приоритетов задач и сопрограмм, размеры памяти (стека и кучи), тактовая частота микроконтроллера и ряд других.

В отдельные задачи *FreeRTOS* в разработанном программном обеспечении управления приводами манипулятора выделены основная процедура принятия решения по командам от центрального процессора, модули обработки данных от нескольких сенсорных источников: ультразвукового и инфракрасного дальномеров, энкодера, датчика тока, а также модуль беспроводной связи с ЭВМ оператора. В основе работы ОСРВ применяется вытесняющая многозадачность, в которой получение данных от сенсоров более приоритетная задача, чем процедура принятие решений. В свою очередь по уровням приоритетов для задач измерения установлена очередь в порядке убывания: приоритет энкодера, датчика тока, дальномера ультразвукового, дальномера инфракрасного, модуля связи. При этом в многопоточной программе модуль принятия решений может получать

доступ к значению измеренных параметров через объекты синхронизации, что позволяет получить действительные данные от сенсоров, а длительные вычисления в модуле измерения не приведут к приостановке процедуры принятия решений.

Все затраты и накладные расходы при установке системы окупаются за счет детерминированного приоритетного механизма очередей, повышения скорости реакции процессоров на запросы вызова программ обработки данных, практически по всем источникам прерываний. Кроме того, *FreeRTOS* повышает удобство разработки, отладки и модификации программ, в том числе и потому, что модуль принятия решений становится полностью абстрагированным от аппаратного уровня и взаимодействует с компонентами системы через их интерфейсы. В целом, ОСРВ решает основную задачу управляющей программы - изменение параметров движения линейного привода, на основе принятых от центрального процессора команд и данных сенсорной системы.

5.6. Результаты численного и экспериментального моделирования

Численное моделирование перемещения захвата манипулятора по программным движениям, полученным при решении задачи динамического синтеза программных движений параллельно-последовательного манипулятора с фиксированными значениями переменных в заданный момент времени проводилось в среде *Mathcad* 15 (Приложение 6). Экспериментальное моделирование проводилось для манипулятора, установленном на робототехническом комплексе РШ-7.

Численное и экспериментальное моделирование проводились для манипулятора со следующими параметрами: начальная длина звена 1 равна 1160 мм, ход 610 мм, начальная длина 2-го и 3-его звеньев 1140 мм, ход 610 мм, начальная длина 4-го звена 843 мм, а ход 457 мм. Максимальная нагрузка толкания и втягивания равна 2300 Н, мощность приводного двигателя 150 Вт. Скорость при полной нагрузке 45 мм/с, в отсутствии нагрузки 65 мм/с. В

результате решения задачи идентификации [4] для разработанного робота получено $m=57$ кг $m_A=45$ кг. Масса переносимого груза $m_G=15$ кг.

Начальные значения длин звеньев манипулятора равны $L_{10}=1400$ мм, $L_{20}=1500$ мм, $L_{30}=1352$ мм, $L_{40}=903$ мм. Этим значениям, полученным по показаниям датчиков положения, соответствуют координаты захвата $x(0)=-297$ мм, $y(0)=1117$ мм, $z(0)=759$ мм и угол наклона основания манипулятора $\varphi(0)=0.323$ рад. Задавшись конечными значениями координат захвата: $x(T)=300$ мм, $y(T)=1500$ мм, $z(T)=-700$ мм (рисунок 5.7), определяются законы изменения координат захвата $x_k(t)$, угла наклона поворотного основания манипулятора $\varphi(t)$, и длин его звеньев.

При значении коэффициента $\mu=1$, угол поворота основания изменяется на 0.05 рад., однако максимальный ход штока первого актуатора превышает максимально допустимый. Вследствие чего, в дальнейших расчетах, значение коэффициента μ принималось равное 2. При этом значении μ , угол поворота основания уменьшается до 0.557 рад., а изменение длин актуаторов не превышает допустимые.

На рисунке 5.8 приведены программные и экспериментальные законы изменения длин исполнительных звеньев для перемещения захвата с начальными координатами $M_0(X_{M_0}, Y_{M_0}, Z_{M_0})$ и конечными координатами $M_k(X_{M_k}, Y_{M_k}, Z_{M_k})$ за время $T=7,1$ с по законам (4.60) изменения координат точки захвата.

Приведенные расчетные и экспериментальные зависимости изменения длин звеньев манипулятора от времени при движении захвата по прямой показали, что максимальное расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 10% (рисунок. 5.9). Совпадение, с учетом ошибок измерений, теоретических и экспериментальных результатов может служить подтверждением практической реализуемости, исследованных законов движения.

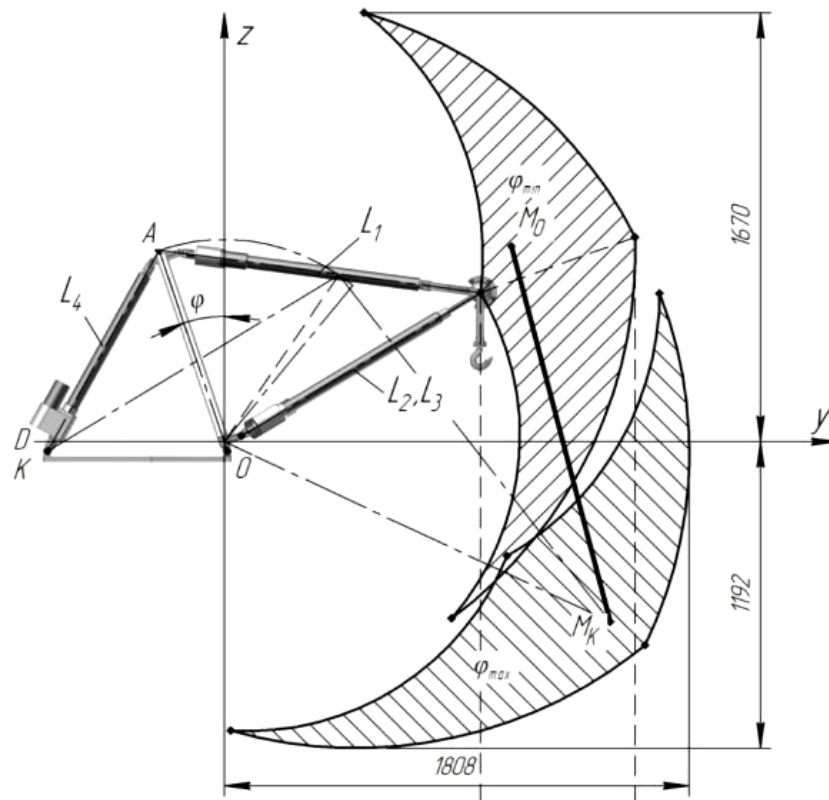


Рисунок 5.7 - Перемещение захвата по прямой траектории для синусоидального закона изменения ускорения

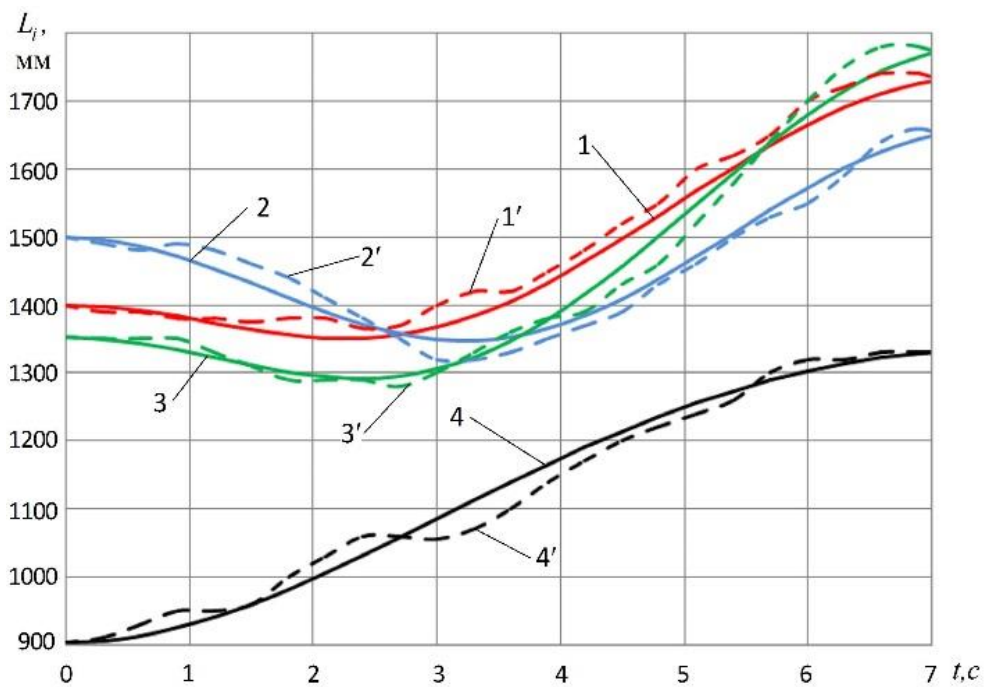


Рисунок 5.8 - Расчетные (кривые 1-4) и экспериментальные (кривые 1'-4') зависимости изменения длин звеньев 1 - 4 манипулятора от времени при движении захвата по прямой

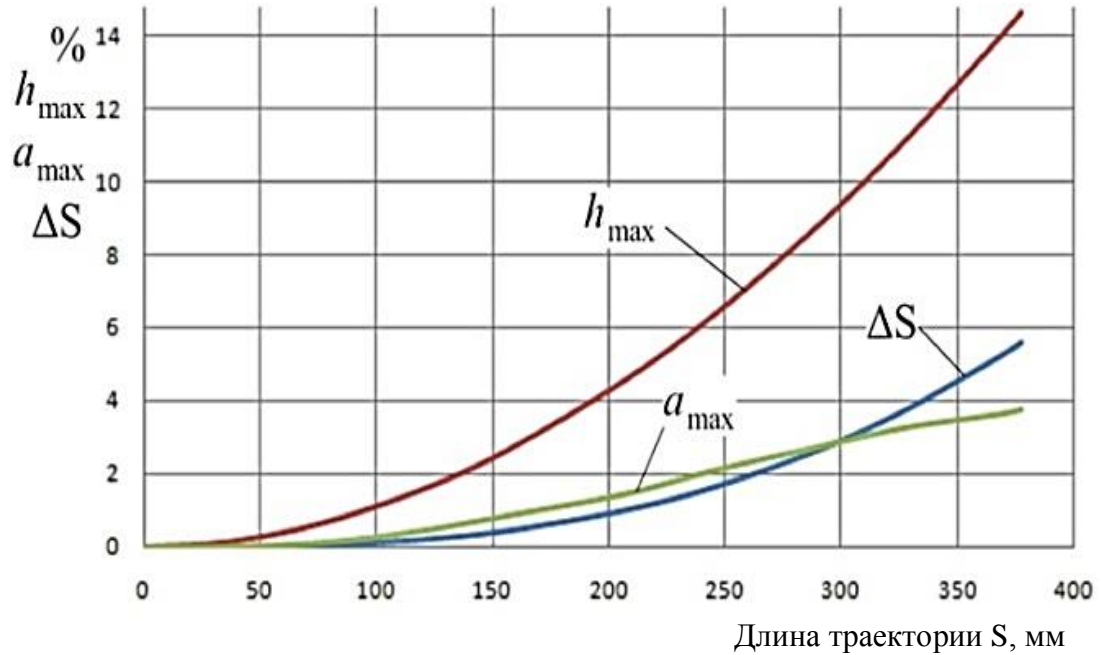


Рисунок 5.9 - Зависимости максимального отклонения (h_{max}) захвата манипулятора от прямолинейной траектории; увеличение длины траектории (ΔS) и отношение максимальных значений a_{max} ускорений захвата при движении по прямой и при синусоидальном законе изменения ускорения в зависимости от расстояния между точками позиционирования

5.7. Идентификация параметров математической модели манипулятора

В главе 4 представлена математическая модель динамики манипулятора, представленная в пространстве состояний (4.35). Задача параметрической идентификации, применительно к рассматриваемому объекту, при постоянных параметрах модели манипулятора, заключается в определении на основе экспериментальных данных значений этих параметров, при которых предложенная модель наилучшим образом, в определенном смысле, аппроксимирует динамические процессы, описываемые n мерным вектором состояния системы $x(t)$, для различных входных сигналов m мерного вектора управления $u(t)$ на интервале $[t_1, t_2]$.

5.7.1. Динамика парциальных движений манипулятора

При парциальном движении изменяется только одна из обобщенных координат манипулятора. При k парциальном движении все приводные двигатели, кроме k заторможены, а на вход k двигателя подается программное управляющее напряжение $u_k(t)$, соответствующее желаемому перемещению захвата. Исследования парциальных движений используются для синтеза и анализа передаточных механизмов манипулятора. Кроме того, весь процесс позиционирования, возможно осуществлять в виде последовательности парциальных движений.

Математическая модель (рисунок 5.10) манипулятора без учета массы переносимого груза записывается в форме (4.6)

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= F_1 \frac{x}{ml_1} + F_2 \frac{x-OB}{ml_2} + F_3 \frac{x+OB}{ml_3}, \\ \ddot{y} &= F_1 \frac{y+OA \cdot \sin \varphi}{ml_1} + F_2 \frac{y}{ml_2} + F_3 \frac{y}{ml_3}, \\ \ddot{z} &= F_1 \frac{z-OA \cdot \cos \varphi}{ml_1} + F_2 \frac{z}{ml_2} + F_3 \frac{z}{ml_3} - g, \\ \ddot{\varphi} &= F_1 \frac{y \cdot \cos \varphi + z \cdot \sin \varphi}{OA \cdot m_A l_1} + F_4 \frac{DK \cdot \sin \varphi - OK \cdot \cos \varphi}{OA \cdot m_A l_4} + \frac{g}{OA} \sin \varphi.\end{aligned}\tag{5.1}$$

Математическая модель динамики движения манипулятора включает как известные параметры, так и те, которые точно не известны. Например, известны геометрические параметры манипулятора, моменты инерции ротора электродвигателя и редуктора, передаточные отношения редуктора и винтовой передачи, тогда как значения приведенной жесткости $c_{1\varphi}$ упругой связи между валом двигателя и червячным колесом, жесткость винта $c_{2\varphi}$ на кручение являются неизвестными.

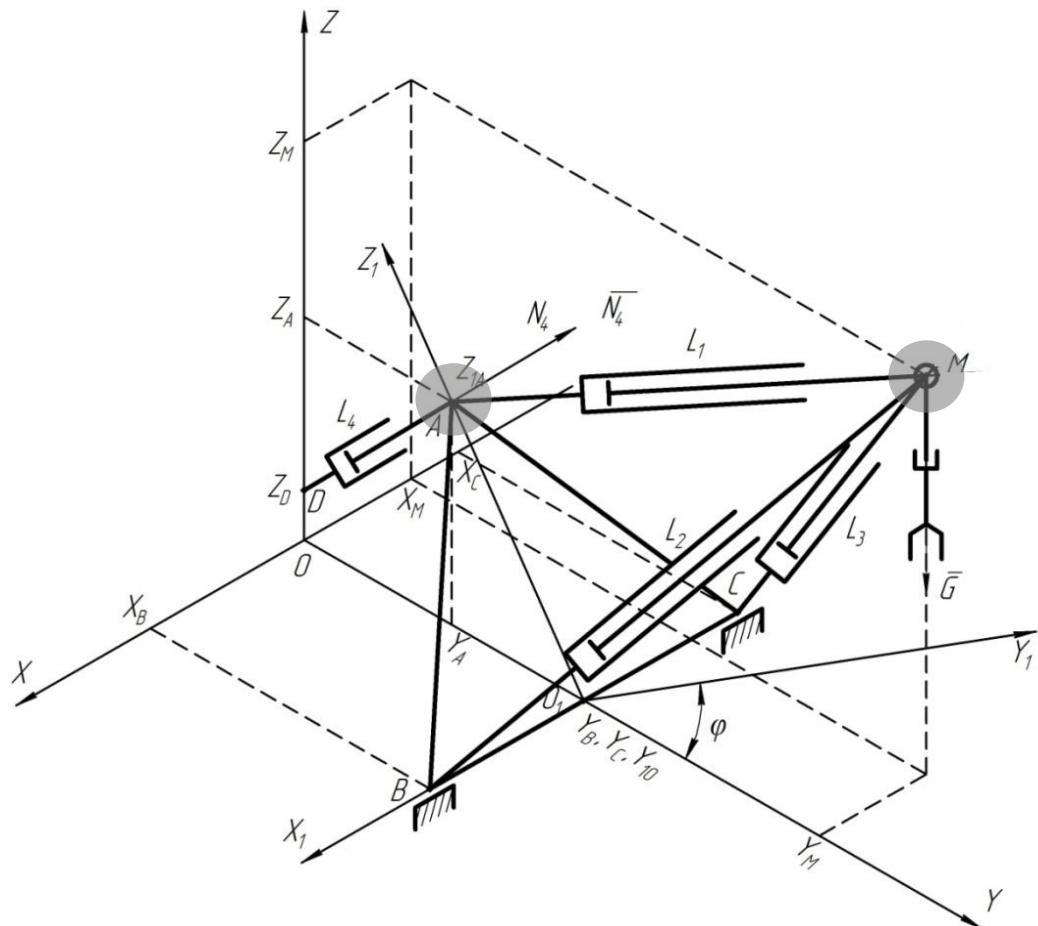


Рисунок 5.10 - Расчетная схема манипулятора – трипода с двумя дискретными массами в точках A и M

Управление движением манипулятора осуществляется при помощи микропроцессорной системы с ШИМ управлением электродвигателями постоянного тока. С помощью линейного потенциометра, выполняющего функции абсолютного энкодера, определяется абсолютное значение длины выдвинутого штока. В систему управления манипулятором включен датчик тока ACS712 (рисунок 5.2), предназначенный для измерения тока потребления электропривода, пропорциональный моменту, развиваемому электродвигателем [155].

Таким образом, имеется возможность измерять и рассчитывать с большой точностью моменты электродвигателя, входные сигналы, подаваемые на него, длины и скорости штоков исполнительных цилиндров. Задача идентификации параметров разбита на два этапа: на основании экспериментальных исследований

перемещения подвеса одним первым исполнительным цилиндром и на основании экспериментальных исследований перемещения точки крепления подвеса при работе одного четвертого исполнительного цилиндра. В первом случае уравнения модели описывают перемещение только одной приведенной массы m в точке крепления подвеса, во втором эксперименте одновременно перемещаются две массы m_A и m . В том и другом случаях, траектории точек крепления масс являются окружностями, расположенными в продольной плоскости симметрии манипулятора zOy .

5.7.2. Динамика упругого привода манипулятора при перемещении одной дискретной массы

В разделе 4.1.1 расчетным методом определены массовые параметры m и m_A модели манипулятора с дискретными массами. Дифференциальные уравнения парциального движения манипулятора при работе одного первого исполнительного цилиндра имеют вид

$$\begin{aligned}\ddot{y} &= F_1 \frac{y + OA \cdot \sin \varphi}{ml_1} + 2F_2 \frac{y}{ml_2}, \\ \ddot{z} &= F_1 \frac{z - OA \cdot \cos \varphi}{ml_1} + 2F_2 \frac{z}{ml_2} - g,\end{aligned}\tag{5.2}$$

$$\ddot{\varphi} = F_1 \frac{y \cdot \cos \varphi + z \cdot \sin \varphi}{OA \cdot m_A l_1} + F_4 \frac{DK \cdot \sin \varphi - OK \cdot \cos \varphi}{OA \cdot m_A l_4} + \frac{g}{OA} \sin \varphi = 0.$$

В уравнениях (5.2) учтено, что при выбранном парциальном движении $x=0$, $l_2=l_3, F_2=F_3$.

Для определения управляющего усилия в первом исполнительном цилиндре служат уравнения (4.9 – 4.13)

$$\tau \dot{T}_1 + T_1 = ru_1(t) - s\omega_{11},\tag{5.3}$$

$$I_1 \dot{\omega}_{11} = T_1 - T_{11} - T_{c1} \cdot \text{sign} \omega_{11}, \quad (5.4)$$

$$I_2 \dot{\omega}_{21} = T_{21} - T_{31} - T_{c2} \cdot \text{sign} \omega_{21}, \quad (5.5)$$

$$m_3 \ddot{l}_1 = F_1^{oc} - F_1, \quad (5.6)$$

$$T_{21} = T_{11} \cdot i \cdot \eta = c_{1\varphi} \cdot \left(\frac{\alpha_{11}}{i} - \alpha_{21} \right) \cdot i \cdot \eta, \quad (5.7)$$

$$T_{31} = c_{2\varphi} (\alpha_{21} - \alpha_{31}) = 0.9 F_1^{oc} \frac{d_3}{2} \cdot \text{tg} (\beta_3 + \rho_3), \quad (5.8)$$

$$\dot{\alpha}_{31} = \frac{2\pi}{pn} \dot{l}_1. \quad (5.9)$$

Момент на ведущем валу электродвигателя из (5.3 – 5.9) найдется как

$$\begin{aligned} T_1 = m_3 \left[\frac{i\eta}{c_{2\varphi}} \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) + \frac{I_1}{c_{1\varphi}} \right] \ddot{l}_k + \left[\left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) \frac{2\pi i \eta}{pn 0.45 d_3 \text{tg} (\beta_3 + \rho_3)} + \frac{m_3}{i} \right] \ddot{l}_1(t) + \\ + \left[\frac{i\eta}{c_{2\varphi}} \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) + \frac{I_1}{c_{1\varphi}} \right] \ddot{F}_1 + F_1 + \left(T_{c1} \text{sign} \omega_{11} + \frac{T_{c2}}{i\eta} \text{sign} \omega_{21} \right) \frac{\eta}{0.45 d_3 \text{tg} (\beta_3 + \rho_3)}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Дифференциальное уравнение $l_1(t)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \left[\tau \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) \frac{2\pi i}{pn} + \tau a_2 m_3 + a_2 m_3 i \eta \left(\frac{1}{c_{2\varphi}} + \frac{1}{c_{1\varphi} \eta} \right) \right] \ddot{l}_1(t) + \left[\left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) \frac{2\pi i}{pn} + a_2 m_3 \right] \dot{l}_1(t) + \\ + s \frac{2\pi i}{pn} \dot{l}_1(t) = ru_1 - a_2 \cdot F_1 - \tau a_2 \cdot \dot{F}_1 - a_2 i \left[\frac{i\eta}{c_{2\varphi}} \left(I_1 + \frac{I_2}{i^2\eta} \right) + \frac{I_1}{c_{1\varphi}} \right] \ddot{F}_1 - \\ - T_{c1} \text{sign} \omega_{11} - \frac{T_{c2}}{i\eta} \cdot \text{sign} \omega_{21}. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Для не активных приводов, ($k = 2 \div 4$), $u_k = 0$, $T_k = 0$, $\alpha_k = 0$, $\omega_k = 0$, а уравнения (4.10) и (4.11) не имеют смысла. Усилия в пассивных цилиндрах зависят от кинематических параметров перемещаемого груза и упругих характеристик передаточного механизма.

В этом случае, на червячном колесе реализуется момент сил упругости равный

$$T_{2k} = -c_{1\varphi} \cdot \alpha_{2k}. \quad (5.12)$$

Выражая из (4.15) α_{2k} и учитывая (4.13) находим

$$\alpha_{2k} = \frac{0,45d_3(m_3\ddot{l}_k + F_k) \cdot \operatorname{tg}(\beta_3 + \rho_3)}{c_{2\varphi}} + \alpha_{3k}. \quad (5.13)$$

Тогда уравнение (4.12)

$$I_2 \dot{\omega}_{2k} = T_{2k} - T_{3k} - T_{c2} \cdot \operatorname{sign} \omega_{2k},$$

с учетом (5.13), (4.18) и производных по времени от них, принимает вид

$$\begin{aligned} I_2 \frac{0,45d_3 m_3 \cdot \operatorname{tg}(\beta_3 + \rho_3)}{c_{2\varphi}} \ddot{l}_k + \left\{ I_2 \frac{2\pi}{pn} + 0,45d_3 m_3 \cdot \operatorname{tg}(\beta_3 + \rho_3) \left[1 + \frac{c_{1\varphi}}{c_{2\varphi}} \right] \right\} \dot{l}_k + \frac{2\pi}{pn} c_{1\varphi} l_k = \\ = - \frac{0,45d_3 \cdot \operatorname{tg}(\beta_3 + \rho_3)}{c_{2\varphi}} \ddot{F}_k - 0,45d_3 \cdot \operatorname{tg}(\beta_3 + \rho_3) \left[1 + \frac{c_{1\varphi}}{c_{2\varphi}} \right] F_k - T_{c2} \cdot \operatorname{sign} \omega_{2k}, \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$k = 2 \div 4.$$

Из уравнений (5.2 – 5.9), (5.14), при известном законе изменения управляющего напряжения $u_1(t)$, с учетом уравнений связи

$$\begin{aligned} \sqrt{(y + OA \cdot \sin \varphi)^2 + (z - OA \cdot \cos \varphi)^2} &= l_1(t), \\ \sqrt{OB^2 + y^2 + z^2} &= l_2(t) = l_3(t), \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$f_4 = \sqrt{(OK - OA \cdot \sin \varphi)^2 + (OA \cdot \cos \varphi - DK)^2} - l_4(t) = 0.$$

находятся $x(t), y(t), \varphi(t), F_k, k=1,2,4, F_2 = F_3, l_1(t), l_2(t) = l_3(t), l_4(t)$ и

$$T_1, T_{11}, F_1^{oc}, \alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{31}.$$

5.7.3. Динамика упругого привода манипулятора при перемещении двух дискретных масс

При работе одного четвертого исполнительного цилиндра дифференциальные уравнения парциального движения манипулятора имеют тот же вид (5.2).

Для определения усилия в четвертом исполнительном цилиндре уравнения (4.10 – 4.13) переписываются в форме

$$\tau \dot{T}_4 + T_4 = ru_4(t) - s\omega_{14}, \quad (5.16)$$

$$I_1 \dot{\omega}_{14} = T_4 - T_{14} - T_{c4} \cdot \text{sign}\omega_{14}, \quad (5.17)$$

$$I_2 \dot{\omega}_{24} = T_{24} - T_{34} - T_{c4} \cdot \text{sign}\omega_{24}, \quad (5.18)$$

$$m_3 \ddot{j}_4 = F_4^{oc} - F_4, \quad (5.19)$$

$$T_{24} = T_{14} \cdot i \cdot \eta = c_{1\phi} \cdot \left(\frac{\alpha_{14}}{i} - \alpha_{24} \right) \cdot i \cdot \eta, \quad (5.20)$$

$$T_{34} = c_{2\phi} (\alpha_{24} - \alpha_{34}) = 0.9 F_4^{oc} \frac{d_3}{2} \cdot \text{tg}(\beta_3 + \rho_3), \quad (5.21)$$

$$\dot{\alpha}_{34} = \frac{2\pi}{pn} j_4. \quad (5.22)$$

Для не активных приводов с ($k = 1 \div 3$) сохраняются уравнения (5.12 – 5.14).

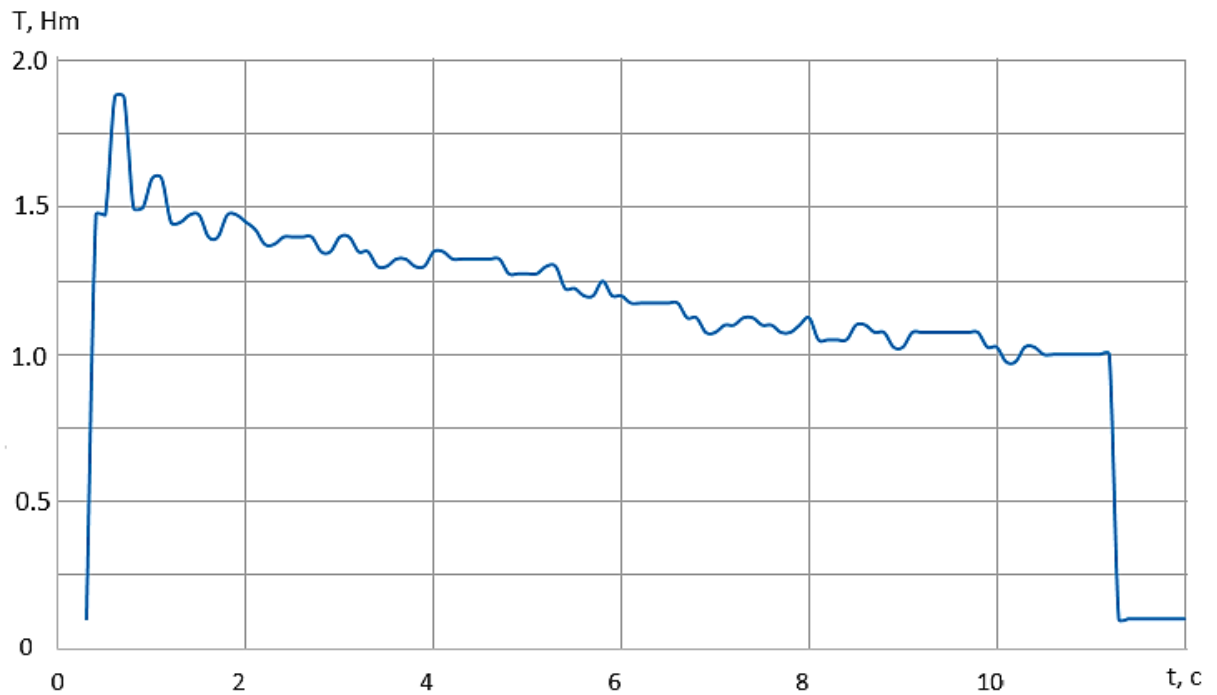
Аналогично предыдущему разделу, из уравнений (5.16 – 5.22) и (5.14), при известном законе изменения управляющего напряжения $u_4(t)$, с учетом уравнений связи (5.15), находятся $x(t)$, $y(t)$, $\varphi(t)$, $F_k, k = 1, 2, 4$, $F_2 = F_3$, $l_1(t)$, $l_2(t) = l_3(t)$, $l_4(t)$ и $T_1, T_{11}, F_1^{oc}, \alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{31}$.

5.7.4. Результаты численных экспериментов парциальных движений

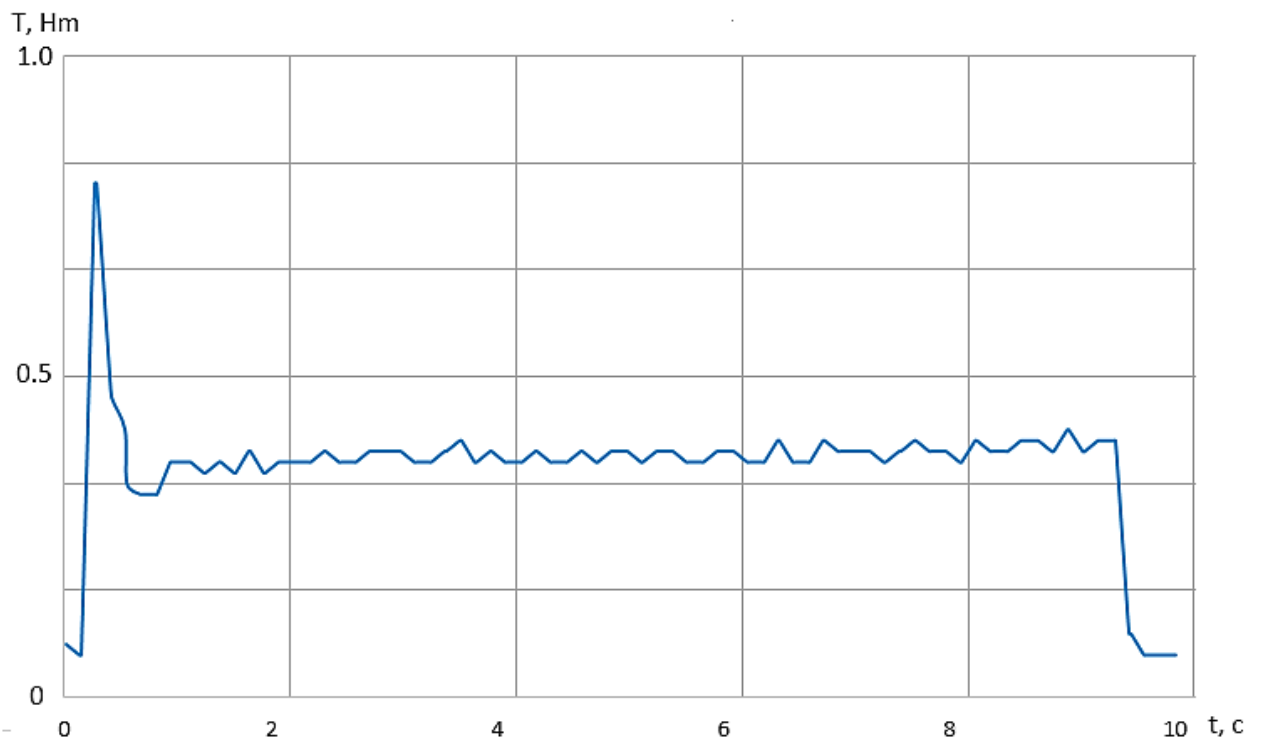
С целью определения параметров модели, проведены экспериментальные и численные исследования зависимости перемещения захвата манипулятора в плоскости yOz при работе одного первого исполнительного цилиндра и одного четвертого при прямоугольном законе изменения управляющего напряжения $u_1(t) = const, t_1 > t \geq 0, u_1(t) = 0, t \geq t_1$. Нагрузка на захват равна 320 Н. В процессе расчетов контролировалось условия (4.22, 4.23) отсутствия силового и динамического заклинивания.

На рисунке 5.11 представлены результаты численного моделирования парциальных движений одного первого исполнительного цилиндра в плоскости yOz при реализации режима втягивания (рисунок 5.11, а) и при режиме выталкивания (рисунок 5.11, б). Изменения моментов приводных электродвигателей для обоих случаев носит колебательный характер, где прослеживается несколько гармоник. Аналогичная ситуация наблюдается и при парциальном исследовании движений одного четвертого исполнительного цилиндра в плоскости yOz при реализации режима втягивания (рисунок 5.12, а) и при режиме выталкивания (рисунок 5.12, б).

Для первого (рисунок 5.11, а) и четвертого (рисунок 5.12, а) исполнительных цилиндров при режиме втягивания момент на валу приводного электродвигателя не превышает 2 Н·м, на режиме выталкивания первого (рисунок 5.11, б) и четвертого (рисунок 5.12, б) исполнительных цилиндров момент на валу электродвигателя не превышает значений 0,9 Н·м. Отсутствие резких падений или скачков крутящего момента на валу электродвигателя показывает отсутствие эффекта силового и динамического заклинивания, что еще раз подтверждает правильность выведенных условий (4.22 и 4.23) отсутствия силового и динамического.



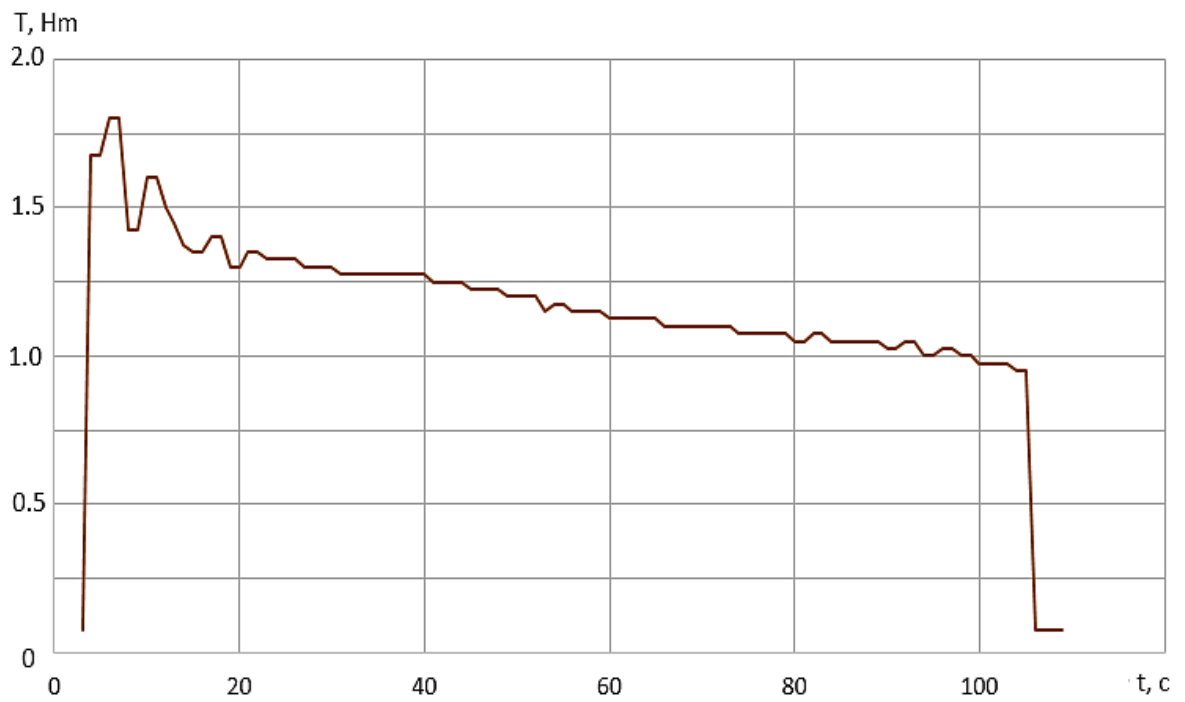
а)



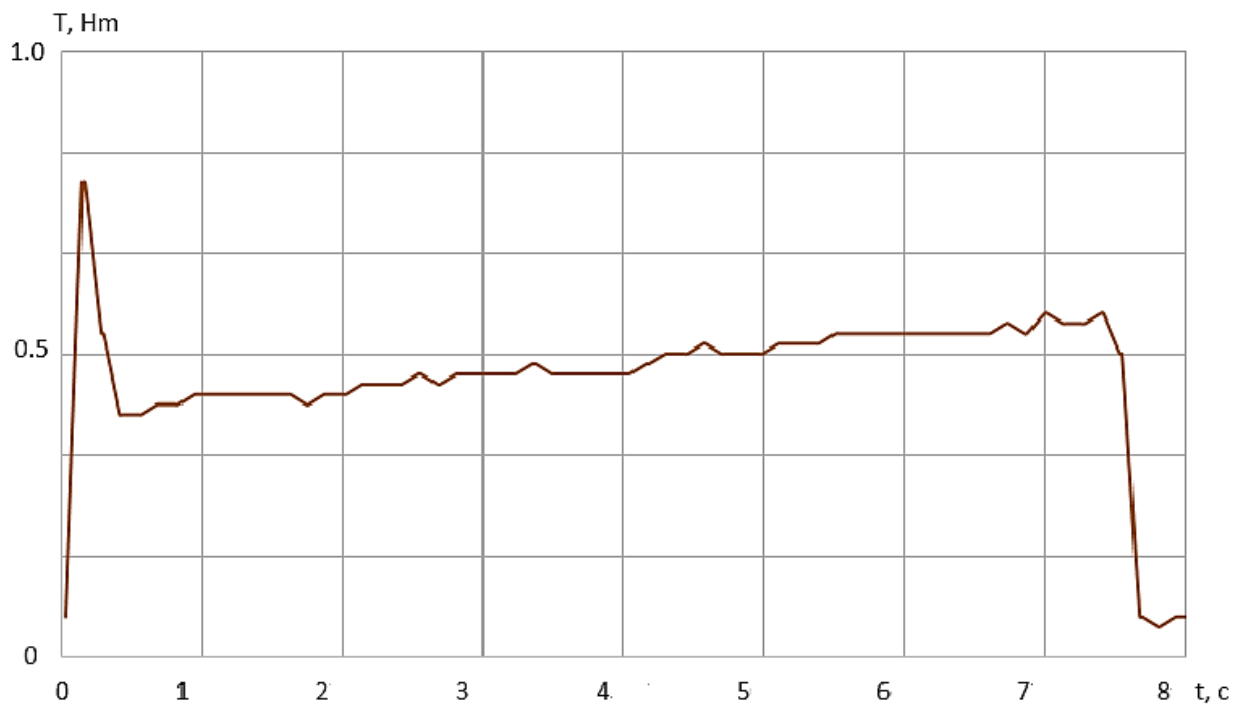
б)

Рисунок 5.11 – Результаты численного исследования парциальных движений одного первого исполнительного цилиндра в плоскости yOz :

а) режим втягивания; б) режим выталкивания



а)

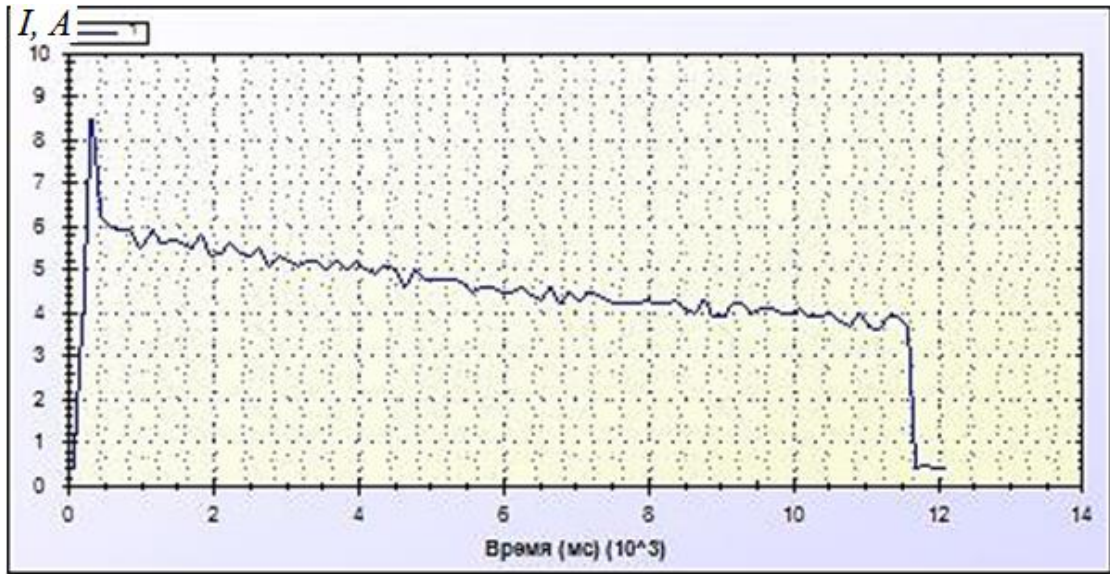


б)

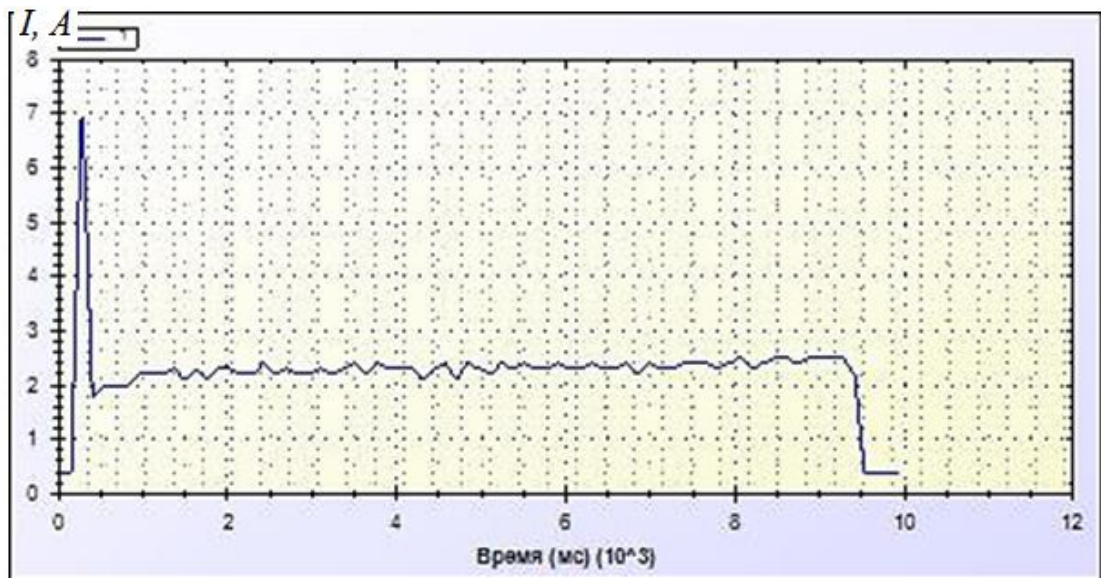
Рисунок 5.12 - Результаты численного исследования парциальных движений одного четвертого исполнительного цилиндра в плоскости yOz :

а) режим втягивания; б) режим выталкивания

Результаты численного моделирования подтверждаются результатами экспериментальных исследований парциальных движений первого исполнительного цилиндра при втягивании (рисунок 5.13, а) и выталкивании (рисунок 5.13, б) и четвертого исполнительного цилиндра при втягивании (рисунок 5.14, а) и выталкивании (рисунок 5.14, б).



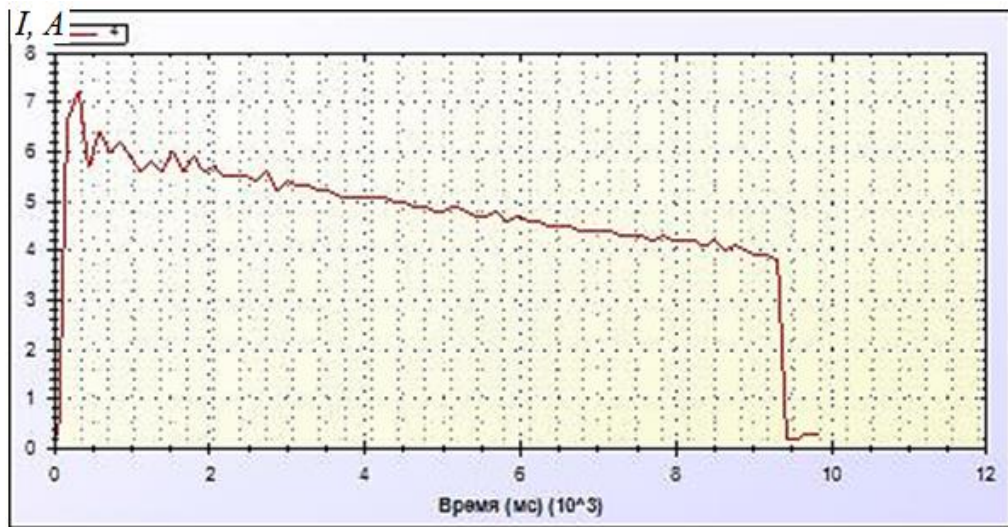
а)



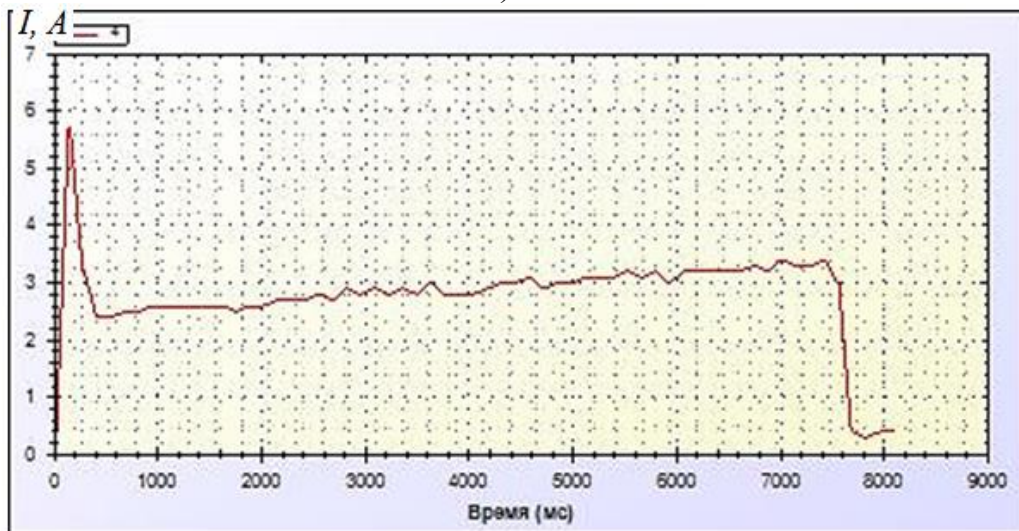
б)

Рисунок 5.13 - Результаты экспериментального исследования парциальных движений одного первого исполнительного цилиндра в плоскости yOz : а) режим втягивания; б) режим выталкивания

Как видно экспериментальных графиков (рисунки 5.13-5.15) характер изменения тока I в цепи питания электродвигателей, который находится в пропорциональной зависимости с моментом на валу электродвигателя, идентичен характеру изменения крутящего момента на валу электродвигателя (рисунки 5.11, 5.12). Характер колебаний, где прослеживаются несколько гармоник, также идентичен результатам численного моделирования. Все это еще раз подтверждает адекватность математической модели привода манипулятора.



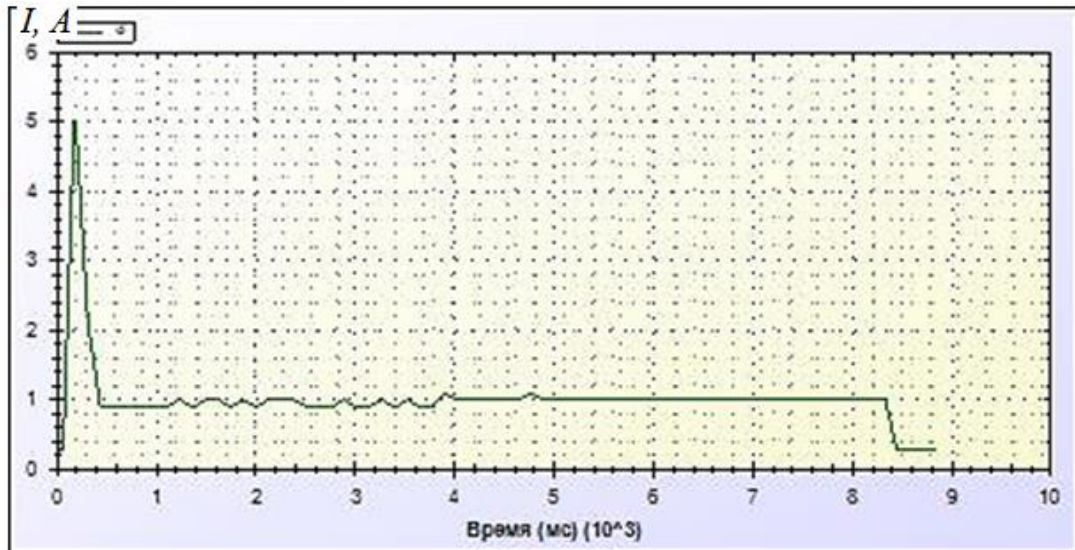
а)



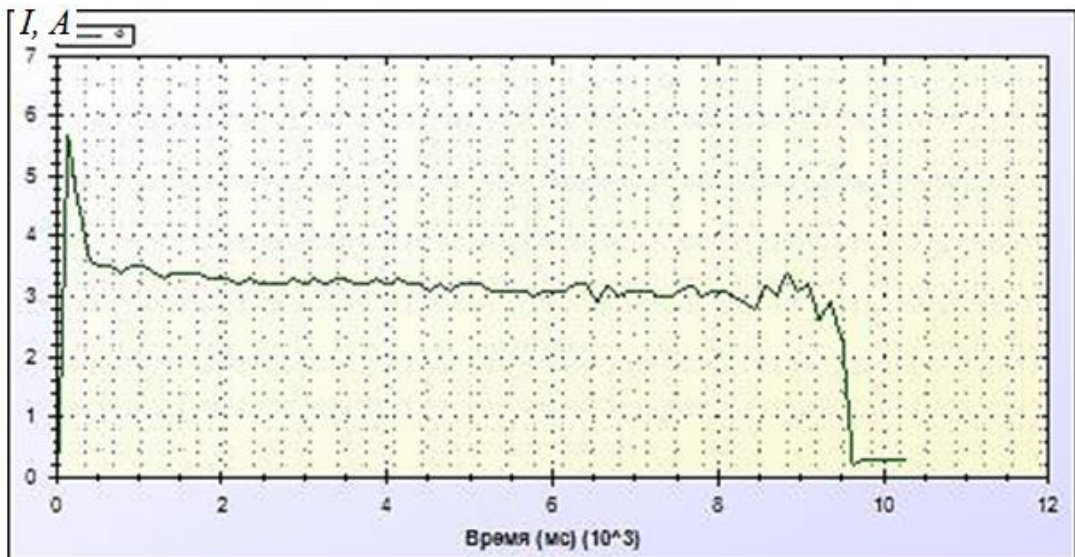
б)

Рисунок 5.14 - Результаты экспериментального исследования парциальных движений одного четвертого исполнительного цилиндра в плоскости yOz : а) режим втягивания; б) режим выталкивания

Характер изменения аналога момента на валу электродвигателя для парциальных движений второго и третьего исполнительных цилиндров идентичен при их одновременной работе при перемещении груза в базовой плоскости симметрии yOz . На рисунке 5.15 приведены результаты экспериментального исследования парциальных движений одного второго исполнительного цилиндра при режиме втягивания (а) и на режиме выталкивания (б).



а)



б)

Рисунок 5.15 - Результаты экспериментального исследования парциальных движений одного второго исполнительного цилиндра: а) режим втягивания; б) режим выталкивания

На рисунке 5.16 приведены экспериментальные и теоретические зависимости аналога момента $T_1(t)$, на валу электродвигателя для двух режимов перемещения захвата манипулятора – выдвигание первого цилиндра (кривая 1, 2), втягивание первого цилиндра (кривая 3, 4), а также экспериментальные зависимости изменения длины хода первого цилиндра при выдвигании (кривая 5) и втягивании (кривая 6).

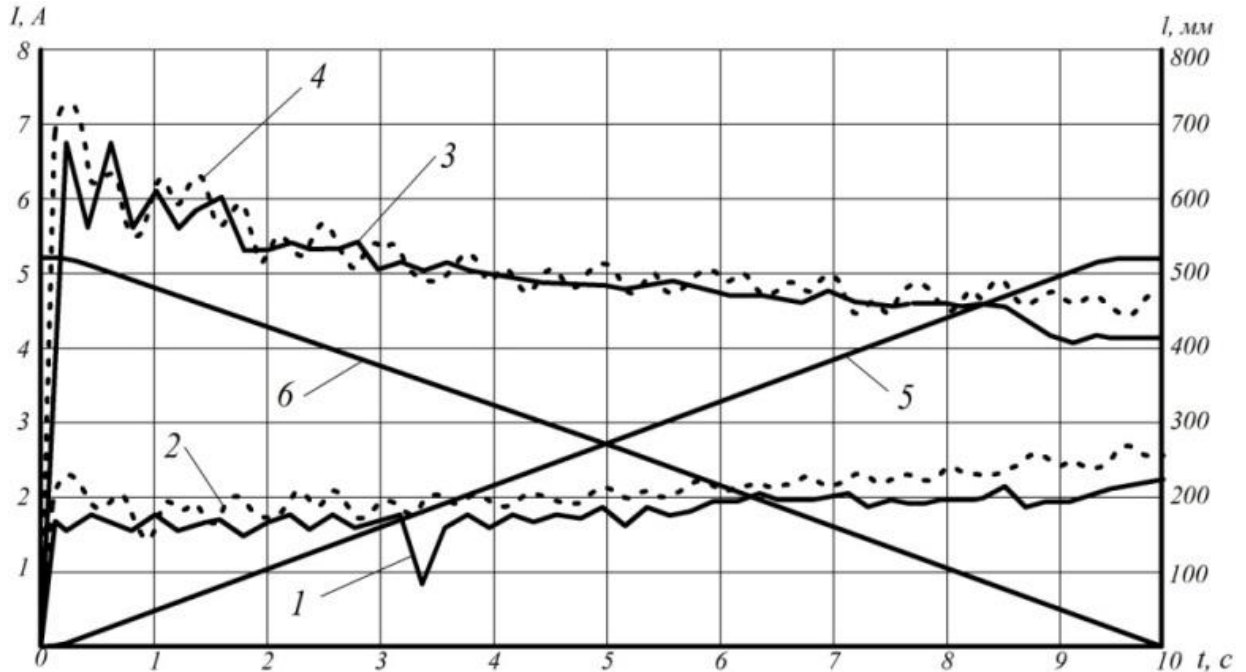


Рисунок 5. 16 - Зависимость аналога момента, развиваемого электродвигателем привода исполнительного звена манипулятора: 1, 3 – экспериментальные кривые, 2, 4 – теоретические, а также экспериментальные зависимости изменения длины хода первого звена при выдвигании (кривая 5) и втягивании (кривая 6)

5.7.5. Определение собственных частот механизма привода манипулятора

Систему уравнений (5.3 – 5.9), описывающих динамику первого активного привода, можно записать относительно обобщенных координат $\alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{31}$

$$\begin{aligned}
 I_1 \ddot{\alpha}_{11} &= T_1 - c_{1\phi} \cdot \left(\frac{\alpha_{11}}{i} - \alpha_{21} \right) - T_{c1} \cdot \text{sign} \omega_{11}, \\
 I_2 \ddot{\alpha}_{21} &= c_{1\phi} \cdot \left(\frac{\alpha_{11}}{i} - \alpha_{21} \right) \cdot i \cdot \eta - c_{2\phi} (\alpha_{21} - \alpha_{31}) - T_{c2} \cdot \text{sign} \omega_{21}, \\
 I_3 \ddot{\alpha}_{31} &= c_{2\phi} (\alpha_{21} - \alpha_{31}) - 0.45 F_1 d_3 \text{tg}(\beta_3 + \rho_3),
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

где $I_3 = 0.45d_3m_3tg(\beta_3 + \rho_3) \frac{pn}{2\pi}$ - приведенный момент инерции.

Собственные частоты колебаний привода с тремя сосредоточенными массами определяются системой однородных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} I_1 \ddot{\alpha}_{11} + c_{1\varphi} \cdot \frac{\alpha_{11}}{i} - c_{1\varphi} \cdot \alpha_{21} &= 0, \\ I_2 \ddot{\alpha}_{21} - c_{1\varphi} \cdot \frac{\alpha_{11}}{i} + (c_{1\varphi} i \cdot \eta + c_{2\varphi}) \alpha_{21} - c_{2\varphi} \alpha_{21} &= 0, \\ I_3 \ddot{\alpha}_{31} - c_{2\varphi} \alpha_{21} + c_{2\varphi} \alpha_{31} &= 0. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Уравнения (5.12) определяют свободные колебания системы с тремя степенями свободы. В соответствии со стандартной формой [38] дифференциальных уравнений для систем с тремя степенями свободы имеем

$$\begin{aligned} a_{11} = I_1, a_{22} = I_2, a_{33} = I_3, c_{11} = \frac{c_{1\varphi}}{i}, \\ c_{11} = -c_{1\varphi}, c_{12} = -\frac{c_{1\varphi}}{i}, c_{22} = c_{1\varphi} i \eta + c_{2\varphi}, c_{23} = -c_{2\varphi}, c_{32} = -c_{2\varphi}, c_{33} = c_{2\varphi}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Остальные значения коэффициентов инерции a_{ij} и жесткости c_{ij} равны нулю. Не трудно показать, что коэффициенты инерции a_{ij} и коэффициенты жесткости c_{ij} удовлетворяют условиям устойчивости [38] малых свободных колебаний механической системы

$$\begin{aligned} a_{11} > 0, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} > 0, \quad \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} > 0, \\ c_{11} > 0, \quad \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix} > 0, \quad \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{vmatrix} > 0. \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{c_{1\varphi}}{i} & -c_{1\varphi} \\ -c_{1\varphi} \eta & c_{1\varphi} i \eta + c_{2\varphi} \end{vmatrix} = \frac{c_{1\varphi} c_{2\varphi}}{i} > 0.$$

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{c_{1\varphi}}{i} & -c_{1\varphi} & 0 \\ -c_{1\varphi}\eta & c_{1\varphi}i\eta + c_{2\varphi} & -c_{2\varphi} \\ 0 & -c_{2\varphi} & c_{2\varphi} \end{vmatrix} = 0.$$

Подставляя выражения частных решений $\alpha_{j1} = A_j \sin(pt + \beta)$ в систему (5.12), получаем систему линейных однородных алгебраических уравнений относительно неизвестных A_j , ($j=1,2,3$). Эта система может иметь решение, отличное от нуля, лишь в том случае, когда ее определитель равен нулю

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{c_{1\varphi}}{i} - I_1 p^2\right) & -c_{1\varphi} & 0 \\ -c_{1\varphi}i\eta & [(c_{1\varphi}i\eta + c_{2\varphi}) - I_2 p^2] & -c_{2\varphi} \\ 0 & -c_{2\varphi} & (c_{2\varphi} - I_3 p^2) \end{vmatrix} = 0. \quad (5.15)$$

Уравнение (5.15), после вычисления определителя, принимает вид

$$p^2(b_0 p^4 + b_1 p^2 + b_2) = 0,$$

где постоянные равны

$$b_0 = I_1 I_2 I_3, \quad b_1 = -\left[c_{2\varphi} I_1 I_2 + I_1 I_3 (c_{1\varphi} i \eta + c_{2\varphi}) + \frac{c_{1\varphi}}{i} I_2 I_3 \right], \quad b_2 = c_{1\varphi} c_{2\varphi} i \left(I_1 + \frac{I_2 + I_3}{i^2} \right). \quad (5.16)$$

Первая собственная частота равна нулю, что означает совместное движение трех масс механизма привода, как единого целого. Решая биквадратное уравнение

$$(b_0 p^4 + b_1 p^2 + b_2) = 0,$$

находим

$$p_{1,2}^2 = -\frac{b_1}{2b_0} \pm \sqrt{\left(\frac{b_1}{2b_0}\right)^2 - \frac{b_2}{b_0}}.$$

Так как $-\frac{b_1}{2b_0} > 0$, и $\left(\frac{b_1}{2b_0}\right)^2 - \frac{b_2}{b_0} > 0$, но меньше $-\frac{b_1}{2b_0}$, то $p_1^2 > 0$ и $p_2^2 > 0$. В

результате, первая собственная частота системы равна

$$p_1 = \sqrt{-\frac{b_1}{2b_0} - \sqrt{\left(\frac{b_1}{2b_0}\right)^2 - \frac{b_2}{b_0}}}, \text{ а вторая } p_2 = \sqrt{-\frac{b_1}{2b_0} + \sqrt{\left(\frac{b_1}{2b_0}\right)^2 - \frac{b_2}{b_0}}}. \quad (5.17)$$

Для не активных приводов ($k = 2 \div 4$) механическая схема привода является двухмассовой. Тогда из выражений(4.11-4.13)

$$I_2 \ddot{\alpha}_{2k} = T_{2k} - T_{3k} - T_{c2} \cdot \text{sign} \omega_{2k}, T_{2k} = -c_{1\varphi} \cdot \alpha_{2k} \quad (5.18)$$

$$T_{3k} = c_{2\varphi} (\alpha_{2k} - \alpha_{3k}) = 0.9 F_k^{oc} \frac{d_3}{2} \cdot \text{tg}(\beta_3 + \rho_3), \quad (5.19)$$

$$m_3 \ddot{j}_k = F_k^{oc} - F_k, \dot{\alpha}_{3k} = \frac{2\pi}{pn} \dot{j}_k, \quad (5.20)$$

получаем систему двух дифференциальных уравнений относительно обобщенных координат

$$\begin{cases} I_2 \ddot{\alpha}_{2k} + (c_{1\varphi} + c_{2\varphi}) \alpha_{2k} - c_{2\varphi} \alpha_{3k} = T_{c2} \cdot \text{sign} \omega_{2k}, \\ 0.45 d_3 m_3 \cdot \text{tg}(\beta_3 + \rho_3) \frac{pn}{2\pi} \ddot{\alpha}_{3k} - c_{2\varphi} \alpha_{2k} + c_{2\varphi} \alpha_{3k} = 0.45 F_k d_3 \cdot \text{tg}(\beta_3 + \rho_3). \end{cases} \quad (5.21)$$

Аналогично, предыдущим рассуждениям система двух линейных однородных дифференциальных уравнений, описывающих свободные колебания механизма не активного привода, имеет вид

$$\begin{cases} a_{11} \ddot{\alpha}_{2k} + c_{11} \alpha_{2k} + c_{12} \alpha_{3k} = 0, \\ a_{22} \ddot{\alpha}_{3k} + c_{12} \alpha_{2k} + c_{22} \alpha_{3k} = 0. \end{cases} \quad (5.22)$$

где коэффициенты инерции a_{ij} и жесткости c_{ij} равны

$$a_{11} = I_2, \quad a_{22} = I_3 = 0.45 d_3 m_3 \cdot \text{tg}(\beta_3 + \rho_3) \frac{pn}{2\pi}, \quad c_{11} = c_{1\varphi} + c_{2\varphi}, \quad c_{12} = -c_{2\varphi}, \quad c_{22} = c_{2\varphi}.$$

Тогда уравнение частот относительно p^2 имеет вид

$$I_2 I_3 p^4 - [c_{2\varphi} I_2 + (c_{1\varphi} + c_{2\varphi}) I_3] p^2 + c_{1\varphi} c_{2\varphi} = 0, \quad (5.23)$$

из которого находим

$$p_{1,2}^2 = \frac{[c_{2\varphi} I_2 + (c_{1\varphi} + c_{2\varphi}) I_3] \pm \sqrt{[c_{2\varphi} I_2 + (c_{1\varphi} + c_{2\varphi}) I_3]^2 - c_{1\varphi} c_{2\varphi} I_2 I_3}}{I_2 I_3}. \quad (5.24)$$

5.7.6. Спектральный анализ экспериментальных результатов

Экспериментальные исследования динамики движения манипулятора, показывают (рисунки 5.13-5.15), что изменения моментов приводных электродвигателей носит колебательный характер. Эти колебания вызываются силами инерции элементов конструкции манипулятора и переносимого груза, начальными условиями, а также переменностью управляющих сил и внешних нагрузок.

Полученные в результате экспериментов зависимости моментов приводных электродвигателей раскладывались в ряд Фурье. За период раскладываемой функции принимался интервал T реализации. После замена переменной t , выражением

$$\eta = \frac{2\pi}{T}t,$$

Коэффициенты ряда Фурье

$$F(t) = A_0 + \sum_{k=1}^M (A_k \cos k\eta + B_k \sin k\eta)$$

вычислялись по формулам

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\eta) d\eta, \quad A_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\eta) \cos k\eta d\eta, \quad B_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\eta) \sin k\eta d\eta.$$

Вычисления коэффициентов ряда Фурье проводилось по стандартной программе [120]. Некоторые результаты частотного спектра механизма линейного привода манипулятора приведены на рисунке 5.17.

Как видно из результатов спектрального анализа, основной вклад в колебания привода составляют первая $6,38 \text{ с}^{-1}$ и вторая частоты $21,2 \text{ с}^{-1}$. Подставляя их значения в выражения (5.17-5.20), вычисляем значения жесткостей $c_{1\varphi}$ упругой связи между валом двигателя и червячным колесом и $c_{2\varphi}$ винта на кручение. $c_{2\varphi}$ - жесткость винта на кручение.

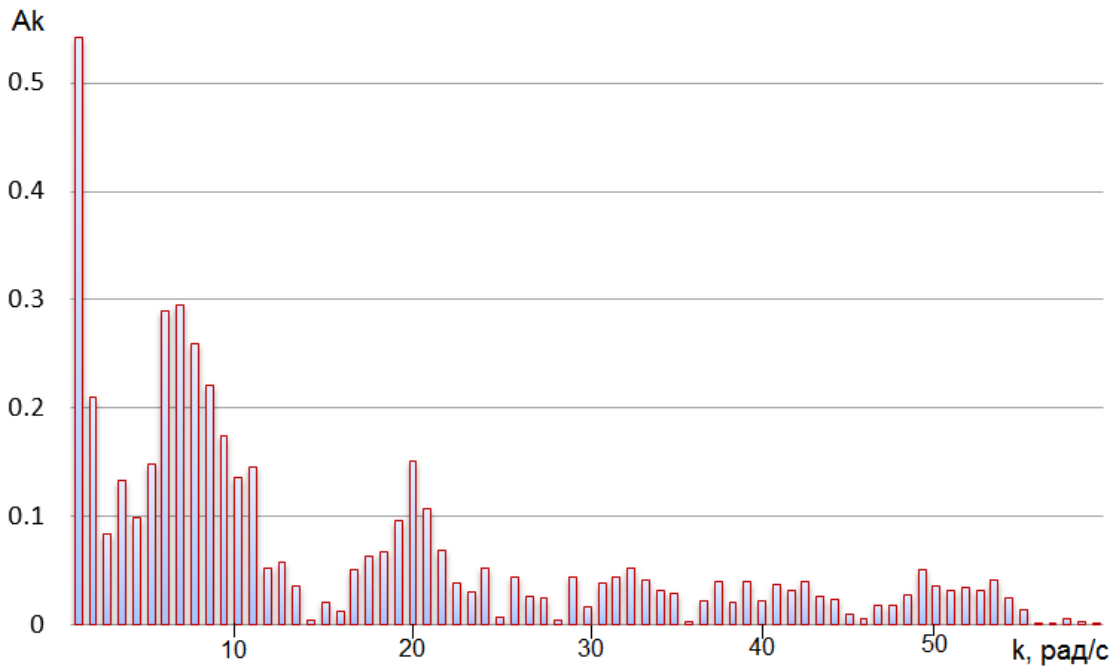


Рисунок 5.17 – Спектральная плотность распределения частот механизма линейного привода

Выводы по главе

Спроектирована система управления, позволяющая определять законы изменения управляющих сигналов, которые обеспечивают реализацию синтезированных законов изменения обобщенных координат манипулятора. Разработаны программные средства для компьютера, оператора и бортовой системы, обеспечивающие позиционирование захвата манипулятора при задании различных программных законов траектории движения, минимизирующих время достижения заданной точки.

Проведена идентификация параметров математической модели манипулятора исследованием парциальных движений. Оценены собственные частоты механизма привода и проведен спектральный анализ экспериментальных результатов, которые показали, что основной вклад в колебания привода составляют первая $6,38 \text{ с}^{-1}$ и вторая частоты $21,2 \text{ с}^{-1}$.

Приведенные расчетные и экспериментальные зависимости изменения длин звеньев манипулятора от времени при движении захвата по прямой показали, что

максимальное отклонение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 10%. Совпадение, с учетом ошибок измерений, теоретических и экспериментальных результатов может служить подтверждением практической реализуемости, исследованных законов движения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Расширена классификация пространственных механизмов параллельной структуры. Сформулированы ограничения области существования структурных схем манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода в виде аналитических и графических зависимостей.

2. Разработаны методы и алгоритмы оптимального синтеза и критерии выполнения условий существования рациональных структурных схем механизмов параллельно-последовательной структуры, позволяющие сузить границы поиска решений.

3. Разработан метод и алгоритм геометрического синтеза рациональных параметров манипуляторов параллельно-последовательной структуры на базе трипода, обеспечивающие значения показателей эффективности, сформулированных в техническом задании на выполнение погрузочно-разгрузочных работ.

4. Решена задача определения оптимальной конечной конфигурации манипулятора параллельно – последовательной структуры, для задаваемого положения захвата, нахождением локального минимума функции, характеризующей изменения длин исполнительных звеньев, с ограничениями типа равенств и неравенств, наложенных на значения обобщенных координат манипулятора.

5. Разработаны математические модели манипулятора, массы звеньев которого сосредоточены в его сочленениях, позволяющие проводить расчеты динамики пространственного управляемого движения звеньев манипулятора, на которые наложены нестационарные голономные связи.

6. Математическая модель динамики исполнительного привода с самотормозящейся передачей, учитывает податливость звеньев и необратимые потери, позволила сформулировать аналитические условия при выполнении

которых возможно возникновение неустойчивого режима работы привода при силовом и (или) динамическом заклинивании в передаче.

7. Представлены решения задач динамического синтеза программных движений исполнительных звеньев манипулятора - трипода из условия минимума ускорения захвата, позволяющих существенно снизить инерционные нагрузки на конструкцию. Получены аналитические выражения условий устойчивости оптимальных траекторий захвата. Сравнение кинематических параметров захвата, при его перемещении по синтезированной оптимальной траектории и по траектории, полученной в результате решения уравнений динамики манипулятора при изменении ускорений исполнительных звеньев по другим законам, позволило сформулировать условия рационального выбора закона перемещения захвата.

8. Проведена идентификация параметров математической модели манипулятора на основе исследования спектральных характеристик парциальных движений. Спроектирована система управления, позволяющая определять законы изменения управляющих сигналов, которые обеспечивают реализацию синтезированных законов изменения обобщенных координат манипулятора. Разработаны программные средства для компьютера, оператора и бортовой системы, обеспечивающие позиционирование захвата манипулятора при задании различных программных законов траектории движения.

9. Проведен сравнительный анализ кривых изменения координат, который показывает адекватность математической модели: переход от начальной к конечной конфигурации манипулятора выполняется при различных задаваемых законах перемещения захвата. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 10%. Совпадение, с учетом ошибок измерений, теоретических и экспериментальных результатов служит подтверждением практической реализуемости, исследованных законов движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. №1025541 СССР, МКИ³ В66Р 1/45. 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. №1221018 СССР, АВ62D63/06. Одноосный прицеп с грузоподъёмным оборудованием. / В.Л. Строков, В.И. Пындак, В.М. Герасун, Ю.Г. Лапынин, А.Ф. Рогачёв, С.Д. Фомин. Бюл. №12 от 30.03.1986.
3. А.С. №594021 СССР, МКИ В66 С23/44. Грузоподъёмный кран. В.И. Пындак, В.Л. Строков, Л.Н. Худяков. Бюл. №7 от 25.02.1978.
4. А.С. СССР №307046. Грузоподъёмный кран. МПК В66С 23/80, В60Р 1/54. /В.И. Пындак, Е.И. Соболев, В.М. Соболев. Бюл. №20. Оpubл. 21.04.1971.
5. Агеев, О.В. Принципы построения адаптивной системы управления модульной рыбоделочной линией. [Электронный ресурс] / Агеев О.В., Шлёмин А.В. // Научный журнал КубГАУ, №25(1) 2007 г. 33 с. <http://ei.kubagro.ru/2007/01/pdf/13.pdf>.
6. Акопян, А.М. К задаче динамического синтеза платформенного механизма с многокоординатным гидроприводом. / А.М. Акопян, Е.Я. Винницкий, Г.В. Крейнин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. №6. С.78-83.
7. Акулов, В.Я. Определение избыточных связей и подвижностей в механизмах. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Изд-е МВТУ им. Баумана. 1977 № 4. с. 59 – 62.
8. Алешин, А.К. Динамика движения пространственного механизма параллельной структуры с управлением по положению и скорости / А.К. Алешин, В.А. Глазунов, Г.В. Рашоян, С.А. Скворцов // В сборнике:

- Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем XVIII Международный Симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е. Кобринского. Под ред. В.К. Асташева, В.Л. Крупенина, Г.Я. Пановко, К.Б. Саламандра. 2015. - С. 8-13.
9. Альван, Х.М. Решение прямой задачи геометрии платформы Стюарта. / Альван Х.М., Слоущ А.В. // XXXI Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч.III: С.34-35. 2003 г.
 10. Альван, Х.М., Слоущ А.В. Декомпозиция задачи силового анализа многоподвижного механизма параллельной структуры. / Х.М. Альван, А.В. Слоущ // Теория механизмов и машин. – 2005. - №1. – Том.3 – С.35-39.
 11. Ананьев, А. Н. Проблемы применения роботов в сельскохозяйственном производстве. [Электронный ресурс]. Режим доступа; <http://www.cckrb.ru/news/Innovatsii-v-APK>.
 12. Андреев, В.Д. Основы проектирования следящих систем / В.Д. Андреев, А.М. Ивкин, д. т. н., проф. В.С. Кулешов и др.; Под ред. Н.А. Лакоты. - Москва: Машиностроение, 1978. - 391 с.: ил.
 13. Анискин, В.И. Перспективы технического обеспечения сельского хозяйства. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - №12. – 1999. – С.2-7.
 14. Антонссон Е., Манн Р. Автоматический сбор и анализ данных о кинематике движений с шестью степенями свободы. // Современное машиностроение, серия Б, - 1989, - №10. - С.82-92.
 15. Аракелян, В., Брио С., Глазунов В.А., Шумилов А.Н. Новые классы механизмов: параллельно-перекрёстная и параллельно-переменная структура. [Электронный ресурс] / В. Аракелян, С. Брио, В.А. Глазунов, А.Н. Шумилов // Вестник научно-технического развития. - №3(19), - 2009 г. - с.28-33. www.vntr.ru.
 16. Артеменко, Ю.Н. Использование механизмов параллельной структуры

- для взаимного позиционирования полезной нагрузки и космического аппарата. / Ю.Н.Артеменко, П.П. Белоножко, А.П. Карпенко, С.Н. Саяпин, А.А. Фоков. // Робототехника и техническая кибернетика. - №1 (1). – 2013. – с.65-71.
17. Артеменко, Ю.Н. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметр». 3. Синтез механизмов параллельной структуры для ориентации антенны космического телескопа. [Электронный ресурс] / Ю.Н. Артеменко, В.А. Глазунов, Э.Е Селиверстов, В.В. Кореновсков, С.М. Демидов. // Наука и образование. – 2013. - №5. – С.247-268. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/571127.html>
18. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учебник для вуз-зов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 640 с.
19. Артоболевский, И.И. Об одном свойстве матрицы, описывающей строение привода манипулятора. / И.И. Артоболевский, А.Г. Овакимов // Докл. АН СССР. 1976. - Т. 230. - №2.
20. Афонин В.Л. Механизмы параллельной структуры. Кинематика и динамика. М.: ИЦ МГТУ «Станкин», 2005 г., 180 с.
21. Балтаджи, С.А. Оценка точности станков-гексаподов в современном машиностроении. / С.А. Балтаджи, Ю.И. Бровкина. // Материалы III научно-образовательной конференции «Машиностроение – традиции и инновации» (МТИ-2010). Секция: «Оборудование машиностроительных производств». Сборник докладов. – М.: МГТУ «Станкин», 2010. – Стр.14-18.
22. Батенко А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Радио и связь, 1984. 160 с.
23. Бебешин Н.В. Оптимизационный структурный синтез

- пространственного механизма с низкими парами // Проектирование механизмов и динамика машин, выпуск 16. Межвузовский сборник научных трудов под ред. О.И. Кульбачного, издание ВЗМИ, М.:1982. - с. 29-34.
24. Безгласный, С.П. Построение и стабилизация программных движений неавтономных гамильтоновых систем. / С. П. Безгласный, Е. В. Куркина // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. 2011. Т. 11. Сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 3, ч. 2. С.74-80.
25. Беликов, В.А. Системы машинного зрения мобильных роботов / Беликов В.А., Жога В.В., Скакунов В.Н., Терехов С.Е., Шаманов И.В. // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 22. - Волгоград, 2014. - № 25 (152). - С. 184-190.
26. 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.
27. Белоус, И.Г. Синтез структуры и алгоритмического обеспечения управления стохастическим объектом/ Белоус И.Г., Крушель Е.Г.// Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 2. С. 78-85.
28. Белоусов, И.Р. Формирование уравнений динамики роботов-манипуляторов. Препринт ИПМ им М.В. Келдыша РАН Москва, 2002.
29. Бертсекас Д. Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа: Пер. с англ. – М.: Радио и связь. 1987. – 400 с.:ил.
30. Болотин, Ю.Н. Оптимизация конструкций и траекторий движения гидравлического манипулятора. // Известия АН СССР механики твердого тела. 1985. №5. С.31-38.

31. Болотник, Н.Н. Оптимизация управления манипуляционными роботами / Н.Н. Болотник, Ф.Л. Черноусько // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. - 1990. - № 1. - С. 189-238.
32. Болтянский, В.Г. Математические методы оптимального управления. Изд-во «Наука». М., 1966 г.
33. Бохонский, А.И. Динамика манипуляторов с абсолютно твердыми телами и деформируемыми звеньями. / А.И. Бохонский, Л.В. Барашова. // Вісник СевДТУ. Вип. 97: Механіка, енергетика, екологія: зб.наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009. – С.23-27.
34. Брайсон, А., Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. – 544 с.
35. Брио, С. Условия передачи движения в плоских манипуляторах параллельной структуры./ Брио С., Аракелян В., Глазунов В.А. // Машиностроение и инженерное образование. – 2010. – Выпуск 3.
36. Брискин, Е.С. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми двигателями/ Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.В. Чернышов, А.В. Малолетов; под ред. Е.С. Брискина. М.: Машиностроение, 2009. 192 с.: ил. – с.162 – определение законов движения.
37. Бурдаков, С.Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по спец. «Робототехнические системы» / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев. – М.: Высш. шк., 1986. – 264 с.:ил.
38. Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику. М.: «Наука». Гл. ред. физ.-мат. лит., 1971, - 264 с.
39. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Учебник, 8-е изд., стереотип. - СПб.: Лань, 2006. - 731 с.
40. Валюкевич, Ю.А. Пространственный манипулятор на основе гибких механических связей. / Ю.А. Валюкевич, О.Г. Толстунов //

- Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2009). Материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. –С.314-316.
41. Валюкевич, Ю.А. Статическая модель троса пространственного манипулятора с гибким подвесом объекта перемещения. / Ю.А. Валюкевич, В.П. Федосов, А.В. Алепко // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С.103-106.
 42. Ван Л., Равани Б. Динамическая грузоподъемность механических манипуляторов. Часть 1. // Конструирование и технология машиностроения. – 1988. - №4. – С.279-289.
 43. Ван Л., Равани Б. Динамическая грузоподъемность механических манипуляторов. Часть 2. // Конструирование и технология машиностроения. – 1988. - №4. – С.289-303.
 44. 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.
 45. Волкоморов, С.В. Оптимизация угловых и линейных размеров одно- и двухсекционного манипуляторов параллельной кинематики. [Электронный ресурс] / С.В. Волкоморов, А.П. Карпенко, А.М. Лелетко. // Наука и образование. Электронный журнал, №8, август 2010 г. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/154452.html>.
 46. Волкоморов, С.В. Планирование оптимальной целевой конфигурации робота-манипулятора типа «хобот». / С.В. Волкоморов, А.П. Карпенко. // Мехатроника, автоматизация, управление. - №8. – 2010. – С.30-35.
 47. Воробьев Е.И. Задачи синтеза механизмов роботов и манипуляторов. // Сборник научно-методических статей по теории механизмов и машин. Выпуск 7. Изд-во «Высшая школа». М.: 1978 с.22-28.
 48. Воробьев Е.И., Ермаков В.В., Усольский В.Г. Исследование динамики

- манипулятора с учетом упругости звеньев. Сб. «Проектирование механизмов и динамика машин», ВЗМИ, вып. 16, М., 1982. С.112-119.
49. Воробьева, Н.С. Об оптимальной конфигурации манипулятора-трипода / Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов, А.В. Еременко, П.В. Федченков // Материалы XXV Международной научной конференции ММТТ-25, г.Волгоград, 28 -31 мая 2012г. Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО ВолгГТУ, 2012.
50. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 376 с., ил.
51. Гаврилов, А.Е. Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями. / А.Е. Гаврилов, В.В. Жога, П.В. Федченков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – №5. – с.174–183.
52. Гапоненко, Е. В. Динамика управляемого движения робота-трипода с шестью степенями подвижности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Гапоненко Елена Владимировна – Белгород, 2014.
53. Гапоненко, Е.В. Моделирование динамики параллельного робота и оценка точности позиционирования / Е.В. Гапоненко, Л.А. Рыбак // В сборнике: Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины Сборник научных статей по материалам XI Международной научно-технической конференции: в 2 частях. Ответственный редактор С.Ф. Яцун. 2014. - С. 288-293.
54. Герасун, В.М. Изыскание и исследование навесного погрузочного манипулятора с пространственным исполнительным механизмом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Герасун Владимир Морисович - Волгоград, 1979.
55. Герасун В.М. Силовой анализ манипулятора с l -координатным исполнительным механизмом / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А.

- Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов // Прогресс транспортных средств и систем - 2013: материалы Международной научно-практической конференции, 24-26 сентября 2013 г. / ВолГТУ; редкол.: М.В.Лященко.- Волгоград, 2013. - С.316.
56. Герасун, В.М. К определению 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.
57. Герасун, В.М., Кинематическое исследование манипулятора-трипода / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: 2012. – С. 251–258.
58. Герасун, В.М. Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов / В.М. Герасун, И.А. Несмиянов // Мехатроника, автоматизация, управление. - №2. - 2010. - с.24-28.
59. Герасун, В.М. Исследование манипулятора на основе пространственного механизма параллельной структуры с четырьмя поступательными парами / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, В.А. Шурыгин // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург. – 2012. – С.81-85.
60. Герасун, В.М. Исследование оптимальных конфигураций манипулятора - трипода с поворотным основанием / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2013. - № 6. - С. 21-26.
61. Герасун, В.М. Манипуляторы для мобильных роботов. Концепции и принципы проектирования / В.М. Герасун, В.И. Пындак, И.А.

- Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов, В.Е. Павловский. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша, 2012. №44. 24 с. URL: <http://library.Keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-44>
62. 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.
63. Герасун, В.М. Опыт использования пространственных механизмов в кинематических цепях манипуляторов. / В.М. Герасун, А.Ф. Рогачев, И.А. Несмиянов // Экстремальная робототехника. Труды XXI международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис»; 2010. – с.169-172.
64. Герасун, В.М. Особенности сельскохозяйственных роботов и требования к ним. / В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, В.В. Жога // Робототехника и искусственный интеллект: матер. V всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, г. Железногорск, 15 нояб. 2013 г./ под науч. ред. В.А. Углева; Сибирский федеральный ун-т, Железногорский филиал СФУ. - Железногорск, 2013. - С. 26-28.
65. Герасун, В.М. Особые положения трипода в кинематических цепях манипуляторов. / В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов // 4-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления. Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции. Т.2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С.196-198.
66. Герасун, В.М. Силовой анализ манипулятора с l -координатным исполнительным механизмом / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, В.В. Дяшкин-Титов // Прогресс транспортных средств и систем -2013: материалы Международной научно-практической конференции, 24-26 сентября 2013 г. / ВолГТУ; редкол.: М.В. Лященко.- Волгоград, 2013.- С.316

67. 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.
68. 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.
69. Герасун, В.М., Кинематическое исследование манипулятора-трипода / В.М. Герасун, В.В. Жога, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Современное машиностроение. Наука и образование. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: 2012. – С. 251–258.
70. Глазунов, В.А. Решение обратной задачи о положении манипулятора с применением метода винтов. // Машиноведение. - №1. – 1986. – С.36-40.
71. Глазунов В.А., Колискор А.Ш. Определение положений выходного звена l – координатных механизмов. Машиноведение. - №3. – 1989. – С.49-53.
72. Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. - 96 с.
73. Глазунов, В.А. Исследование колебаний механизма параллельной структуры. / В.А. Глазунов, С.В. Хейло, А.М. Костюков // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. – Ч.2. Юго-Зап.гос.ун-т. – Курск, 2016. -С.23-28.
74. Глазунов, В.А. К анализу особых положений механизмов параллельной

- структуры. / В.А. Глазунов, Нгуен Нгок Хуэ, Нгуен Минь Тхань// Машиностроение и инженерное образование. – Вып.4. – 2009. – С.11-16.
75. Глазунов, В.А. Критерии динамического и кинематического синтеза механизмов параллельной структуры / В.А. Глазунов, А.Ю. Досегаев, С.Д. Костерева, И.И. Полойко, Г.В. Рашоян // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2009. - № 1. - С. 3-12.
76. Глазунов, В.А. Особые положения (сингулярности) механизмов параллельной структуры. / В.А. Глазунов, А.Ф. Крайнев, Р.М. Грунтович и др. // Сборник докладов международной конференции по ТМ и ММ – Краснодар: Издательство КГТУ, 2006. – с. 57-58.
77. Глазунов, В.А. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой. / В.А. Глазунов, А.Ш. Колискор, А.Ф. Крайнев, Б.И. Модель. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. - №1. – С.41-49.
78. Глазунов, В.А. Разработка манипуляционных механизмов параллельно-перекрёстной структуры. / В.А. Глазунов, С. Брио, В. Аракелян, М.М. Грунтович, Нгуен Минь Тхань. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. - №2, - 2008, - с. 100-110.
79. 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.
80. Гоменюк, С.М. Адаптивные системы управления механизмом с параллельной кинематикой типа трипод. / С.М. Гоменюк, А.П. Карпенко. // Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. - С.136 – 139.
81. Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. – М.: Физматлит, 1994. 368 с.

82. 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.
83. 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.
84. Горнов, А.Ю. Численные методы исследования задач оптимального управления в механических системах. // Мехатроника, автоматизация, управление. - №8. – 2010. – С.2-6.
85. Горобцов, А.С. Параллельное решение систем дифференциально-алгебраических уравнений большой размерности / А.С. Горобцов, В.В. Гетманский, М.В. Резников // Информационные технологии. - 2008. - № 11. - С. 55-59.
86. Горобцов, А.С. Расчетные задачи динамики систем твердых и упругих тел в программном комплексе фрунд / А.С. Горобцов, С.В. Солоденков // Машиностроение и инженерное образование. - 2008. - № 4. - С. 31-38.
87. 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.
88. Грызлов В.И., Грызлова Т.П. Турбо Паскаль 7.0. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: ДМК, 2000 – 416 с.:ил.
89. Губернаторов, А.В. Математическое моделирование манипуляторов робототехнических комплексов методом усреднения по множеству локальных линейных моделей. / А.В. Губернаторов, А.М. Казанцев. // Экстремальная робототехника. Труды международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-

- сервис», 2014. – С.187-191.
90. Данилин, П.О. Разработка и анализ механизмов параллельной структуры с групповой кинематической развязкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.18 / Данилин Павел Олегович. - Москва, - 2011 .
 91. Дворников Л.Т. Новые формализации в структуре механизмов. Известия вузов «Машиностроение», № 1, 1993 г. с. 3-8.
 92. Дворников, Л.Т. Обоснование принципов универсальной классификации механизмов // Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы научно-практической конференции. СПб: Изд-во Политехн, ун-та. -2011. С. 186-198.
 93. Дворников, Л.Т. Основы всеобщей (универсальной) классификации механизмов. // Теория механизмов и машин. – 2011 - №2. – Том 9. – с. 18-29.
 94. Дворников, Л.Т. Теория естественных геометрических связей звеньев. / Л.Т. Дворников // Известия КГТУ им. И. Раззакова. - №32. – 2014. – с. 221-224.
 95. Деграве, В.С. Особые положения плоских неассуровых структурных групп с внутренними входами.// Теория механизмов и машин. – 2006 - №2. – Том.4. – С.81-85. <http://tmm.spbstu.ru>
 96. Детали и механизмы роботов: Основы расчета, конструирования и технологии производства: Учеб. пособие / Р.С. Веселков, Т.Н. Гонтаровская, В.П. Гонтаровский и др.; Под ред. Б.Б. Самоткина. – К.: Выща шк., 1990. – 343 с.:ил.
 97. Джолдасбеков, У.А. К исследованию динамики управления роботами. / У.А. Джолдасбеков, С.А. Айсагалиев // Известия АН КазССР, физ.мат., 1985, С.74-79.
 98. Диментберг, Ф.М. Теория пространственных шарнирных механизмов. – М.: Наука, 1982. – 336 с.
 99. Динамика приводов технологических машин с самотормозящимися

- механизмами. [Текст]: монография в 5-ти частях / В.Л. Вейц, Д.В. Васильков, И.А. Гидаспов, Е.С. Шнеерсон; под общ. ред. В.Л. Вейца. – СПб.: Изд-во ПИМаш, 2002.
100. Доронин, Ф.А. Исследование кинематики пространственного механизма параллельной структуры в среде Mathcad. //Теория механизмов и машин. – 2015. - №3(27). – Том 13. – С.27-34.
101. Дубровин, А.В. Перспективные разработки некоторых инновационных робототехнических устройств автоматизации технологий птицеводства. // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С. 81-90.
102. Дьяченко, В.А. Анализ структур и функциональных возможностей манипуляционных систем космического назначения / В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2012. - № 154-2. - С. 211-218.
103. Дяшкин-Титов, В.В. Задача оптимального управления перемещением схвата манипулятора-трипода/ В.В. Дяшкин-Титов, В.Е. Павловский // Известия нижеволжского агроинженерного комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград: из-во ВолГАУ, 2014. - № 4(36). - С. 241-247.
104. 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.
105. Евграфов, А.Н. Выбор приводов многоподвижных механизмов с избыточными входами / А.Н. Евграфов, Г.Н. Петров // Современное машиностроение. Наука и образование. - 2014. - № 4. -С. 184-191.
106. 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..
107. Егоров, И.Н. Структуры систем управления платформы Стюарта пусковых установок беспилотных летательных аппаратов. / И.Н. Егоров, Хусейн Казым. Т. // Материалы 2-й Российской мультиконференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 196-198.
108. Егоров, О.Д. Структурный анализ исполнительных устройств роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2008. - №7. - С.29-33.
109. Егоров, О.Д. Структурный анализ механизмов мехатронных устройств / Вестник МГТУ «Станкин» № 2 (20), 2012. с.16-19
110. Есина, М.Г. Кинематический и силовой анализ плоских механизмов параллельной структуры с учётом особых положений и алгоритмов управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.18 / Есина Марина Геннадьевна. - Москва, 2004.
111. Ефимов, Н.В. Краткий курс аналитической геометрии. 8-е изд., стереотип. - М.: Наука, 1965. - 228 с.
112. Жавнер В.Л., Крамской Э.И. Погрузочные манипуляторы. Под ред. Проф. А.И.Колчина. Л.: «Машиностроение» (Ленинградское отд-ние), 1975. – 160 с.:ил.
113. Жавнер, В.Л. Геометрический синтез манипулятора. / Теория и устройство манипуляторов. – «Наука», 1973. – С.126-131.
114. Жавнер, В.Л. Исследование параметров обслуживаемой зоны работа параллельной структуры. / В.Л. Жавнер, К.В. Никитина // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4-2 (46). С. 91-97.
115. Жмылевская М.Л., Гришин Б.В. Мобильные и подвижные роботы, используемые в немашиностроительных отраслях: - М., ВНИИ – ТЭМР, 1991 – 280 с.

116. Жога, В.В. О программных движениях манипулятора-трипода / В.В. Жога, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов / 6-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления // Материалы мультikonференции: Изд-во ЮФУ, 2013. - Т.2. - С.146-150.
117. 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.
118. 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.
119. Зангвилл У. Нелинейное программирование. Единый подход. 1969 г. Пер.с англ., под ред. Е.Г. Гольштейна, М., «Сов. Радио», 1973, 312 с.
120. Зельдович, Я.Б. Элементы прикладной математики. / Я.Б. Зельдович, А.Д. Мышкис. М.: Наука, 1967.- 648 с.
121. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 576 с.
122. 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.
123. Иванов, В.А. Математические основы теории автоматического управления: учеб. пособие для вузов: в 3 т. / В. А. Иванов, В. С. Медведев, Б. К. Чемоданов, А. С. Ющенко ; Под. ред. Чемоданова Б. К.

- 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, Т. 2. - 2008. - 614 с. : ил.
124. Иванов, М.Н. Детали машин: Учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 5-е изд. перераб. – М.: Высш. шк., 1991. – 383 с.: ил.
125. Игнатова, Е.И. Особенности математического моделирования робототехнических систем. / Е.И. Игнатова, Д.А. Кочкарев // Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009). Материалы XX Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. - С.87-88.
126. Иосилевич, Г.Б. Прикладная механика: Для студентов вузов / Г.Б. Иосилевич, П.А. Лебедев, В.С. Стреляев. – М.: Машиностроение, 1985. – 576 с., ил.
127. Исследование телескопических грузоподъемных устройств. Отчёт по НИР.- Тема Б-667406 №ГР 75024886 /Листопад Г.Е., Строков В.Л., Пындак В.И., Герасун В.М., Худяков Л.Н./ВСХИ. – Волгоград, 1978 г. – 98 с.
128. Каганов, Ю.Т. Математическое моделирование кинематики и динамики робота-манипулятора типа «хобот». Часть 1. Математические модели секции манипулятора, как механизма параллельной кинематики типа «трипод». [Электронный ресурс]/ Ю.Т. Каганов, А.П. Карпенко. // Наука и образование. – №10. – 2009. - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/133731.html>.
129. 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.
130. Казаков А.В. Системы статической разгрузки и повышения динамической манипулятивности в механизмах параллельной

- структуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Казаков Андрей Вячеславович – Москва 2009.
131. Казым Хуссейн Т. Анализ и управление функциональным движением пространственных мехатронных систем параллельной структуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Казым Хуссейн. – Владимир, 2010 .
132. Календарев, А.В. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с четырьмя и пятью степенями свободы. / А.В. Календарев, А.Е. Лысогорский, В.А. Глазунов. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. - №3. – С.7-10.
133. Калинин, А.В. Система управления робота, выполняющего прецизионную установку тяжёлых объектов. / А.В. Калинин, В.А. Панков // Экстремальная робототехника. Нано- микро- и макророботы (ЭР-2009). Материалы XX Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – с. 210-213.
134. Каляев, А.И. Метод децентрализованного управления распределенной системой при выполнении потока заданий / А.И. Каляев, И.А. Каляев // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2015. - Т. 16. - № 9. - С. 585-598.
135. Каляев, И.А. Принципы организации реконфигурируемых информационно-управляющих систем / И.А. Каляев, Э.В. Мельник // В сборнике: Материалы конференции "управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах " Под редакцией С.Н. Васильева, И.А. Каляева, Д.А. Новикова, Г.Г. Себрякова. 2012. - С. 1230-1231.
136. Карловский, Д.А. Программа структурного анализа механизмов. / Д.А. Карловский, С.В. Вишневский, Н.С. Семенова. // Теория механизмов и машин. – 2005. - №1. – Том3. – С.67-69.
137. Карпенко, А.П. Исследование динамики многосекционного

- манипулятора типа «хобот». / А.П. Карпенко, А.М. Шмонин // Наука и образование. №9 сент. 2010 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/157912.html>.
138. Карташев В.А. Управление сборочными движениями манипуляционных систем. Автореф дисс докт ф-м н 01.02.01 – Теоретическая механика, Москва- 2000.
139. Киреев, С.О. Матричный метод оптимизации основной структурной схемы механизма. / Киреев С.О., Ковалёв В.Н. // Теория механизмов и машин. – 2004. - №2. – Том 2. – С.18-23.
140. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 343 с.
141. 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.
142. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. Учебное пособие для студентов вузов, 3-е издание. Машиностроение. – 1969.-584 с.
143. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 392 с.:ил.
144. Коли, Д. Конфигурации манипулятора, имеющего вращательно-поступательные приводы, и решение для них прямой и обратной задачи кинематики. / Д. Коли, С. Ли., К. Цай, Г. Сандор. // Современное машиностроение, серия Б. – 1989. - №7. – С.103-111.
145. Коловский М.З., Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Лит., 1988. – 240 с. - (Науч. основы робототехники).
146. Коловский, М.З. Об определении собственных частот позиционирующей платформы с упругими приводами. / М.З. Коловский, Г.Н. Петров, А.В. Слоущ // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1999. - № 5. - С. 27.

147. Коноваленко, Л.Ю. Опыт использования роботов при переработке сельскохозяйственного сырья. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 70 с.
148. Коноваленко, Л.Ю. Роботизация процессов переработки сельскохозяйственного сырья. // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С. 95-98.
149. Конструирование роботов: Пер.с франц./ Андре П., Кофман Ж.-М., Лот Ф., Тайар Ж.-П. – М.: Мир, 1986. – 360 с., ил.
150. 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.
151. 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.
152. Корендясев, А.И. Определение числа степеней свободы исполнительного органа промышленного робота. / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес // Машиноведение - № 6. - 1985 г. - с. 44-53.
153. Коровкин П.П. Математический анализ, ч.II. М., "Просвещение", 1974 – 464 с., ил.
154. Королев, В.А. Системы технического зрения для сельскохозяйственных роботов. / В.А. Королев, А.О. Панфилов, С.А. Воротников, В.А. Польский // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С. 208-212.

155. Костин, А.В. Методика определения основных электромеханических параметров прямого линейного электропривода / А.В. Костин, А.С. Мягих, Ю.В. Подураев, С.Ф. Яковлев // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2013. - № 10. - С. 27-31.
156. Красонтович, И.В. Совершенствование конструкции зарубежных колёсных погрузчиков. / И.В. Красонтович, Н.С. Канюка // Строительные и дорожные машины. - 1990. - №3. - с.12-13.
157. 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.
158. Крохмаль О.Н. Алгоритмы обработки информации и программное обеспечение для структурного анализа и синтеза рычажных кинематических цепей роботов и манипуляторов. Автореферат дисс. на соискание уч. Степени к.т.н. 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации, 05.02.18 – Теория механизмов и машин: Курган. 2011г.
159. Крутько И.Д., Попов Е.П. Кинематические алгоритмы управления движением манипуляционных роботов // Техническая кибернетика. 1979. №4.
160. Крутько П.Д., Лакота Н.А. Метод обратных задач динамики в теории конструирования алгоритмов управления манипуляционных роботов. Осуществление назначенных траекторий // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. - 1987. - № 4.
161. 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.
162. Кузнецов, Ю.Н. Создание станков нового поколения с применением генетико-морфологического подхода (Часть 1) // International Scientific

- UNITECH 10. 19-20 Nov. 2010, Gibrovo. p.p. 79-85], Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с..
163. Кузнецов Ю.Н., Кузубов В.И., Волощенко А.Б. Математическое моделирование: Учебное пособие.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.:Высшая школа, 1980 – 300 с.,ил.
164. Курдюков Р.Ю. Повышение эффективности информационно-измерительных и управляющих систем технологических машин на основе механизмов параллельной структуры. Автореф.к.т.н. 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (промышленность). Москва- 2009.
165. Кюнц Г.П., Крелле В.. Нелинейное программирование. Пер. с нем. М.: Изд-во «Советское радио», 1965 – 304 с.
166. Лакота Н.А. Основы проектирования следящих систем. М.: Машиностроение, 1978, 391 с.
167. Ловейкін В.С., Міщук Д.О. Визначення оптимальних режимів руху маніпулятора за процес пуску (гальмування) під час роботи за однею з узагальнених координат. / ГРДММ, №73, 2009. С.8.
168. Лукишов Г.И., Милосердин Ю.В. Исследование некоторых пространственных характеристик манипуляторов. Теория и устройство манипуляторов. М.: Наука, 1973 г. с.5-8.
169. Мартынюк, В. А. Решение обратной задачи динамики в механике на примере трипода. / В. А. Мартынюк, В. А. Трудоношин, В. Г. Федорук, Е. В. Федорук. // Мехатроника, автоматизация, управление. - № 3. – 2014. - С.24 – 27.
170. Макаренко, А.Н. Совершенствование и обоснование параметров малогабаритных телескопических гидроманипуляторов сельскохозяйственного назначения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Макаренко Андрей Николаевич. – Волгоград, 2003.

171. Макаров, Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2005. – 448 с.: ил.
172. Мамаев, Ю.А. Динамика движения робота-станка с параллельной кинематикой (гексапода) для окончательной обработки деталей сложной геометрии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Мамаев Юрий Александрович. – Белгород, 2014.
173. 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.
174. Мардер Б.О., Рашоян Г.В. Об особых положениях *l*-координатных механизмов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990.- №6. - С.39-43.
175. Матиясевич, Ю.В. Десятая проблема Гильберта. М.: Физматлит, 1993. – 224 с.
176. 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.
177. Механика промышленных роботов: Учеб.пособие для втузов: В 3 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.
178. Механика промышленных роботов: Учеб.пособие для вузов: В 3-х кн./ Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн.2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. – М.:Высш.шк., 1988. – 307 с.: ил.
179. 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.
180. Мохов, А.Д. Разработка математического и программного обеспечения систем управления мобильными роботами произвольной структуры с избыточными связями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Мохов Александр Дмитриевич – Волгоград, 2014.
181. Мырзагельдиева, Ж.М. Исследование механизма пространственного параллельного манипулятора с цилиндрическими кинематическими парами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.18 / Мырзагельдиева Жанат Муратбековна. - Республика Казахстан. Алматы, 2010.
182. Накано Э. Введение в робототехнику: Пер.с япон. – М.:Мир, 1988. – 334 с., ил.
183. Несмиянов И.А. Задача позиционирования манипулятора на основе пространственного исполнительного механизма – как задача оптимального синтеза / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы Международной научно-практической конференции «Интеграция науки и производства – стратегия успешного развития АПК в условиях вступления России в ВТО», г.Волгоград, 30 января -1 февраля 2013г. Том 5. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2013. – С.138-143.
184. Несмиянов, И.А. Моделирование зоны обслуживания погрузочного манипулятора / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Материалы Международной научно-практической конференции, г. Волгоград, 31 января -2 февраля 2012г. Том 3. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – С.286-290.
185. Несмиянов, И.А. Программно-аппаратный комплекс мониторинга эксплуатационно-технологических параметров погрузочного агрегата / И.А. Несмиянов, А.П. Евдокимов, В.И. Токарев, Е.Н. Захаров // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2014. -

№4 (36). - с.227-231.

186. 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.
187. Несмиянов, И.А. Тенденции, перспективы и особенности применения роботов в сельском хозяйстве. / И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева // Волгоградский ГАУ, г. Волгоград
188. Никифоров, С.О. Влияние метрики манипуляторов на погрешности позиционирования промышленных роботов. / С.О.Никифоров, Б.Е. Мархадаев. // Вестник машиностроения. – 1991 - №8. – с.29.
189. Никифоров, С.О. Применение методов дискретной математики при модульном синтезе мехатронных устройств. / С.О. Никифоров, Б.С. Никифоров, Э.Б. Мандаров, Н.М. Рабданова // Вестник Бурятского государственного университета. 2010. № 9. с. 210-217
190. Николаева А.В., Петров С.П., Мишин А.А., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором на основе генетического алгоритма // Системный анализ в науке и образовании. 2011. № 3.
191. Озол О.Г. Новая структурная формула механизмов и её теоретическое и практическое значение. // Тр.Латв. с.-х. акад. – 1962. – Вып.11. – С.113-129.
192. Павловский, В.Е. Мобильный информационный робот на гусеничном шасси. / В.Е Павловский, В.В. Евграфов, А.Н. Забегаев, А.В. Калиниченко, В.В. Павловский, Н.В. Петровская. // Экстремальная робототехника. Труды XXI Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во "Политехника-сервис", 2010.- с.103-108.

193. Пановко, Г.Я. Особенности управления движением многозвенной электромеханической системы с учетом свойств электропривода / Г.Я. Пановко, С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун // Машиностроение и инженерное образование. - 2016. - № 2 (47). - С. 2-10.
194. 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.
195. Паршева, Е.А. Робастный алгоритм управления манипуляционным роботом. / Е.А. Паршева, Ю.А. Лежнина // Материалы 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 258-261.
196. 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
197. 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.
198. Паршин, Д.Я. Структурно-параметрический синтез манипуляционных систем отделочных роботов. / Д.Я. Паршин, О.Л. Цветкова. // Материалы 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – С. 266-269.
199. Патент №2053191 РФ, МПК В66 С23/44. Кран-манипулятор. В.И.

- Пындак, А.А. Сапралиев. Оpubл. 27.01.1996 г.
200. Патент №2167804 РФ, МПК В66 С23/44. Кран-манипулятор. А.Н. Макаренко, В.И. Пындак, Ю.Г. Лапынин. Оpubл. 27.05.2001 г.
201. Патент №2207317 РФ, МПК В66 С23/44. Кран-манипулятор. В.И. Пындак, А.Н. Макаренко. Оpubл. 27.06.2003 г.
202. Патент №2231494 РФ. МПК В66 С23/04. Стрела грузоподъемного средства. В.И. Пындак, С.С. Муха, Н.В. Кривельская, С.В. Тараканов. Оpubл. 27.06.2004 г.
203. 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.
204. Патент №2400351 РФ, МПК В25J17/02. Высокоскоростной робот параллельной кинематики с четырьмя степенями подвижности. Наба Венсан, Пьерро Франсуа, Родригес Михангос Мария Де Ла О., Аскойтъя Артеге Хосе Мигель, Буэно Сабало Рикардо, Компани Оливье, Флорентино Перес Де Арменнтъя, Кармеле. Оpubл. 27.09.2010 г.
205. Патент №2424893 РФ, МПК В25J5/00, В25J13/08. Адаптивный мобильный пространственный робот-манипулятор и способ организации движений и контроля физико-механических свойств и геометрической формы контактируемой поверхности и траектории перемещения с его помощью. С.Н. Саяпин, А.В. Синев. Оpubл 27.07.2011 г.
206. 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.
207. 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 –

Опубл. 20.05.2014 г.

208. Патент на полезную модель № 88601 МПК В25О-1/00. Пространственный механизм с четырьмя степенями свободы / Глазунов В.А., Ширинкин М.А., Палочкин С.В. // Опубл. 20.11.2009; бюл. № 32.
209. Патент на полезную модель №125921 РФ, МПК В25J5/00, В62D57/00. Робот с параллельной структурой для перемещения по трубопроводам. С.Ф. Яцун, А.С. Яцун, С.И. Савин. Опубл. 20.03.2013.
210. Пейсах, Э.Е. Критерии передачи движения для рычажных механизмов. // Машиноведение. – 1986. - №1. – С.45-51.
211. Пейсах, Э.Е. Структурный синтез замкнутых кинематических цепей (цепей Грюблера) Часть 2. // Теория механизмов и машин. - 2008. - Том 6. - № 2(12). - С. 3-17.
212. Погорелов, Д.Ю. Моделирование динамики систем тел с использованием ПК «универсальный механизм»: текущее состояние и перспективы развития // В сборнике: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник докладов. Составители: Д.Ю. Ахметов, А.Н. Герасимов, Ш.М. Хайдаров; ответственные редакторы: Д.А. Губайдуллин, А.И. Елизаров, Е.К. Липачев. 2015. - С. 3027-3029.
213. Подзоров, П.В. Синтез механизмов параллельной кинематики на основе структурного анализа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Подзоров Павел Викторович. – М., 2003.
214. Подураев, Ю.В. Разработка манипулятора с параллельной архитектурой для прецизионной микроробототехнической системы / Ю.В. Подураев, И.Ю. Гапонов, Х.Ч. Чхо // Вестник МГТУ Станкин. - 2011. - Т. 2. - № 4. - С. 161-166.
215. Пожбелко, В.И. Структурный анализ и синтез плоских механизмов заданного уровня сложности по универсальной структурной таблице стандартных кодов строения. // Теория механизмов и машин. 2012. №1.

Том 10. С.24-45. <http://tmm.spbstu.ru>

216. Попов, С.А. Курсовое проектирование по теории механизмов и механике машин: Учебное пособие для вузов. / С.А. Попов, Г.А. Тимофеев; Под редакцией К.В. Фролова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 411 с.: ил.
217. Попов, Д.Н. Машиностроение / Д.Н. Попов, В.К. Асташев. Энциклопедия. Т. IV 2. Электропривод. Гидро- и виброприводы. В 2 х кн. Кн. 1. Электропривод. Москва, 2012.
218. Приходько, А.А. Структурный синтез перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Вестник Донского государственного технического университета. - 2015. - Т. 15. - № 4 (83). - С. 69-75.
219. 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).
220. Промышленная робототехника / А.В. Бабич, А.Г. Баранов, И.В. Калабин и др. Под ред. Я.А. Шифрина. – М.: Машиностроение, 1982 – 415 с., ил.
221. 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.
222. 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.
223. Публичный аналитический доклад по развитию новых производственных технологий. Сколковский Институт Науки и Технологий. Сколтех, ОКТЯБРЬ 2014. Режим доступа: isicad.ru/ru/pdf/ReportSkolkovo2014.pdf
224. 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.
225. 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.
226. 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.
227. 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.
228. Разоренов, Г.Н. Метод синтеза законов «мягкого» и «сверхмягкого» управления конечным состоянием динамических систем. // Мехатроника, автоматизация, управление. - №4. – 2011. – С.2-11.
229. Рашоян, Г.В. Кинематический анализ пространственного механизма параллельной структуры с круговой направляющей / Г.В. Рашоян, А.Б. Ласточкин, В.А. Глазунов // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2014. - № 2. - С. 20-26.
230. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Кн.1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986 – 352 с., ил.
231. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Кн.2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986 – 320 с., ил.
232. Робототехнические системы и комплексы: Учеб.пособие для вузов / И.И. Мачульский, В.П. Запятой, Ю.П. Майоров и др.; Под ред. И.И. Мачульского. М.: Транспорт, 1999. 446 с.
233. 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.
234. Романцев, А.А. К определению положений звеньев пространственных механизмов. // Теория механизмов и машин. – 2008 - №2. – Том.6. – С.48-59. <http://tmm.spbstu.ru>
235. Рыбак, Л.А. Инновационное обрабатывающее оборудование на базе параллельных структур: перспективы и направления коммерциализации [Текст]/ Л.А. Рыбак, Г.П. Гриненко // Научно-технические проблемы машиностроения. – 2013. – №7(25). – С. 32-39.
236. Рыбак, Л.А. Робастное управление виброзащитной роботизированной платформой. / Л.А. Рыбак, А.А. Гунькин. // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. – Ч.2. Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – С.55-64.
237. Рыбак, Л.А. Синтез законов управления движением роботизированной платформы / Л.А. Рыбак., А.В. Чичварин // В сборнике: Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем XVIII Международный Симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е. Кобринского. Под ред. В.К. Асташева, В.Л. Крупенина, Г.Я. Пановко, К.Б. Саламандра. 2015. - С. 255-262.
238. 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.
239. Рыбак, Л.А. Структурный синтез класса параллельных механизмов для роботов на основе теории винтов и виртуальных кинематических цепей. / Л.А. Рыбак, А.В. Чичварин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2012. - № 2. - С. 83-86.

240. Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Структурный анализ механизмов. // Теория механизмов и машин. 2003. №2. С.3-14.
241. Синёв А.В., Градецкий В.Г., Ерохина Т.В. Движение механизма трипода. // Доклады участников симпозиума по робототехнике и мехатронике. 4-6 ноября 2008 г. Москва, ВВЦ, пав. №69. С.124-128
242. Сироткин Р.О. Экспериментальное исследование статических и динамических свойств механизма параллельной структуры на примере несущей системы станка-гексапода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.11, 05.02.18 / Сироткин Ростислав Олегович. – Москва, 2008.
243. Скляренко, Е. Г. Оптимизация кинематических параметров параллельного механизма с двумя степенями подвижности [Электронный ресурс] / Е. Г. Скляренко // Электромашинобуд. та електрообладн.. - 2006. - Вип. 66. - С. 250-251. - Библиогр.: 2 назв. - рус.
244. Скляренко Е. Г. Применение современных методов и инструментов быстрого прототипирования систем управления роботов [Электронный ресурс] / Е. Г. Скляренко // Электромашинобуд. та електрообладн.. - 2005. - Вип. 63. – С.49-52. - Библиогр.: 7 назв. - рус.
245. Смелягин, А.И. Структурный синтез роботов и манипуляторов // Вестник научно-технического развития. №6 (34). 2010. С.27-30. www.vntr.ru
246. Смелягин, А.И. Структурный и параметрический синтез рычажно-винтового исполнительного механизма виброперемешивающего устройства / А.И. Смелягин, И.В. Юхневич // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2013. - Т. 15. - № 4-2. С. - 542-546.
247. Смирнов, В.А. Математическая модель трехкоординатного манипулятора с параллельной кинематической структурой. / В.А. Смирнов, М.М. Тверской // Вестник ЮУрГУ. - №14. – 2005. – с.18-22.
248. Смирнов, В.А. Формирование траекторий в механизмах с параллельной

- кинематической структурой. / В.А. Смирнов, Л.Н. Петрова, В.Б. Федоров // Вестник ЮУрГУ. - №11. – 2006. – с.24-29.
249. Смородов, А.В. Анализ и синтез манипуляционных роботов с механизмами параллельной структуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Смородов Андрей Владимирович. – Санкт-Петербург, 2004.
250. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Концепции и применение: Учеб.пособие. – 2-е изд., перераб.и доп. – К.: Выща шк., 1991. – 311 с.: ил.
251. Стапанов, А.В. Разработка методов структурного синтеза механизмов с применением компьютерных технологий: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.18 / Степанов Александр Васильевич. – Новосибирск, 2013.
252. Степанов А.В. О современном уровне компьютерного решения задач структурного синтеза механизмов // Теория механизмов и машин. 2011. №1. Том 9. С.25-32.
253. Стребков, Д.С.. К вопросу управления мобильными агророботами. / Д.С. Стребков А.М. Башилов, В.А. Королев // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С.28-31.
254. Строков В.Л., Герасун В.М., Пындак В.И. Методические указания к расчету и конструированию навесных погрузочных манипуляторов. Волгоград. – 1982.- 32 с.
255. Стругинский, В.Б. Анализ возможностей использования гидроприводных механизмов параллельной кинематики в станках. / В.Б. Стругинский, В.Н. Тихоненко // Труды Одесского политехнического университета, 2008. - Вып.2 (30). - С.11-16.
256. Судник, Ю.А. Роботизированная косилка на базе универсального сельскохозяйственного робота. / Ю.А. Судник, Д.В. Анашин //

- Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С.271-274.
257. Судник, Ю.А. Робототехническая система для сортирования яблок. / Ю.А. Судник, С.В. Журавлев // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С.32-34.
258. Теоретическая механика в примерах и задачах, т. III (специальные главы механики), Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С., под редакцией Г.Ю. Джанелидзе и Д.Р. Маркина, учебное пособие, М. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». 1973., 488 с.
259. Теория механизмов и машин: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.З. Коловский, А.Н. Евграфов, Ю.А. Семёнов, А.В. Слоущ. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.
260. 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.
261. Тертычный-Даури В.Ю. Галамех: в 4-х томах. Т.1. Адаптивная механика. – -: Издательство физико-математической литературы, 2008. – 544 с.
262. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы. – Л.: Машиностроение. Ленингр.отд-ние, 1988. – 332 с.: ил.
263. Толстунов, О.Г. Обоснование структуры и кинематических параметров параллельно-последовательного манипулятора с гибкими звеньями: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Толстунов Олег Глебович. – Шахты, 2015.
264. Толстунов, О.Г. Исследование величины зоны обслуживания

- пространственного манипулятора с гибким подвесом объекта перемещения с учётом ограничения прочности элементов его конструкции. / О.Г. Толстунов, Ю.А. Валюкевич, В.П. Федосов. //Материалы 7-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление» - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 388-391.
265. 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.
266. Троицкий В.А. Некоторые задачи оптимизации движения манипуляторов. // Машиноведение. - №6. – 1988. – с.31-38.
267. Тулешов А.К., Ожикенов К.А. Анализ динамики следящего привода манипулятора // Известия НАН РК. Раздел механики и машиностроения. №3(271). 2010. С. 91-95.
268. Тулешов А.К., Ожикенов К.А. Динамика манипулятора на основе пятизвенного механизма замкнутой цепи // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 1. - Труды I международного симпозиума. - М.: РАН, 2010. С. 223-228.
269. Турлапов В.Е. Решение задач кинематики для платформы Стюарта методом группы нулевого порядка // Электрон. ж. "Прикладная геометрия". Вып.4. №5. МАИ. март 2002г. С.23-40. (<http://www.mai.ru/~arg/>)
270. Тывес, Л.И. Особенности регулярных робототехнических структур с цикловым управлением. / Л.И. Тывес, А.П. Сонин //Машиноведение. – 1986. - №1. – с.9-18.
271. Фалалеева Р.В. Современные методы анализа механизмов манипулятора. // Вестник КрасГАУ. – 2008. - №3. – С.271-275.
272. Фалалеева, Р.В. Основные задачи механики управления манипулятором.

- / Р.В. Фалалеева, И.В. Паневин. // Вестник КрасГАУ. – 2008. - №4. – С.227-231.
273. Фаронов В.В. Турбо Паскаль 7.0. Практика программирования. Учебное пособие. Издание 7-е, переработанное. – М.: «Нолидж», издатель Молгачева С.В., 2001. – 416 с.:ил.
274. Фатуев, А.Е. Электроцилиндры – альтернатива гидроприводу / А.Е. Фатуев, В.А. Жук // Строительные и дорожные машины. - №4. – 2009. – С.24-26.
275. Фатыхов, Ю.А. Подход к построению системы автоматического управления рабочими органами разделочно-филеровочного оборудования (Часть 1. Моделирование цифрового следящего привода) [Электронный ресурс]. / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, А.В. Шлемин, О.П. Пономарев. // Научный журнал КубГАУ. - №34(10). – 2007. – с.21. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2007/10/pdf/15.pdf>.
276. Фатыхов, Ю.А. Подход к построению системы автоматического управления рабочими органами разделочно-филеровочного оборудования (Часть 2. Реализация прямого цифрового управления шаговым приводом) [Электронный ресурс]. / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, А.В. Шлемин, О.П. Пономарев // Научный журнал КубГАУ. - №34(10). – 2007. – с.22. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2007/10/pdf/16.pdf>.
277. Фирас А. Рахим. Методы построения интеллектуальных систем планирования и управления перемещением робота-манипулятора в неизвестной среде. Автореф. Дисс. К т н. 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы. Новочеркасск – 2009 г.
278. 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.

279. Хейло С.В., Глазунов В.А., Во Динь Тунг. Решение задачи о скоростях и особых положениях сферического манипулятора параллельной структуры. // Машиностроение и инженерное образование. – Вып.№1. – 2011. –С.29-33.
280. Хейло С.В., Глазунов В.А., Палочкин С.В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ. М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина.2011.153 с.
281. Хейло, С.В. Разработка научных основ создания Манипуляционных механизмов параллельной структуры для робототехнических систем предприятий текстильной и легкой промышленности: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.13 / Хейло Сергей Валерьевич. – М., 2014.
282. Хростицкий, А. А. Особенности структуры и геометрии пространственного шестизвенного механизма с избыточными связями / А.А. Хростицкий, В.А. Терешин //Современное машиностроение. – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2011. с. 399 - 409.
283. Цариченко С.Г., Молчанов В.П. Проблемы развития экстремальной робототехники в рамках инновационной деятельности МЧС России /Экстремальная робототехника// Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис», 2012. 514с.
284. 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.
285. Цой, Ю.А. Обоснование технико-технологических требований к роботизированным системам удаление навоза. / Ю.А. Цой, С.Е. Сенькевич, Д.Ю. Павкин, С.В. Петухов // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского

- госагроуниверситета, 2014. С.119-123.
286. Цой, Ю.А.. Общие проблемы роботизации в молочном животноводстве. / Ю.А. Цой, С.Е. Сенькевич, Д.Ю. Павкин // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: матер. Междунар. науч. практ. конф. 10–12 ноября 2014 года. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского госагроуниверситета, 2014. С.114-116.
287. Цыкунов, А.М. Субоптимальное децентрализованное робастное управление линейным объектом // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 1. С. 78-88.
288. Чен, Гупта. Проектирование механизмов с помощью различных вариантов метода наименьших квадратов с ограничениями. Современное машиностроение. Серия Б. № 7. 1989. М.: Изд-во «Мир». Пер. с англ. с. 127-132.
289. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы. М.: Наука, 1989
290. Черноусько, Ф.Л. Динамика и управление локомоциями мобильных роботов / Ф.Л. Черноусько, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий // В сборнике: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник докладов. Составители: Д.Ю. Ахметов, А.Н. Герасимов, Ш.М. Хайдаров; ответственные редакторы: Д.А. Губайдуллин, А.И. Елизаров, Е.К. Липачев. 2015. - С. 4061-4063.
291. Чистяков А.Ю. Роботизированные системы с механизмами параллельной структуры на основе подвесных платформ. Автореферат дисс.канд.техн.наук 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы. Санкт-Петербург, 2006.
292. Чупров С.Г., Иванов А.А. Моделирование динамики двухприводного сервопривода с эффектом самоторможения // Экстремальная робототехника: сб. докл. всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург,

- 25-26 сент. 2012 г. / ЦНИИ робототехники и техн. кибернетики, С.-Петербург. гос. политехн. ун-т. - СПб., 2012. - С. 225-231.
293. Шахинпур М. Курс робототехники. Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527 с., ил.
294. Швандт, А. Исследование возможностей промышленного манипуляционного робота при выполнении сложных технологических операций. / А. Швандт, А.С. Ющенко. // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды. Труды 7-го международного симпозиума. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис». 2013. – С.189-194.
295. Шипилевский Г.Б., Викторов А.И. Автоматизация мобильных сельскохозяйственных агрегатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - №3. - 2001. - С.28-29.
296. Ширинкин, М.А. Исследование подвижностей в механизмах параллельной структуры. / М.А. Ширинкин, В.А. Глазунов, С.В. Палочкин, С.В. Хейло // XXII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2010) «Будущее машиностроение России»: сборник материалов конференции. М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2010. – С.60.
297. Ширинкин, М.А. Структурный анализ пространственных механизмов параллельной структуры с четырьмя и шестью степенями свободы. // Машиностроение и инженерное образование. – Вып.2. – 2011.-с.17-21.
298. Ширяев, В.И. Об управлении манипуляционным роботом в условиях неопределенности. / В.И. Ширяев, А.А. Брагина. // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды. Труды 7-го международного симпозиума. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис». 2013. – С.134-138.
299. Шоланов, К. С. Синтез кинематической схемы и решение задачи позиционирования нового параллельного манипулятора. //

- Мехатроника, автоматизация, управление. - № 11. – 2014. – С.44-50.
300. Юревич Е.И. Основы робототехники: учебное пособие для вузов. -3-е изд. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. 359 с.: ил., табл. + CD.
301. 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.
302. 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.
303. 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.
304. 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.
305. Яковлев, К.С. Методы построения множества альтернативных путей на плоскости, основанный на декомпозиционном подходе к задаче планирования траектории. / К.С. Яковлев, И.В. Храмоин, Е.С. Баскин. // Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды. Труды 7-го международного симпозиума. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника-сервис». 2013. – С.436-444.
306. Яцун, С.Ф. Кинематический анализ экзоскелета в процессе подъема груза / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, Г.В. Климов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. - 2015. - № 3 (16). - С. 24-30.
307. Akbas, A. Intelligent predictive control of a 6-DOF robotic manipulator with

- reliability based performance improvement, Proceeding of the 6th International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning, LNCS, Vol.3578, pp.272-279, Brisbane, Australia, July 2005, Springer.
308. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms. Mechanical engineering series. 4th Edition. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 546 p.
309. Arakelian V., Briot S., Glazuinov V. Singular Positions of a Paminsa Parallel Manipulator. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. No 1. pp.62-69. Allerion Press. Inc., 2006.
310. Arakelian Vigen, Briot Sebastien, Glazuinov Victor. Improvement of functional performance of spatial parallel manipulators using mechanisms of variable structure. 12th IFToMM World Congress, Besancon (France), June 18-21, 2007.
311. Arakelian Vigen, Briot Sebastien, Glazuinov Victor. Increase of singularity-free zones in the workspace of parallel manipulators using mechanisms of variable structure. Mechanism and Machine Theory. – 43. – 2008. – pp.1129-1140.
312. Bonev Ilian A., Briot Sébastien, Wenger Philippe and Chablat Damien. Changing Assembly Modes without Passing Parallel Singularities in Non-Cuspidal 3-RPR Planar Parallel Robots. // Draft for the 2nd Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. P.p. 1-6.
313. Bonev Ilian Alexandrov. Geometric analysis of parallel mechanisms. University Laval Quebec Press. 2002.
314. 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.

315. Budny E., Chłosta M., Gutkowski W. „Experiment on a stable motion of the backhoe excavator bucket”. Proceedings of the 18th ISARC Conference, Krakow, Poland., 2001.
316. Carbone G., Marini G., Ceccarelli M., "Experimental Validation and Tests of Operation Characteristics of a Parallel-Serial Manipulator", 14th CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators Ro. Man. Sy.'2002, Udine, 2002, Preprints CD, pp. 331-338.
317. Ceccarelli M. Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulators. - Kluwer Academic Publishers, 2004. – 412 p.
318. Ceccarelli M., “A New 3 dof Spatial Parallel Mechanism”, Mechanism and Machine Theory, Vol.32, No.8, pp. 895-902, 1997.
319. Ceccarelli M., Figliolini G., “Mechanical Characteristics of CaPaMan (Cassino Parallel Manipulator)”, Proceedings of 3rd Asian Conference on Robotics and its Application, Tokyo, pp.301-308, 1997.
320. Chen, W.J., Zhao, M.Y., Zhou, J.P., and Qin, Y.F. 2002. A 2T-2R, 4DOF Parallel Manipulator. In CD-ROM Proceedings, 2002 ASME DETC/CIE, Montreal, Canada, DETC2002/MECH-34303.
321. Cheng Hui, Gupta K.C. Design of Mechanisms Via Constrained Least-Squares Method and Its Variants/Transactions of The ASME. The American Society of Mechanical Engineers. 1988 № 7 pp. 127-132/
322. Claver, R. 1988. DELTA, A Fast Robot with Parallel Geometry. In Proc. 18th Int. Symposium on Industrial Robot, Lausanne, pp. 91-100.
323. Dolga V., Dolga L. The Structural synthesis of Parallel Robots. ISSN 1392-1207. MECHANICA. 2011. Vol.17(3), pp.288-295.
324. Dutta Ashish. Robotic Systems – Applications, Control and Programming. Edited by Ashish Dutta, ISBN 978-953-307-941-7, 638 pages, Publisher: InTech, Chapters published February 03, 2012 under CC BY 3.0 license.
325. Fang Yuefa, Tsai Lung-Wen. Structure Synthesis of a Class of 4-Dof and 5-Dof Parallel Manipulators with Identical Limb Structures. The International

- Jornal of Robotic Research Vol. 21, No 9, September 2002, pp. 799-810.
326. Fattah A., Hasan Ghasemi A.M. Isotropic Design of Spatial Parallel Manipulators. THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH / September 2002. Pp. 811-824.
 327. 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.
 328. Gogu G. Structural and Kinematic Analysis and Synthesis of Parallel Robots SSIR – Clermont-Ferrand-June 27, 2008.
 329. Gogu, G. Structural Synthesis of Parallel Robots, Part 1: Methodology, Springer, Dordrecht, 2008. – 716 p.
 330. Gogu, G. Structural Synthesis of Parallel Robots, Part 2: Topologies, Springer, Dordrecht, 2008. – 650 p.
 331. Goselin C., Angeles J. The optimum kinematic design of a planar three-degree-of-freedom parallel manipulators. ASME Journal of Mechanism, Transmission, and Automation in Design, vol.110, pp. 35-41, 1988.
 332. Gosselin, C., and Angeles, J. The Optimum Kinematic Design of a Spherical Three-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator. ASME Transactions, Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design 111(2): 1989. pp. 202-207.
 333. Gradetsky V. Wall climbing Robot: Evolution to Intelligent Autonomous vehicle // Proc. of the First Int. Symp. on Mobile, Climbing walking Robots, CLAWAR'98, Brussele, Belgian, 1998., pp.53-60.
 334. 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.
 335. Han-Pang Huang and N. Harris McClamroch. Nime-Optimal Control for a Robotic Contour Following Problem. Center for Research on Intergrated Manufacturing. Cledge of Engineering The University of Michigan. Ann

- Arbor, Michigan 48109-1109. Oktober, 1986. P.37.
336. 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.
337. Hu Ying Yao. Parallel kinematic robot mechanism analysis and synthesis. BULLETIN OF ADVANCED TECHNOLOGY RESEARCH. Vol. 3 No.7 / Jul. 2009. Pp. 6-10.
338. Huynh P., Arai T., Koyachi N., Sendai T.. Optimal Velocity Based Control of a Parallel Manipulator with Fixed Linear Actuators. Proc.IROS 97. IEEE 0-7803-4119-8/97. pp.1125-1130.
339. Jagdish M. Prajapati et al. Synthesis of Parallel Mechanism Based Robot Manipulators from Structural Point of View / International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)/ Vol.3 No.2 Feb.2011. p.p.1228-1232.
340. Kim Jongwon, Frank Park Chongwoo, Ryu Sun Joong, Kim Jinwook, Hwang Jae Chul, Park Changbeon and Iurascu Cornel C.. Design and Analysis of a Redundantly Actuated Parallel Mechanism for Rapid Machining. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No.4, August 2001. pp.423-434.
341. Klevetov Denis. Modeling Workspace of Planar Parallel Kinematics Machines with 2 Degrees of Freedom. The Third International Conference “Problems of Cybernetics and Informatics” September 6-8, 2010, Baku, Azerbaijan. Section #5 “Control and Optimization”. Pp.174-177/ www.pci2010.science.az/5/49.pdf
342. Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. – Springer, 2007. – 275 p.
343. Kong X., Gosselin C.. Generation of parallel manipulators witch three translational degrees of freedom based on screw theory. Proceedings of 2001 CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines and Mechatronics. Saint-

- Hubert, Montreal, Canada. 2001
344. Kong Xianwen. Type Synthesis and Kinematics of General and Analytic Parallel Mechanisms. These presentec a la Faculte des etudes superieures de Universite Laval pour lobtention du grade de ph.D. Quebec, 2003.
 345. Kuen Yiu. Geometry, Dynamics and Control of Parallel Manipulators. A Thesis Submitted to The Hong Kong University of Science and Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Electronic Engineering. Hong Kong, August, 2002. Pp.215/
 346. Kung Y.S. and Shu G.S. "Design and Implementation of a Control IC for Vertical Articulated Robot Arm using SOPC Technology," 2005 IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 532-536, July 10-12, 2005. (Taipei, Taiwan).
 347. 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).
 348. Li Yangmin, Xu Qingsong. Kinematic analysis of a 3-PRS parallel manipulator. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 23 (2007). Pp. 395–408.
 349. Liu G.F., Wu Y.L., Wu X.Z. and Li Z.X. Analysis and control of redundant parallel manipulators. In International Conference on Robotics and Automation, Korea, pp.3748-3754, 2001.
 350. Liu Guanfeng, Lou Yunjiang, and Li Zexiang. Singularities of Parallel Manipulators: A Geometric Treatment. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL. 19, NO. 4, AUGUST 2003 p.p. 579-594.
 351. Maher G. Mohamed and Clément M. Gosselin. Design and Analysis of Kinematically Redundant Parallel Manipulators With Configurable

- Platforms. IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 21, NO. 3, JUNE 2005. Pp. 277-287.
352. Merlet J.P. Parallel Robots. - Kluwer Academic Publishers, 2006. – 417 p.
353. Merlet J.P. Parallel Robots. Solid mechanics and its applications. – Merlet Kluwer Academic Publishers, V.74, 2000. – 394 p.
354. Nabil Simaan. Analysis and Synthesis of Parallel Robots for Medical Applications. Research thesis Submitted in partial fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Submitted to the Senate of the Technion-Israel Institute of Technology. Haifa, July, 1999 pp. 163.
355. 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.
356. On-Line Robotic Trajectory Control Based on Spline Interpolation. Stewart N.F. // INFOF, 1985, 23 #2. pp.159-170.
357. 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.
358. Özgören M.K., «Kinematic analysis of spatial mechanisms using exponential rotation matrices» Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Oulu Finland, 1999.
359. Özgören M.K., «Topological analysis of 6-joint serial manipulators and their inverse kinematic solutions», Mechanism and Machine Theory, volume 37, pages 511-547, 2002.
360. Pandilov Zoran, Dukovski Vladimir. Parallel Kinematics Machine Tools: Overview-From History to The Future. Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering. Tome X (Year 2012) – Fascicule 2 (ISSN 1584-2665). Pp. 111-117.

361. Parallel mechanisms information center [Электронный ресурс].
<http://www.pallemic.org>.
362. Pashkevich A., Chablat D., Wenger P. Kinematics and Workspace Analysis of a Three-Axis Parallel Manipulator: the Orthoglide. *Robotica* 24(1) Volume 24 Issue 1, January 2006. Pages 39 – 49.
363. Patent US #4732525 B25J 9/14. Robot. Karl-Erik Neumann, Sweden. Mar.22, 1988.
364. Patent US #4872363 G05G 11/00. Electric Positioning Apparatus. Doy Rosenthal, Israel. Oct.10,1989.
365. Patent US #5114300 B25J 17/02. Robotic Apparatus. Mohsen Shahinpoor, Bradford I. Smith. Wovenwire Corporation, Santa Fe, N.Mex. May.19, 1992
366. Patent US #6231851 B1 A01B 59/04. Hitch Mechanism for coupling implements to Δ vehicle. Heinz Weiss, Gerd Bernhardt, Mario Wünsche, Sergiy Fedotov. Deere & Company, Moline IL. Nov. 27, 2001
367. Patent US#4645084 E21C 5/00. RobotArm. Robert F.Deike. Construction Robotics, Inc., Chicago. Feb.24,1987.
368. Path Tracking Control of Lagrange System with Obstacle Avoidance. Kazunori Sakurama and Kazushi Nakano, vol.10, no.1, pp.50-60, February 2012
369. Patrick Huynh, Tatsuo Arai, Noriho Koyachi, Tomokazu Sendai. Optimal Velocity Based Control of a Parallel Manipulator with Fixed Linear Actuators. *Proc.IROS 97*. IEEE 0-7803-4119-8/97. pp.1125-1130.
370. Pedersen S. M., Fountas S. and Blackmore S. (2008). *Agricultural Robots — Applications and Economic Perspectives*, *Service Robot Applications*, Yoshihiko Takahashi (Ed.), ISBN: 978-953-7619-00-8, InTech, Available from:
http://www.intechopen.com/books/service_robot_applications/agricultural_robots_-_applications_and_economic_perspectives
371. Robust microprocessor control of robot manipulators. Spong Mark W., Thorp

- James S., Kleinwaks Jeffrey M., "Automatica". 1987, 23 #3. Pp.373-379.
372. Rybak L.A. COMPUTER-AIDED MODELING OF DYNAMICS OF MANIPULATOR-TRIPOD WITH SIX DEGREE OF FREEDOM. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Chichvarin A.V., Strutinsky V.B., Sidorenko R.A. World Applied Sciences Journal. 2013. T. 25. № 2. C. 341-346.
373. Sabbavarapu Ramana Babu, Vegesina Ramachandra Raju Koonna Ramji. DESIGN FOR OPTIMAL PERFORMANCE OF 3-RPS PARALLEL MANIPULATOR USING EVOLUTIONARY ALGORITHMS. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 37, No. 2, 2013 135-160.
374. Sakurama Kazunori and Nakano Kazushi. Path Tracking Control of Lagrange System with Obstacle Avoidance., February 2012, vol.10, no.1, pp.50-60.
375. Stewart D. A platform with six degrees of freedom // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. London. 1965. V.180, Part 1. #15. pp.371-386.
376. 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.
377. Visual Basic 6.0. Пер. с англ. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 992 с.:ил. Microsoft Press. Руководство пользователя.
378. Wang, J., and Gosselin, C.M. 1988. Kinematic Analysis and Singularity Loci of Spatial Four-Degree-of-Freedom Parallel Manipulators Using a Vector Formulation. ASME Transactions, Journal of Mechanical Design 120(4): pp.555-558.
379. Wang, J., and Gosselin, C.M. 1997. Kinematic Analysis and Singularity Representation of Spatial Five-Degree-of-Freedom Parallel Mechanisms. Journal of Robotic Systems 14(12): pp. 851-869.
380. Wu Jinbo and Yin Zhouping. A Novel 4-DOF Parallel Manipulator H4.. Source: Parallel Manipulators, Towards New Applications, Book edited by:

- Huapeng Wu, April 2008, I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria.
pp. 405-448
381. Xiao-Shan Gao, Deli Lei, Qizheng Liao and Gui-Fang Zhang. Generalized Stewart-Gough Platforms and Their Direct Kinematics. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.21, No2., April. 2005. pp.141-151.
382. Xue-Mei Niu, Guo-Qin Gao, Xin-Jun Liu, Zhi-Da Bao. Dynamics and Control of a Novel 3-DOF Parallel Manipulator with Actuation Redundancy. *International Journal of Automation and Computing* 10(6), December 2013, pp. 552-562. DOI: 10.1007/s11633-013-0753-6.
383. Yan Jin ; Sch. of Mechanical & Production Eng., Nanyang Technol. Univ., Singapore ; I-Ming Chen ; Guilin Yang Structure Synthesis and Singularity Analysis of a Parallel Manipulator Based on Selective Actuation Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on (Volume:5) 26 April-1 May 2004 Page(s): 4533 - 4538 Vol.5
384. Zaidie Abdul Majid M., Huang Zhen, Yao Y. Lawrence. WORKSPACE ANALYSIS OF A NEW PARALLEL MANIPULATOR. Department of Mechanical Engineering Columbia University. New York, NY 10027. Transactions of NAMRI/SME. Volume XXVII, 1999 pp. 305-310.
385. Zhang Guoqing, Du Jianjun. Calibration and mechanical error analysis of a parallel manipulator used for precise assembly. *Journal of Harbin Institute of Technology*. Vol. 45. - #2. Feb. 2013. Pp. 47-52.
386. Zhang, D., and Gosselin, C.M. 2001. Kinetostatic Modeling of N-DoF Parallel Mechanisms with a Passive Constraining Leg and Prismatic Actuators. *ASME Transactions, Journal of Mechanical Design* 123(3): pp.375-381.
387. 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.

388. Zhoga V.V. Dynamic Creation of the Optimum Program Motion of a Manipulator-Tripod / V.V. Zhoga, V.M. Gerasun, I.A. Nesmiyanov, N.S. Vorob'eva, V.V. Dyashkin-Titov // Journal of Machinery Manufacture and Reability, 2015, Vol. 44, No. 2, pp. 181-186.
389. Zlatanov, D., and Gosselin, C.M. 2001. A Family of New Parallel Architectures with Four Degrees of Freedom. Journal of Computational Kinematics, F.C.Park and C.C. Iurascu, eds., pp.57-66.
390. <http://agroprodmash.unipack.ru/publication/52559/>
391. <http://kernow.curtin.edu.au/www/Agrirobot1/oracle.htm>
392. <http://robocraft.ru/>
393. <http://roboting.ru/industrial-robots/>
394. <http://www.codian-robotics.com/>
395. <http://www.robo geek.ru/companies>
396. <http://www.servomh.ru/>
397. <http://www.skf.com/ru/index.html>
398. <https://www.festo.com/group/ru/cms/index.htm>

**Значения основных параметров структурного строения манипуляторов
параллельно-последовательной структуры на основе трипода
(к схемам табл.2.1)**

Схема (№)	W	m_0	n_{min}	Σp_{imin}	Сравнение	$n_{min}+W$
1	2	0	5	7	=	7
2	3	0	8	11	=	11
3	4	1	11	15	=	15
4	3	0	8	11	=	11
5	4	1	9	12	<	13
6	3	0	6	8	<	9
7	4	1	9	12	<	13
8	5	2	11	15	<	16
9	5	2	10	13	<	15
10	5	2	11	15	<	16
11	4	0	10	14	=	14
12	5	1	11	15	<	16
13	6	2	12	16	<	18
14	7	2	15	20	<	22
15	5	2	12	17	=	17
16	5	2	14	19	=	19

**Листинг программы структурного анализа пространственных
механизмов манипуляторов**

```
Private Sub Command1_Click()  
n% = Text1  
p5% = Text2  
    p4% = Text3  
    p3% = Text4  
    ps = p5 + p4 + p3  
    Text5 = ps  
    fs = p5 + 2 * p4 + 3 * p3  
    Text6 = fs  
    k = ps - n  
    Text7 = k  
    w = 6 * n - 5 * p5 - 4 * p4 - 3 * p3  
    Text8 = w  
    nc = fs - 6 * (ps - n)  
    Text9 = nc  
    If w = nc Then Text14 = "Нормальный" Else Text14 = "Ненормальный"  
    q1 = w + 6 * k - fs  
    Text10 = q1  
    q2 = w - 6 * n + 5 * p5 + 4 * p4 + 3 * p3  
    Text11 = q2  
    Y = q1 - w + fs - 6 * (ps - n)  
    Text12 = Y  
    j = 6 * n  
    Text13 = j  
End Sub  
  
Private Sub Command2_Click()  
End  
End Sub
```

Листинг программы итерационного синтеза манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода

```

Private Sub Command1_Click()
Open "syntez_opt.csv" For Output As 1
w% = Text1
p50% = Text4
p5k% = Text5
p40% = Text6
p4k% = Text7
p30% = Text8
p3k% = Text9
'счетчик
i% = 0
  If w% = 1 Then k% = w% + 1: GoTo 1
  If w% = 2 Then k% = w% Else k% = w% - 1
1:   For j2% = p50% To p5k%
      For j3% = p40% To p4k%
          For j4% = p30% To p3k%
              w1% = j2% + 2 * j3% + 3 * j4% - 6 * k%
              fs% = j2% + 2 * j3% + 3 * j4%
              ps% = j2% + j3% + j4%
              n% = ps% - k%
              If w1% = w% Then Write #1, w1%, n%, j2%, j3%, j4%, ps%, k%, fs%: i% = i% +
1
                  Next j4
              Next j3
          Next j2
      Close #1
      Text10 = i%
  End Sub
Private Sub Command2_Click()
End
End Sub

```

Листинг и экранная копия программы для построения сечений зоны обслуживания манипулятора координатными плоскостями (*Visual Basic*)

```

Private Sub Command1_Click()
Рисунок1.Scale (-50, -10)-(50, 100)
Рисунок1.Line (-100, 0)-(100, 0), QBColor(7)
Рисунок1.Line (0, -100)-(0, 100), QBColor(7)
a = Текст1
b = Текст2
c = Текст3
For I1 = 30 To 60 Step 0.5
  For I2 = 30 To 60 Step 0.5
    For I3 = 30 To 60 Step 0.5
      kx = I2 ^ 2 + I3 ^ 2 - 2 * I1 ^ 2 - 2 * (a ^ 2 + b ^ 2 + c ^ 2)
      ky = (b ^ 2 + c ^ 2) * (16 * a * I1 ^ 2 - (I3 ^ 2 - I2 ^ 2) ^ 2) - a ^ 2 * kx ^ 2
      x = (I3 ^ 2 - I2 ^ 2) / 4 / a
      y = (-a * b * kx + c * Sqr(Abs(ky))) / (4 * a * (b ^ 2 + c ^ 2))
      z = (a * c * kx + b * Sqr(Abs(ky))) / (4 * a * (b ^ 2 + c ^ 2))
      Рисунок1.PSet (x, y), vbRed
    Next I3
  Next I2
Next I1
End Sub
Private Sub Command2_Click()
Рисунок1.Scale (-100, -10)-(10, 100)
Рисунок1.Line (-100, 0)-(100, 0), QBColor(7)
Рисунок1.Line (0, -100)-(0, 100), QBColor(7)
a = Текст1
b = Текст2
c = Текст3
For I1 = 30 To 60 Step 0.5
  For I2 = 30 To 60 Step 0.5
    For I3 = 30 To 60 Step 0.5

```

```

kx = I2 ^ 2 + I3 ^ 2 - 2 * I1 ^ 2 - 2 * (a ^ 2 + b ^ 2 + c ^ 2)
ky = (b ^ 2 + c ^ 2) * (16 * a * I1 ^ 2 - (I3 ^ 2 - I2 ^ 2) ^ 2) - a ^ 2 * kx ^ 2
x = (I3 ^ 2 - I2 ^ 2) / 4 / a
y = (-a * b * kx + c * Sqr(Abs(ky))) / (4 * a * (b ^ 2 + c ^ 2))
z = (a * c * kx + b * Sqr(Abs(ky))) / (4 * a * (b ^ 2 + c ^ 2))
Рисунок1.PSet (x, z), vbBlue
Next I3

```

```
Next I2
```

```
Next I1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
```

```
Рисунок1.Scale (-10, -10)-(50, 100)
```

```
Рисунок1.Line (-100, 0)-(100, 0), QBColor(7)
```

```
Рисунок1.Line (0, -100)-(0, 100), QBColor(7)
```

```
a = Текст1
```

```
b = Текст2
```

```
c = Текст3
```

```
For I1 = 30 To 60 Step 0.5
```

```
For I2 = 30 To 60 Step 0.5
```

```
For I3 = 30 To 60 Step 0.5
```

```

kx = I2 ^ 2 + I3 ^ 2 - 2 * I1 ^ 2 - 2 * (a ^ 2 + b ^ 2 + c ^ 2)
ky = (b ^ 2 + c ^ 2) * (16 * a * I1 ^ 2 - (I3 ^ 2 - I2 ^ 2) ^ 2) - a ^ 2 * kx ^ 2
x = (I3 ^ 2 - I2 ^ 2) / 4 / a
y = (-a * b * kx + c * Sqr(Abs(ky))) / (4 * a * (b ^ 2 + c ^ 2))
z = (a * c * kx + b * Sqr(Abs(ky))) / (4 * a * (b ^ 2 + c ^ 2))
Рисунок1.PSet (z, y), vbGreen
Next I3

```

```
Next I2
```

```
Next I1
```

```
End Sub
```

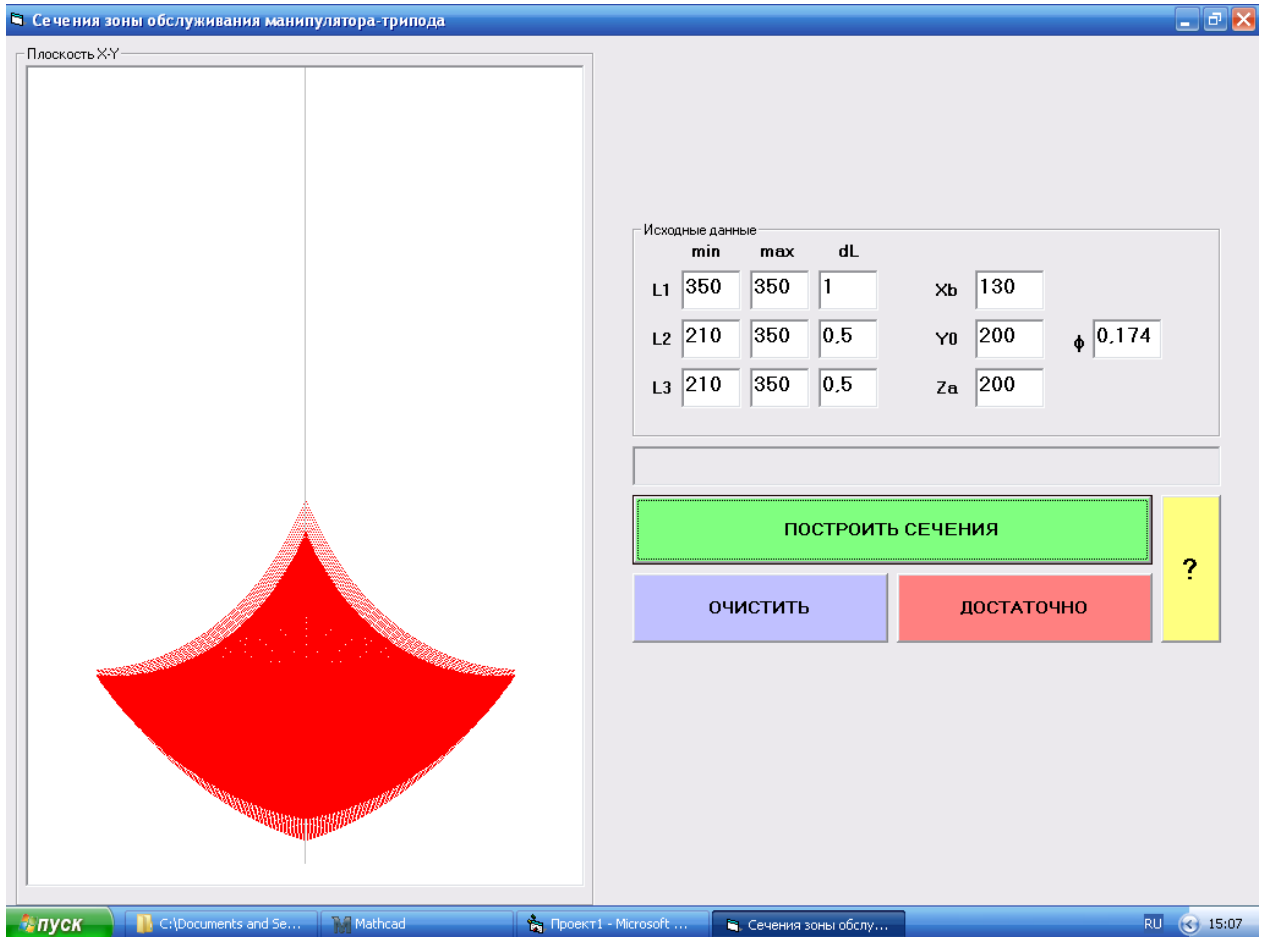


Рисунок П1 – Экранная копия программы для построения сечений зоны обслуживания манипулятора координатными плоскостями

Листинг и экранная копия программы для построения геометрико-статической характеристики манипулятора-трипода на *Visual Basic 6.0*

```

Private Sub Command1_Click()
Рисунок1.Scale (-250, 500)-(500, -250)
Рисунок1.Line (-500, 0)-(500, 0), QBColor(7)
Рисунок1.Line (0, -500)-(0, 500), QBColor(7)
'задаём
    a = Text1
    Q = 100
    L1min = Text2
    L2min = L1min
    k = Text3
'расчёт
    h = a * 0.866
    Text4 = h
    L2max = k * L1min
    Text5 = L2max
    hh = Sqr(L2max ^ 2 - a ^ 2 / 4)
    Text6 = hh
    f0 = Atn((0.5 * h) / Sqr(L1min ^ 2 - h ^ 2 / 4))
    Text7 = -f0
    fk = Atn((hh - h) / Sqr(L1min ^ 2 - (hh - h) ^ 2)) - 0.15
    Text8 = fk
End Sub
'построение сечения зоны
    Private Sub Command2_Click()
        h = Text4

```

f0 = Text7

fk = Text8

L1min = Text2

$$X0 = L1min * \text{Cos}(f0)$$

$$Y0 = h + L1min * \text{Sin}(f0)$$

$$Xk = L1min * \text{Cos}(fk)$$

$$Yk = h + L1min * \text{Sin}(fk)$$

Рисунок1.Line (0, 0)-(0, h), vbBlue

Рисунок1.Line (X0, Y0)-(0, 0), vbBlue

Рисунок1.Line (Xk, Yk)-(0, 0), vbGreen

Рисунок1.Line (X0, Y0)-(0, h), vbBlue

Рисунок1.Line (Xk, Yk)-(0, h), vbGreen

Рисунок1.Circle (X0, Y0), 6, vbBlue

Рисунок1.Circle (Xk, Yk), 6, vbBlue

Рисунок1.Circle (0, h), 6, vbBlue

Рисунок1.Circle (0, 0), 6, vbBlue

For fi = f2 To f0 Step -0.01

$$X3 = L2max * \text{Cos}(fi)$$

$$Y3 = L2max * \text{Sin}(fi)$$

Рисунок1.PSet (X3, Y3), vbRed

Next fi

a = Text1

Q = 100

L1min = Text2

L2min = L1min

k = Text3

'расчёт коэффициентов и построение изолиний

$$h = a * 0.866$$

Text4 = h

```

L2max = k * L1min
Text5 = L2max
hh = Sqr(L2max ^ 2 - a ^ 2 / 4)
Text6 = hh
f0 = Atn((0.5 * h) / Sqr(L1min ^ 2 - h ^ 2 / 4))
Text7 = -f0
fk = Atn((hh - h) / Sqr(L1min ^ 2 - (hh - h) ^ 2))
Text8 = fkQ = 100
For l1 = 205 To 343 Step 1
    For l2 = 205 To 343 Step 1
        om = Sqr(l2 ^ 2 - a ^ 2 / 4)
        p = (l1 + om + h) / 2
        S = Sqr(p * (p - l1) * (p - om) * (p - h))
        sina = S / (0.5 * h * l1)
        cosa = Sqr(1 - sina ^ 2)
        sinb = (l1 * sina) / om
        cosb = Sqr(1 - sinb ^ 2)
        x = l1 * sina
        y = l1 * cosa
        N1 = Q / (cosa + sina * cosb / sinb)
        If N1 < 90 Then Рисунок1.PSet (x, y), vbBlue
        If N1 > 90 And N1 < 130 Then Рисунок1.PSet (x, y), vbGreen
        If N1 > 130 And N1 < 170 Then Рисунок1.PSet (x, y), vbYellow
        If N1 > 170 Then Рисунок1.PSet (x, y), vbRed
    Next l2
Next l1
End Sub
Private Sub Command5_Click()
End

```


End Sub

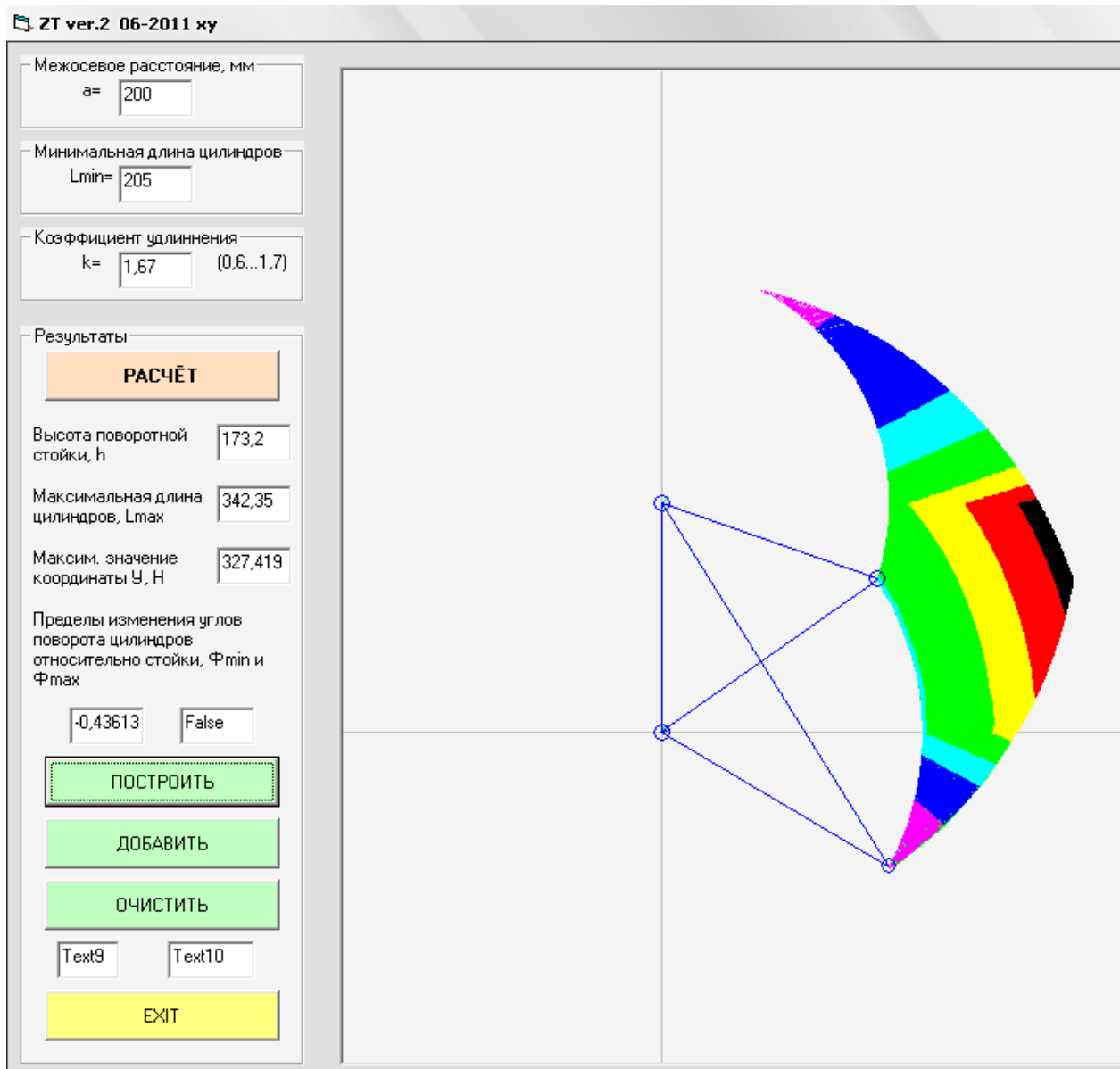


Рисунок П2 - Экранная копия программы для построения геометрико-статической характеристики манипулятора-трипода

Алгоритм численного моделирования движения захвата манипулятора по различным траекториям и программным законам в среде *Mathcad*

Координаты крепления актуаторов на раме

$$\begin{aligned} x_b &:= 355 & y_o &:= 755 & z_a &:= 750 & x_c &:= -355 \\ y_b &:= y_o & y_c &:= y_o & z_d &:= -40 & O_1A &:= z_a & O_{O_1} &:= z_d \end{aligned}$$

Определение координат захвата в начальном положении

$$l_1 := 1400 \quad l_2 := 1500 \quad l_3 := 1352 \quad \phi := 0.323$$

$$\frac{18.5 \cdot \pi}{180} = 0.3228859$$

$$l_4 := \sqrt{\left(z_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) - O_{O_1}\right)^2 + \left(y_b - z_a \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \right)^2}$$

$$l_4 = 911.8948391$$

$$A := -l_1^2 + 0.5l_2^2 + 0.5 \cdot l_3^2$$

$$x_{mo} := \frac{l_3^2 - l_2^2}{4x_b} \quad x_{mo} = -297.2507042$$

$$y_{mo} := \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16 \cdot x_b^2} - \left[\frac{(A - x_b^2 - z_a^2)^2}{4 \cdot z_a^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\phi) - \left(\frac{A - x_b^2 + z_a^2}{2 \cdot z_a} \right) \cdot \sin(\phi) \quad y_{mo} = 1129.7067108$$

$$z_{mo} := \left[l_1^2 - \frac{(l_3^2 - l_2^2)^2}{16 \cdot x_b^2} - \left[\frac{(A - x_b^2 - z_a^2)^2}{4 \cdot z_a^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sin(\phi) + \left(\frac{A - x_b^2 + z_a^2}{2 \cdot z_a} \right) \cdot \cos(\phi) \quad z_{mo} = 740.4942717$$

Минимизация длин (неопределенная траектория)

Определяем координаты крепления актуатора 1 точки A- y_{a0} и z_{a0}

$$Y_{A0} := z_a \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \quad Z_{A0} := z_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)$$

$$Y_{A0} = 238.0596353 \quad Z_{A0} = 711.2155862$$

$$y_{a0} := -Y_{A0} \quad z_{a0} := Z_{A0}$$

Определяем L_{2k} и L_{3k} из уравнения 1

$$L_{2kn} := \sqrt{(x_{mk} - x_b)^2 + (y_{mk})^2 + z_{ml}} \quad L_{3kn} := \sqrt{(x_{mk} - x_c)^2 + (y_{mk})^2 + z_{mk}^2}$$

$$L_{2kn} = 1616.485385$$

$$L_{3kn} = 1743.2799546$$

Определяем y_{ak} и z_{ak} из условия минимума квадратичной функции и ограничений

$$FF(y_{ak}, z_{ak}) := 1.61 \left[\sqrt{(x_{mk})^2 + (y_{mk} - y_{ak})^2 + (z_{mk} - z_{ak})^2} - \sqrt{(x_{mo})^2 + (y_{mo} - y_{ao})^2 + (z_{mo} - z_{ao})^2} \right]^2$$

$$y_{ak} := O_1A \cdot \sin(-\phi) \quad z_{ak} := O_1A \cdot \cos(-\phi)$$

Given

$$z_{ak}^2 + (y_{ak})^2 - O_1A^2 = 0$$

$$V_{min} := \text{Minimize}(FF, y_{ak}, z_{ak})$$

$$V = \begin{pmatrix} 354.235239 \\ 661.0729124 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} y_{ak} &:= \left(V^{(0)} \right)_0 & z_{ak} &:= \left(V^{(0)} \right)_1 \\ y_{ak} &= 354.235239 & z_{ak} &= 661.0729124 \end{aligned}$$

Определяем L_{1k} и L_{4k} из уравнений 1

$$L_{1kn} := \sqrt{x_{mk}^2 + (y_{mk} - y_{ak})^2 + (z_{mk} - z_{ak})^2} \quad L_{4kn} := \sqrt{(y_o + y_{ak})^2 + (z_{ak} - z_d)^2}$$

$$L_{1kn} = 1730.0525361$$

$$L_{4kn} = 1312.2141761$$

$$V_{max} := 25$$

$$T_1 := \frac{|L_{1kn} - l_1|}{V_{max}} \quad T_2 := \frac{|L_{2kn} - l_2|}{V_{max}} \quad T_3 := \frac{|L_{3kn} - l_3|}{V_{max}} \quad T_4 := \frac{|L_{4kn} - l_4|}{V_{max}}$$

$$T_1 = 13.2021014$$

$$T_2 = 4.659$$

$$T_3 = 15.651$$

$$T_4 = 16.0127735$$

$$T_{1k} := \max(T_1, T_2, T_3, T_4)$$

$$t := 0, 0.1 \dots T_{1k}$$

$$T_{1k} = 16.013$$

Задаемся законом изменения длины актуатора

$$l_{1n}(t) := l_1 + (L_{1kn} - l_1) \cdot \left(\frac{t}{T_{1k}} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T_{1k}}\right) \right)$$

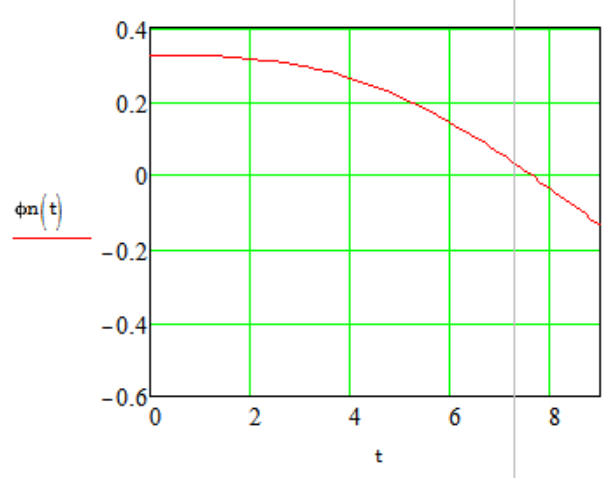
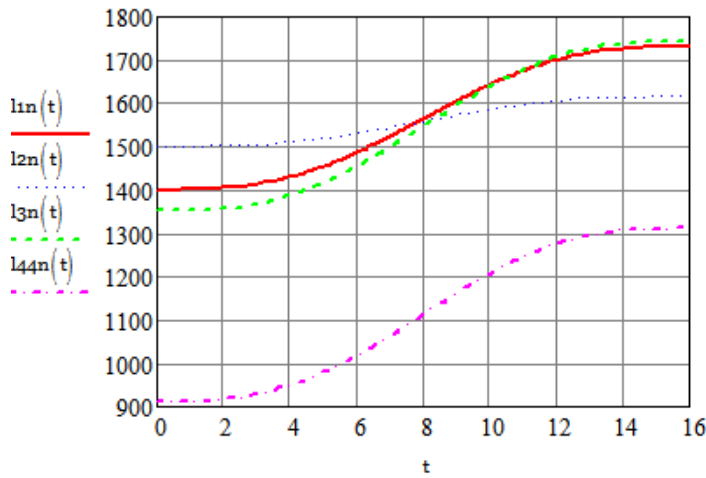
$$l_{2n}(t) := l_2 + (L_{2kn} - l_2) \cdot \left(\frac{t}{T_{1k}} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T_{1k}}\right) \right)$$

$$l_{3n}(t) := l_3 + (L_{3kn} - l_3) \cdot \left(\frac{t}{T_{1k}} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T_{1k}}\right) \right)$$

$$l_{4n}(t) := l_4 + (L_{4kn} - l_4) \cdot \left(\frac{t}{T_{1k}} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T_{1k}}\right) \right)$$

$$\phi_n(t) := -2 \cdot \operatorname{atan} \left[\frac{\sqrt{(l_{44n}(t)^2 + 2 \cdot l_{44n}(t) \cdot za - oo_1^2 - yb^2 + za^2) \cdot (2 \cdot l_{44n}(t) \cdot za - l_{44n}(t)^2 + oo_1^2 + yb^2 - za^2) - 2 \cdot yb \cdot za}}{oo_1^2 - l_{44n}(t)^2 + 2 \cdot oo_1 \cdot za + yb^2 + za^2}} \right]$$

$l_{1n}(t) =$	$l_{2n}(t) =$	$l_{3n}(t) =$	$l_{44n}(t) =$	$\phi_n(t) =$
1400	1500	1352	911.89484	0.323
1400.00053	1500.00019	1352.00063	911.89548	0.323
1400.00423	1500.00149	1352.00501	911.89997	0.32299
1400.01427	1500.00504	1352.01692	911.91215	0.32297
1400.03381	1500.01193	1352.04008	911.93585	0.32293
1400.06599	1500.02329	1352.07823	911.97488	0.32287
1400.11393	1500.04021	1352.13507	912.03303	0.32277
1400.18074	1500.06379	1352.21427	912.11405	0.32263
1400.26948	1500.09511	1352.31947	912.22169	0.32245
1400.38319	1500.13524	1352.45427	912.35961	0.32222
1400.52487	1500.18524	1352.62223	912.53145	0.32194
1400.69747	1500.24616	1352.82685	912.74079	0.32159
1400.9039	1500.31901	1353.07158	912.99117	0.32117
1401.14702	1500.40482	1353.3598	913.28605	0.32068
1401.42962	1500.50456	1353.69483	913.62882	0.32011
...



Минимизация ускорения (прямолинейная траектория)

Задаем значения конечных координат и определяем L2k и L3k из уравнения 1

$x_{mk} := 300$ $y_{mk} := 1500$ $z_{mk} := -600$ $t := 0, 0.1 .. 16$ $T := 16$

$$x(t) := \left[\frac{-2 \cdot (x_{mk} - x_{mo})}{T^3} \cdot t^3 + \frac{3 \cdot (x_{mk} - x_{mo})}{T^2} \cdot t^2 + x_{mo} \right] \quad y(t) := \left[\frac{-2 \cdot (y_{mk} - y_{mo})}{T^3} \cdot t^3 + \frac{3 \cdot (y_{mk} - y_{mo})}{T^2} \cdot t^2 + y_{mo} \right]$$

x(t) =

-297.2507042
-297.1810055
-296.973076
-296.6286653
-296.1495232
-295.5373996
-294.7940441
-293.9212065
-292.9206366
-291.7940841
-290.5432989
-289.1700305
-287.6760289
-286.0630437
-284.3328247
...

y(t) =

1129.7067108
1129.7499237
1129.8788393
1130.0923727
1130.389439
1130.7689535
1131.2298312
1131.7709874
1132.3913371
1133.0897956
1133.865278
1134.7166994
1135.6429751
1136.6430201
1137.7157496
...

$$z(t) := \left[\frac{-2 \cdot (zmk - zmo)}{T^3} \cdot t^3 + \frac{3 \cdot (zmk - zmo)}{T^2} \cdot t^2 + zmo \right]$$

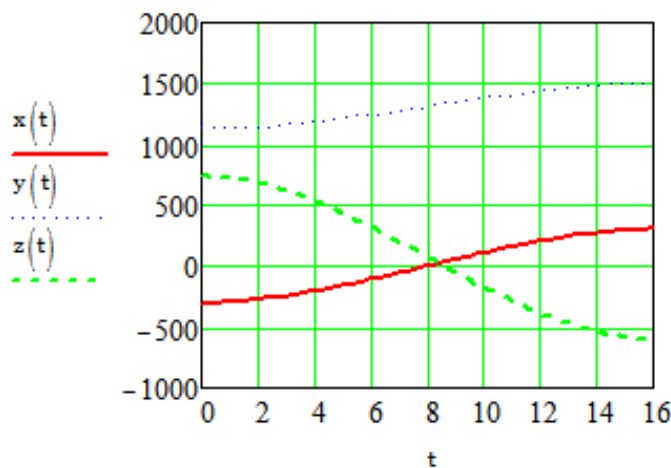
$\phi_k := -0.4919$

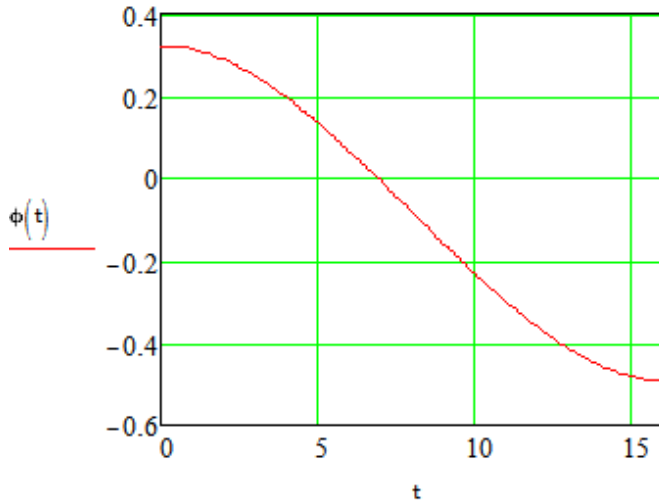
$\phi_0 := \phi$

$$\phi(t) := \left[\frac{-2 \cdot (\phi_k - \phi_0)}{T^3} \cdot t^3 + \frac{3 \cdot (\phi_k - \phi_0)}{T^2} \cdot t^2 + \phi_0 \right]$$

z(t) =

740.4942717
740.3378371
739.8711514
739.0981417
738.0227354
736.6488597
734.9804418
733.0214089
730.7756883
728.2472071
725.4398927
722.3576722
719.0044729
715.3842221
711.5008468
...





$\frac{d^2}{dt^2}x(t) =$	$\frac{d^2}{dt^2}y(t) =$	$\frac{d^2}{dt^2}z(t) =$
13.9980634	8.678749	-31.4178345
13.8230876	8.5702646	-31.0251116
13.6481118	8.4617802	-30.6323886
13.473136	8.3532959	-30.2396657
13.2981602	8.2448115	-29.8469428
13.1231844	8.1363272	-29.4542198
12.9482086	8.0278428	-29.0614969
12.7732328	7.9193584	-28.668774
12.598257	7.8108741	-28.276051
12.4232812	7.7023897	-27.8833281
12.2483055	7.5939053	-27.4906052
12.0733297	7.485421	-27.0978823
11.8983539	7.3769366	-26.7051593
11.7233781	7.2684523	-26.3124364
11.5484023	7.1599679	-25.9197135
...

Определяем L(t)

OA := za OB := xb OK := yo DK := zd OA1 := za

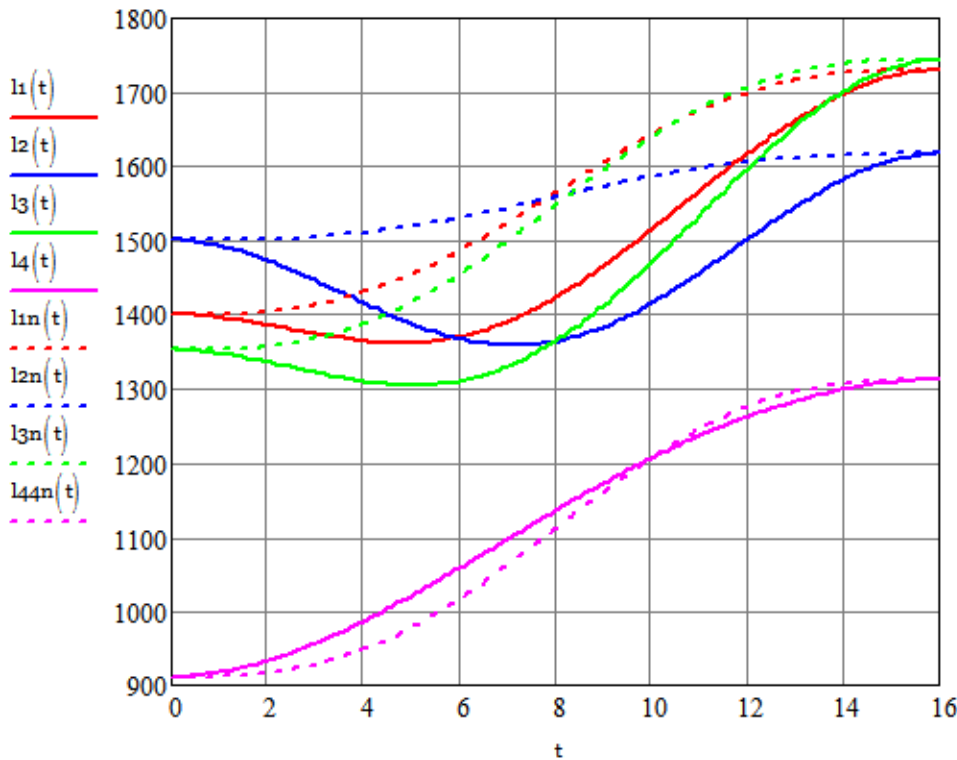
$$l_1(t) := \sqrt{x(t)^2 + (y(t) + OA1 \cdot \sin(\phi(t)))^2 + (z(t) - OA1 \cdot \cos(\phi(t)))^2}$$

$$l_2(t) := \sqrt{(x(t) - xb)^2 + (y(t))^2 + z(t)^2}$$

$$l_3(t) := \sqrt{(x(t) + xb)^2 + (y(t))^2 + z(t)^2}$$

$$l_4(t) := \sqrt{(OK - OA \cdot \sin(\phi(t)))^2 + (OA \cdot \cos(\phi(t)) - DK)^2}$$

w1 := 1140 w2 := 1750



l(t) =

1400
1399.9576081
1399.8312818
1399.6224984
1399.3329967
1398.9647659
1398.5200339
1398.0012567
1397.4111074
1396.7524653
1396.0284052
1395.2421871
1394.397246
1393.497181
1392.5457458
...

$$x_n(t) := \frac{(\lg_n(t))^2 - (\ln(t))^2}{4 \cdot x_b}$$

$$A_n(t) := -\ln(t)^2 + 0.5 \lg_n(t)^2 + 0.5 \cdot \lg_n(t)^2$$

$$y_n(t) := \left[\lg_n(t)^2 - \frac{(\lg_n(t)^2 - \ln(t)^2)^2}{16 \cdot x_b^2} - \left[\frac{(A_n(t) - x_b^2 - z_a^2)^2}{4 \cdot z_a^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \cos(\phi_n(t)) - \left(\frac{A_n(t) - x_b^2 + z_a^2}{2 \cdot z_a} \right) \cdot \sin(\phi_n(t))$$

$$z_n(t) := \left[\lg_n(t)^2 - \frac{(\lg_n(t)^2 - \ln(t)^2)^2}{16 \cdot x_b^2} - \left[\frac{(A_n(t) - x_b^2 - z_a^2)^2}{4 \cdot z_a^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \sin(\phi_n(t)) + \left(\frac{A_n(t) - x_b^2 + z_a^2}{2 \cdot z_a} \right) \cdot \cos(\phi_n(t))$$

$x_n(t) =$

-297.251
-297.25
-297.244
-297.229
-297.2
-297.151
-297.078
-296.977
-296.843
-296.671
-296.457
-296.196
-295.883
-295.515
-295.087
...

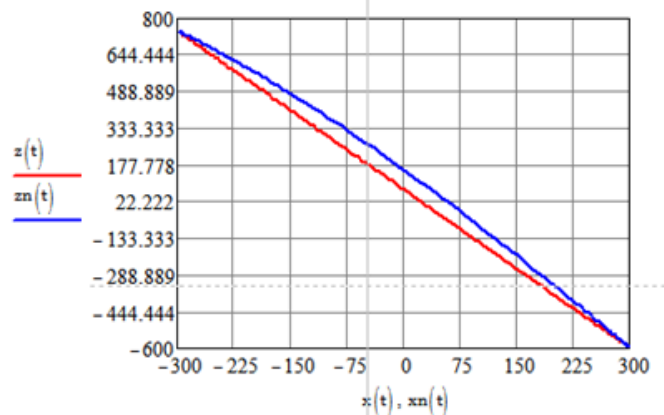
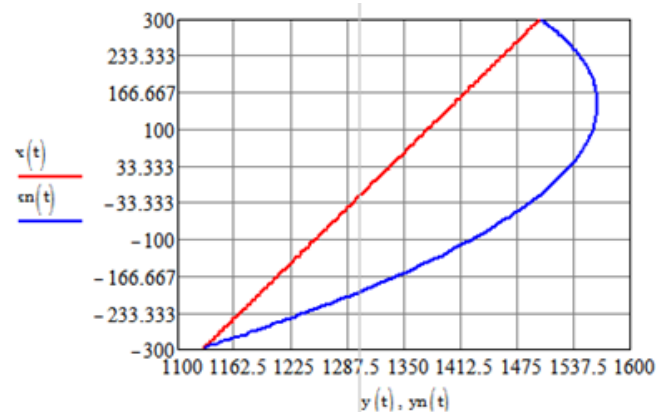
$y_n(t) =$

1129.70671
1129.70822
1129.71877
1129.7474
1129.8031
1129.89484
1130.03151
1130.22193
1130.47484
1130.79884
1131.20244
1131.69399
1132.26166
1132.97346
1133.77725
...

$z_n(t) =$

740.49427
740.49305
740.48453
740.4614
740.4164
740.34227
740.2318
740.07782
739.87321
739.6109
739.28387
738.88516
738.40786
737.84512
737.19015
...

$$S_n(t) := \sqrt{(x(t))^2 + (y(t))^2 + (z(t))^2}$$



Сравнение траекторий

длина неопределенной траектории

$$s := \int_0^T \sqrt{\left(\frac{d}{dt} x_n(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} y_n(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} z_n(t)\right)^2} dt$$

$$s = 1594.0110295$$

длина прямолинейной траектории

$$s_p := \int_0^T \sqrt{\left(\frac{d}{dt} x(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} y(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} z(t)\right)^2} dt$$

$$s_p = 1513.5225193$$

разница длин

$$dS := s - s_p$$

$$dS = 80.4885102$$

максимальное отклонение

$$h_{\max} := \sqrt{\left(\frac{3 \cdot s + s_p}{8}\right)^2 - \frac{s_p^2}{4}}$$

$$h_{\max} = 215.8563523$$

Определение усилий F(t) прямолинейная траектория

$$t_o := 0$$

$$l_{1_o} := l_1(0) \quad l_{2_o} := l_2(0) \quad l_{3_o} := l_3(0) \quad l_{4_o} := l_4(0) \quad \phi_o := \phi(0)$$

$$l_{1_o} = 1400 \quad l_{2_o} = 1500 \quad l_{3_o} = 1352 \quad l_{4_o} = 911.8948391 \quad \phi_o = 0.323$$

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

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

$$a_x(t) := \frac{d^2}{dt^2} x(t) \quad a_y(t) := \frac{d^2}{dt^2} y(t) \quad a_z(t) := \frac{d^2}{dt^2} z(t) \quad \varepsilon(t) := \frac{d^2}{dt^2} \phi(t)$$

$$a_{ax} := a_x(0) \quad a_{ay} := a_y(0) \quad a_{az} := a_z(0) \quad a_{\varepsilon} := \varepsilon(0)$$

$$a_{ax} = 13.9980634 \quad a_{ay} = 8.678749 \quad a_{az} = -31.4178345 \quad a_{\varepsilon} = -0.0190992$$

$$g := 9.810 \quad O_{A1} = 750 \quad O_{O1} = -40 \quad z_d = -40 \quad m := 45 \quad m_a := 50$$

$$F_1 := 0 \quad F_2 := 0 \quad F_3 := 0 \quad F_4 := 0 \quad A_A := 0$$

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

Given

$$F_1 \cdot \frac{x_o}{m \cdot l_{1_o}} + F_2 \cdot \frac{x_o - x_b}{m \cdot l_{2_o}} + F_3 \cdot \frac{x_o + x_b}{m \cdot l_{3_o}} = \frac{aax}{1000}$$

$$F_1 \cdot \frac{y_o + OA_1 \cdot \sin(\phi_o) - y_b}{m \cdot l_{1_o}} + F_2 \cdot \frac{y_o - y_b}{m \cdot l_{2_o}} + F_3 \cdot \frac{y_o - y_b}{m \cdot l_{3_o}} = \frac{aay}{1000}$$

$$F_1 \cdot \frac{z_o - OA_1 \cdot \cos(\phi_o)}{m \cdot l_{1_o}} + F_2 \cdot \frac{z_o}{m \cdot l_{2_o}} + F_3 \cdot \frac{z_o}{m \cdot l_{3_o}} - g = \frac{aaz}{1000}$$

$$F_1 \cdot \frac{(y_o - y_b) \cdot \cos(\phi_o) + z_o \cdot \sin(\phi_o)}{OA_1 \cdot ma \cdot l_{1_o}} + F_4 \cdot \frac{z_d \cdot \sin(\phi_o) - y_b \cdot \cos(\phi_o)}{OA_1 \cdot ma \cdot l_{4_o}} + \frac{g \cdot \sin(\phi_o)}{OA_1} = \frac{az}{1000}$$

AA(l_{1_o}, l_{2_o}, l_{3_o}, l_{4_o}, x_o, y_o, z_o, φ_o) := Find(F₁, F₂, F₃, F₄)

$$AA(l_{1_o}, l_{2_o}, l_{3_o}, l_{4_o}, x_o, y_o, z_o, \phi_o) = \begin{pmatrix} -520.4253668 \\ 306.4097147 \\ 547.1158928 \\ -78.9097833 \end{pmatrix}$$

t := 0 T_{ik} = 16.0127735

mmm := for i ∈ 1 .. T_{ik} · 10

```

t ← t + 0.1
x_o ← x(t)
y_o ← y(t)
z_o ← z(t)
l1_o ← l1(t)
l2_o ← l2(t)
l3_o ← l3(t)
l4_o ← l4(t)
φ_o ← φ(t)
aaxi ← ax(t)
aayi ← ay(t)
aazi ← az(t)
aei ← ε(t)

```

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$a4_i \leftarrow \frac{d^2}{dt^2} l4 (t)$$

$$N4_i \leftarrow \frac{F4_i \cdot V4_i}{1000}$$

$$N1_i \leftarrow \frac{F1_i \cdot V1_i}{1000}$$

$$N2_i \leftarrow \frac{F2_i \cdot V2_i}{1000}$$

$$N3_i \leftarrow \frac{F3_i \cdot V3_i}{1000}$$

$$A1_i \leftarrow \left| \frac{F1_i \cdot (l1 (t) - 1140)}{1000} \right|$$

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

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

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

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

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

$$A_{1i} \leftarrow \left| \frac{F_{1i} \cdot (l_1(t) - 1140)}{1000} \right|$$

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

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

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

$$n_i \leftarrow t$$

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

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

F1 =

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	...

F2 =

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	...

F3 =

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	...

F4 =

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	...

$$N_1 := \left(\text{mmm}^{\langle 4 \rangle} \right)_0$$

$$N_1 =$$

	0
0	0
1	0.4402765
2	0.8740706
3	1.3004709
4	1.7185947
5	2.1275827
6	2.5265947
7	2.9148049
8	3.2913988
9	3.6555692
10	4.0065135
11	4.343431
12	4.6655206
13	4.9719793
14	5.2620003
15	...

$$N_2 := \left(\text{mmm}^{\langle 5 \rangle} \right)_0$$

$$N_2 =$$

	0
0	0
1	-0.4585909
2	-0.9114785
3	-1.3587196
4	-1.8003575
5	-2.2364177
6	-2.666903
7	-3.0917905
8	-3.5110278
9	-3.92453
10	-4.3321773
11	-4.733813
12	-5.1292411
13	-5.5182253
14	-5.9004875
15	...

$$N_3 := \left(\text{mmm}^{\langle 6 \rangle} \right)_0$$

$$N_3 =$$

	0
0	0
1	-0.5085101
2	-1.008984
3	-1.4998492
4	-1.9796024
5	-2.4468096
6	-2.9001057
7	-3.3381939
8	-3.7598458
9	-4.1639007
10	-4.5492658
11	-4.9149157
12	-5.2598919
13	-5.5833034
14	-5.8843257
15	...

$$N_4 := \left(\text{mmm}^{\langle 7 \rangle} \right)_0$$

$$N_4 =$$

	0
0	0
1	-0.0898547
2	-0.1791672
3	-0.2685017
4	-0.3583982
5	-0.449373
6	-0.5419189
7	-0.6365058
8	-0.7335808
9	-0.8335688
10	-0.9368728
11	-1.0438743
12	-1.1549334
13	-1.2703894
14	-1.390561
15	...

$$V_1 := \left(\text{mmm}^{\langle 8 \rangle} \right)_0$$

$$V_1 =$$

	0
0	0
1	-0.8458292
2	-1.6782324
3	-2.4945359
4	-3.2921808
5	-4.0687214
6	-4.8218235
7	-5.5492626
8	-6.2489225
9	-6.9187939
10	-7.5569732
11	-8.161661
12	-8.7311613
13	-9.2638804
14	-9.7583262
15	...

$$V_2 := \left(\text{mmm}^{\langle 9 \rangle} \right)_0$$

$$V_2 =$$

	0
0	0
1	-1.4962825
2	-2.9717255
3	-4.4243901
4	-5.8524151
5	-7.2540143
6	-8.6274727
7	-9.9711436
8	-11.283446
9	-12.5628617
10	-13.807933
11	-15.0172609
12	-16.1895026
13	-17.3233703
14	-18.4176294
15	...

$$V_3 := \left(\text{mmm}^{\langle 10 \rangle} \right)_0$$

$$V_3 =$$

	0
0	0
1	-0.9295148
2	-1.8447964
3	-2.7434045
4	-3.6229993
5	-4.4813384
6	-5.3162732
7	-6.1257463
8	-6.9077883
9	-7.6605161
10	-8.3821298
11	-9.0709112
12	-9.7252218
13	-10.3435013
14	-10.9242663
15	...

$$V_4 := \left(\text{mmm}^{\langle 11 \rangle} \right)_0$$

$$V_4 =$$

	0
0	0
1	1.1374037
2	2.2602564
3	3.3683239
4	4.461382
5	5.5392158
6	6.6016199
7	7.648398
8	8.6793629
9	9.6943357
10	10.6931464
11	11.675633
12	12.6416421
13	13.5910277
14	14.5236521
15	...

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

$$a_1 =$$

	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	...

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

$$a_2 =$$

	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	...

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

$$a_3 =$$

	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	...

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

$$a_4 =$$

	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	...

$$A_1 := \left(mmm \langle 16 \rangle \right)_0$$

$$A_2 := \left(mmm \langle 17 \rangle \right)_0$$

$$A_3 := \left(mmm \langle 18 \rangle \right)_0$$

$$A_4 := \left(mmm \langle 19 \rangle \right)_0$$

A1 =

	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	...

A2 =

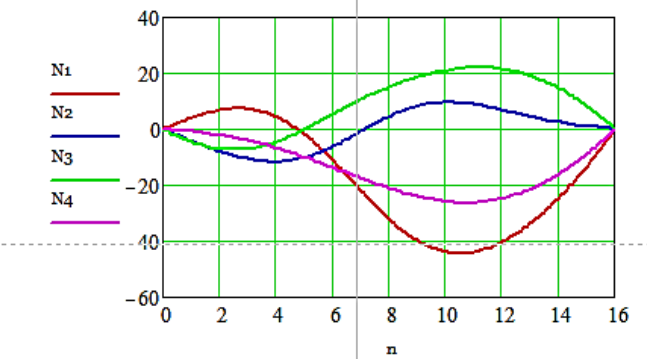
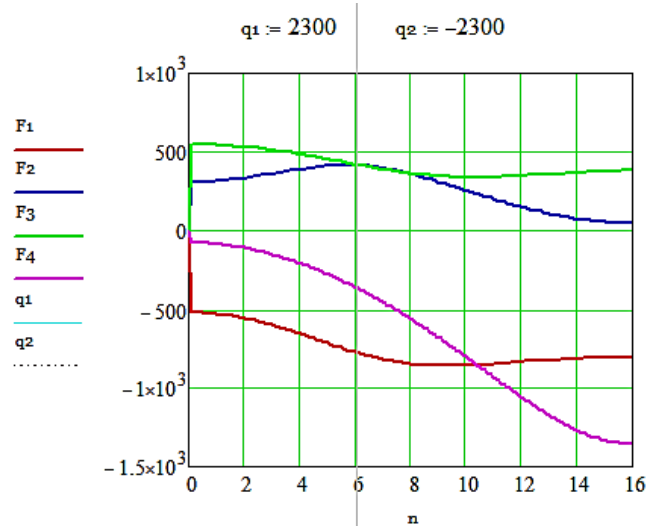
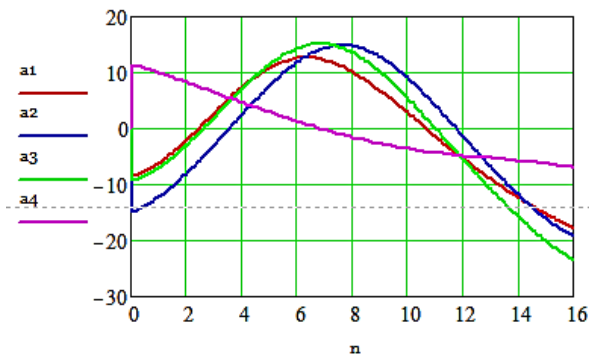
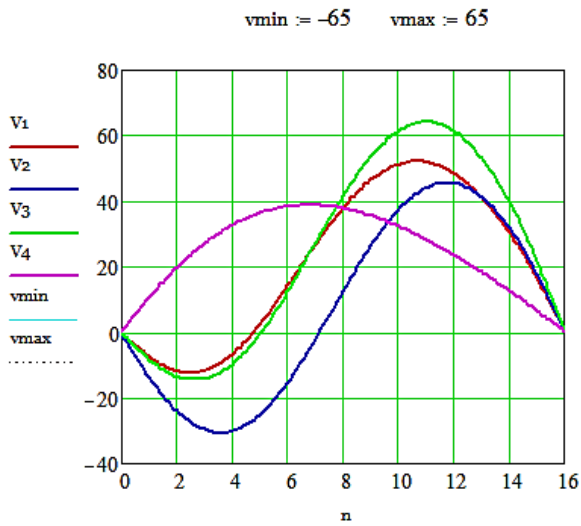
	0
0	0
1	110.3122918
2	110.3265167
3	110.3498208
4	110.3817075
5	110.4215426
6	110.4685623
7	110.5218821
8	110.5805047
9	110.6433295
10	110.7091619
11	110.7767223
12	110.8446561
13	110.9115433
14	110.9759085
15	...

A3 =

	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	...

A4 =

	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	...



Определение усилий F(t) неопределенная траектория

$$t_o := 0$$

$$l_{1_o} := l_{1n}(0) \quad l_{2_o} := l_{2n}(0) \quad l_{3_o} := l_{3n}(0) \quad l_{4_o} := l_{4n}(0) \quad \phi_o := \phi_n(0)$$

$$l_{1_o} = 1400 \quad l_{2_o} = 1500 \quad l_{3_o} = 1352 \quad l_{4_o} = 911.8948391 \quad \phi_o = 0.323$$

$$x_o := x_n(0) \quad y_o := y_n(0) \quad z_o := z_n(0)$$

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

$$a_{xn}(t) := \frac{d^2}{dt^2} x_n(t) \quad a_{yn}(t) := \frac{d^2}{dt^2} y_n(t) \quad a_{zn}(t) := \frac{d^2}{dt^2} z_n(t) \quad \varepsilon_n(t) := \frac{d^2}{dt^2} \phi_n(t)$$

$$a_{ax} := a_{xn}(0) \quad a_{ay} := a_{yn}(0) \quad a_{az} := a_{zn}(0) \quad a_{\varepsilon} := \varepsilon_n(0)$$

$$a_{ax} = 0 \quad a_{ay} = -0 \quad a_{az} = -0 \quad a_{\varepsilon} = 0$$

$$g := 9.810 \quad OA_1 = 750 \quad OO_1 = -40 \quad zd = -40 \quad m := 45 \quad ma := 50$$

$$F_{1n} := 0 \quad F_{2n} := 0 \quad F_{3n} := 0 \quad F_{4n} := 0 \quad AA := 0$$

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

Given

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$t \leftarrow t + 0.1$

$x_o \leftarrow x_n(t)$

$y_o \leftarrow y_n(t)$

$z_o \leftarrow z_n(t)$

$l1_o \leftarrow l1_n(t)$

$l2_o \leftarrow l2_n(t)$

$l3_o \leftarrow l3_n(t)$

$l4_o \leftarrow l4_n(t)$

$\phi_o \leftarrow \phi_n(t)$

$aax_i \leftarrow ax_n(t)$

$aay_i \leftarrow ay_n(t)$

$aaz_i \leftarrow az_n(t)$

$ae_i \leftarrow en(t)$

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

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

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

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

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

$V1n_i \leftarrow \frac{d}{dt} l1_n(t)$

$V2n_i \leftarrow \frac{d}{dt} l2_n(t)$

$V3n_i \leftarrow \frac{d}{dt} l3_n(t)$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$n_i \leftarrow t$$

(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)

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

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

$$F_{1n} =$$

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	...

$$N_{1n} := \left(mmm \langle 4 \rangle \right)_0$$

$$N_{2n} := \left(mmm \langle 5 \rangle \right)_0$$

$$N_{3n} := \left(mmm \langle 6 \rangle \right)_0$$

$$N_{4n} := \left(mmm \langle 7 \rangle \right)_0$$

$$N_{1n} =$$

0	
0	0
1	-0.008298
2	-0.03318
3	-0.0746125
4	-0.1325433
5	-0.2069063
6	-0.297624
7	-0.4046118
8	-0.5277811
9	-0.6670424
10	-0.8223085
11	-0.9934974
12	-1.1805344
13	-1.3833548
14	-1.6019057
15	...

$$N_{2n} =$$

0	
0	0
1	0.001731
2	0.0069217
3	0.0155651
4	0.0276505
5	0.0431647
6	0.0620922
7	0.0844166
8	0.1101208
9	0.1391883
10	0.1716032
11	0.2073516
12	0.2464213
13	0.288803
14	0.3344901
15	...

$$N_{3n} =$$

0	
0	0
1	0.0102947
2	0.0411626
3	0.0925551
4	0.1643899
5	0.2565505
6	0.3688855
7	0.5012076
8	0.6532935
9	0.8248828
10	1.0156786
11	1.2253464
12	1.4535142
13	1.6997729
14	1.9636759
15	...

$$N_{4n} =$$

0	
0	0
1	-0.0015621
2	-0.0062468
3	-0.0140521
4	-0.0249792
5	-0.0390365
6	-0.0562437
7	-0.0766354
8	-0.1002647
9	-0.1272067
10	-0.1575618
11	-0.1914581
12	-0.2290549
13	-0.2705444
14	-0.316154
15	...

$$V_{1n} := \left(mmm \langle 8 \rangle \right)_0$$

$$V_{2n} := \left(mmm \langle 9 \rangle \right)_0$$

$$V_{3n} := \left(mmm \langle 10 \rangle \right)_0$$

$$V_{4n} := \left(mmm \langle 11 \rangle \right)_0$$

$$V_{1n} =$$

0	
0	0
1	0.0158656
2	0.0634381
3	0.1426442
4	0.2533619
5	0.3954209
6	0.5686024
7	0.7726398
8	1.0072191
9	1.271979
10	1.566512
11	1.8903647
12	2.2430385
13	2.6239905
14	3.0326342
15	...

$$V_{2n} =$$

0	
0	0
1	0.0055995
2	0.0223892
3	0.0503434
4	0.089419
5	0.1395558
6	0.2006768
7	0.2726876
8	0.3554777
9	0.4489193
10	0.5528688
11	0.6671661
12	0.7916352
13	0.9260845
14	1.0703071
15	...

$$V_{3n} =$$

0	
0	0
1	0.0188088
2	0.0752064
3	0.1691058
4	0.3003626
5	0.4687747
6	0.6740828
7	0.9159708
8	1.1940664
9	1.5079414
10	1.8571127
11	2.2410427
12	2.6591403
13	3.1107619
14	3.5952123
15	...

$$V_{4n} =$$

0	
0	0
1	0.0192434
2	0.0769438
3	0.1730125
4	0.3073016
5	0.4796044
6	0.6896555
7	0.9371316
8	1.2216518
9	1.542778
10	1.9000159
11	2.2928154
12	2.720572
13	3.182627
14	3.6782692
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	...

$A_{2n} =$

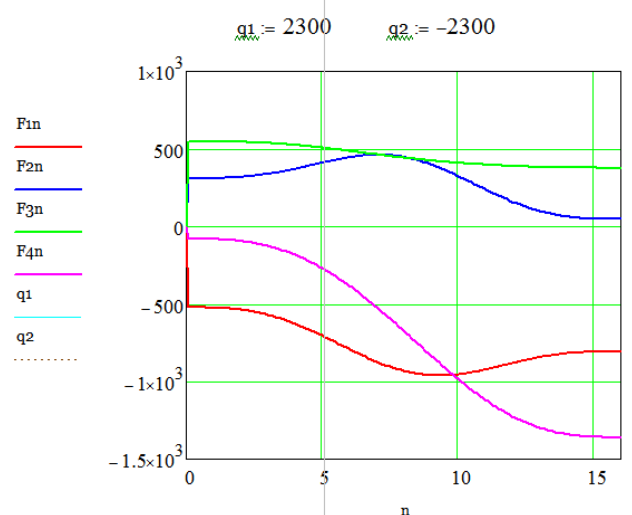
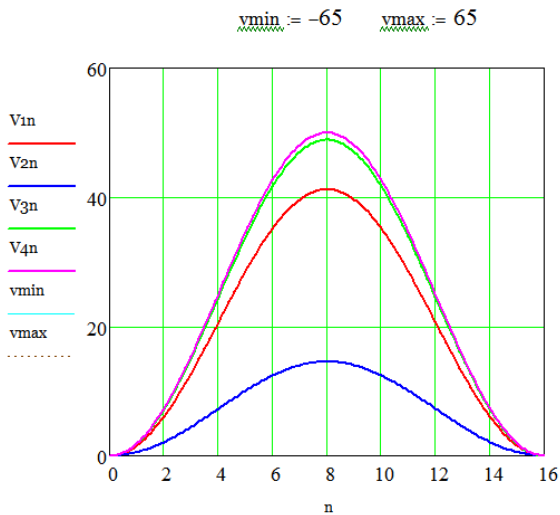
	0
0	0
1	111.2923165
2	111.2958819
3	111.3055543
4	111.324374
5	111.3533653
6	111.4015298
7	111.4658396
8	111.5512305
9	111.6605943
10	111.7967707
11	111.9625399
12	112.1606133
13	112.3936253
14	112.6641246
15	...

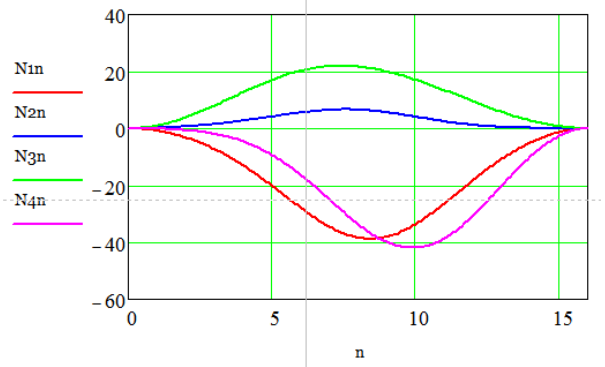
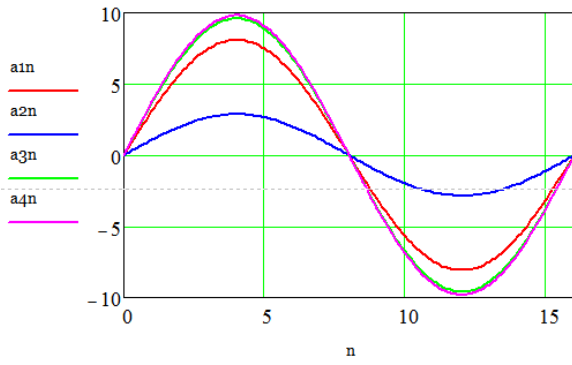
$A_{3n} =$

	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	...

$A_{4n} =$

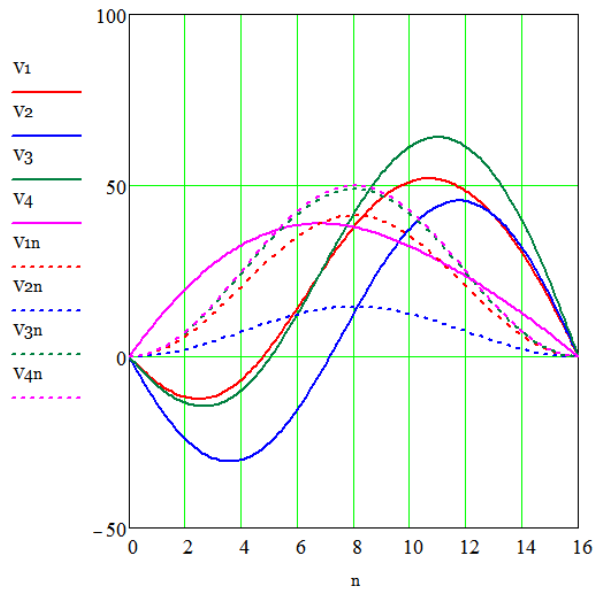
	0
0	0
1	0.0084843
2	0.0081211
3	0.0071353
4	0.0052148
5	0.0020449
6	0.0026933
7	0.009327
8	0.0181945
9	0.0296505
10	0.044071
11	0.0618589
12	0.0834506
13	0.1093229
14	0.14
15	...



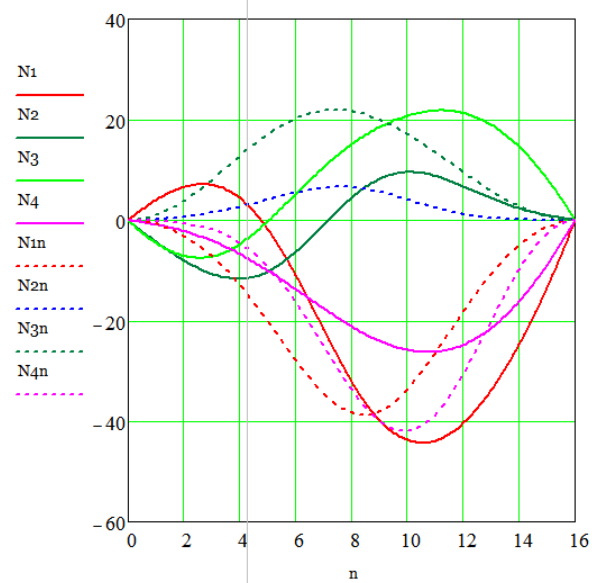
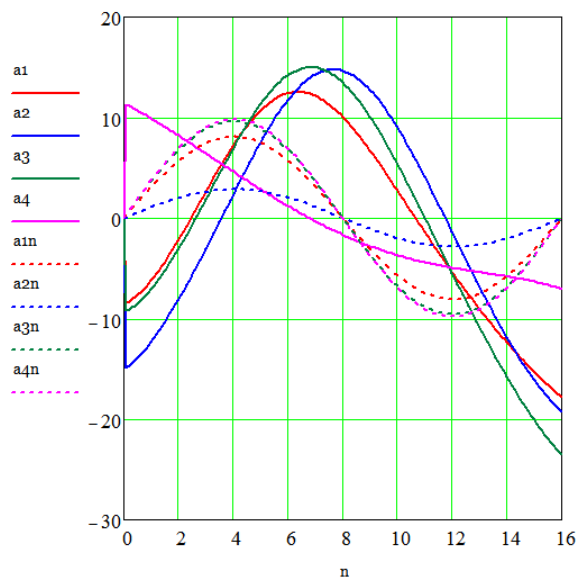
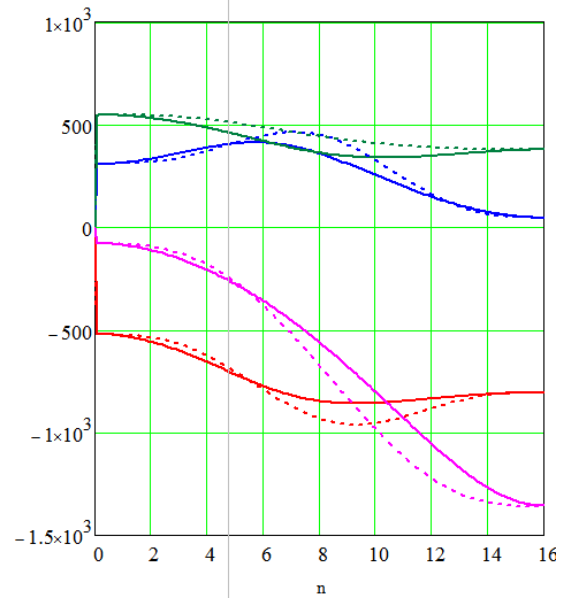


Сравнение графиков

$y_{min} := -65$ $y_{max} := 65$



$\alpha_1 := 2300$ $\alpha_2 := -2300$



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

$$\sum A_{1n} = 55216.6983737 \quad \sum A_{2n} = 18577.2808674 \quad \sum A_{3n} = 28130.5555209 \quad \sum A_{4n} = 34611.8894392$$

Движение по прямой траектории

$$t := 0, 0.1 .. T_{1k}$$

$$x_{mk} := 300$$

$$y_{mk} := 1500$$

$$z_{mk} := -600$$

$$dx := x_{mk} - x_{m0}$$

$$dy := y_{mk} - y_{m0}$$

$$dz := z_{mk} - z_{m0}$$

$$k_1 := \frac{dx}{dy} = 597.2507042$$

$$k_2 := \frac{dy}{dz} = 370.2932892$$

$$k_3 := \frac{dz}{dy} = -1340.4942717$$

$$k_1 = 0.6199964$$

$$k_2 = -2.2444415$$

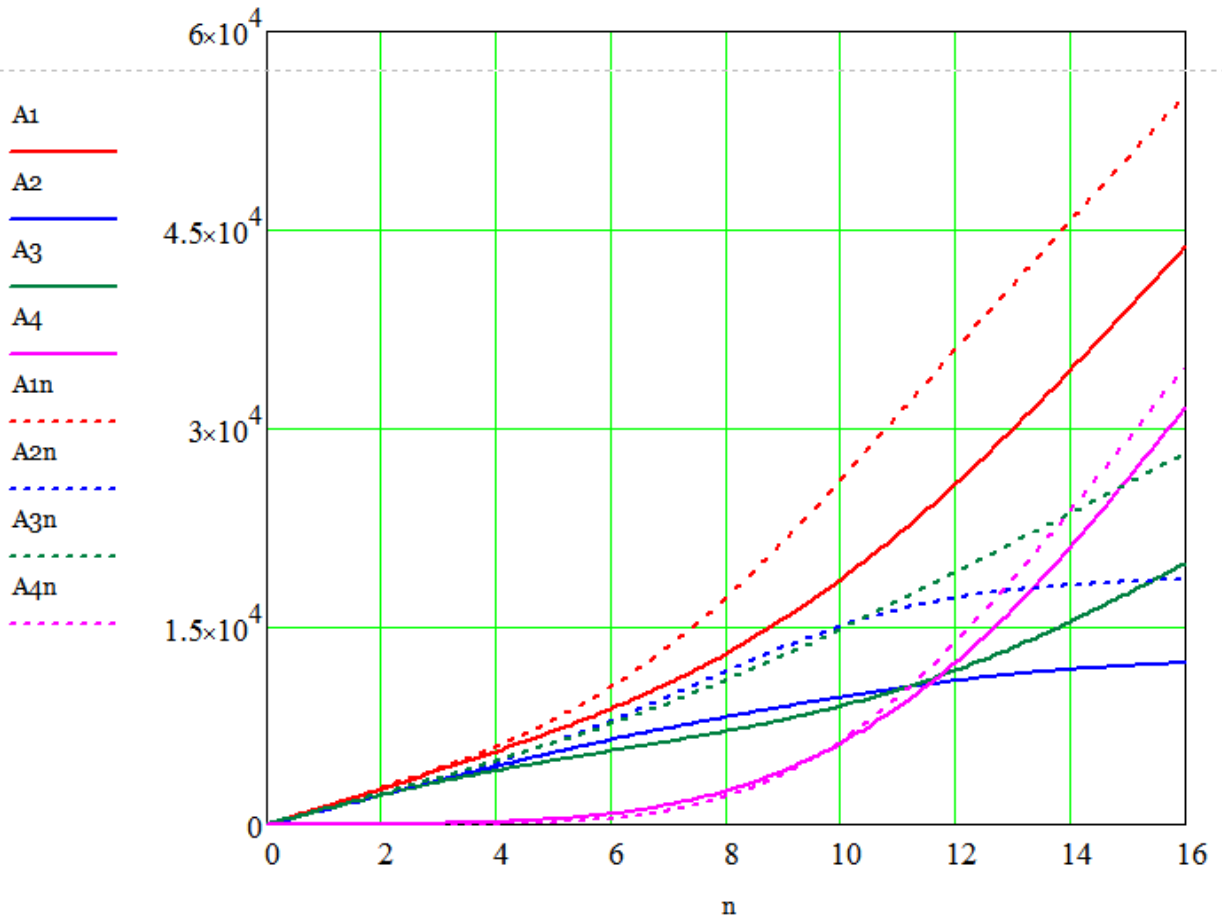
$$k_3 = -3.6200879$$

$$k_x := \sqrt{1 + k_1^2} \quad k_y := \sqrt{1 + \left(\frac{1}{k_1}\right)^2} \quad k_z := \sqrt{1 + \left(\frac{1}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_3}\right)^2}$$

$$S_k := k_x \cdot dx$$

$$S_{1k} := k_y \cdot dy$$

$$S_{2k} := k_z \cdot dz$$



Движение по прямой траектории

$t := 0, 0.1 .. T_{1k}$

$x_{mk} := 300$

$y_{mk} := 1500$

$z_{mk} := -600$

$dx := x_{mk} - x_{m0}$

$dy := y_{mk} - y_{m0}$

$dz := z_{mk} - z_{m0}$

$\frac{dx}{dy} = 597.2507042$

$\frac{dy}{dz} = 370.2932892$

$\frac{dz}{dx} = -1340.4942717$

$k_1 := \frac{dx}{dy}$

$k_2 := \frac{dy}{dz}$

$k_3 := \frac{dz}{dx}$

$k_1 = 0.6199964$

$k_2 = -2.2444415$

$k_3 = -3.6200879$

$k_x := \sqrt{1 + k_1^2 + k_2^2}$ $k_y := \sqrt{1 + \left(\frac{1}{k_1}\right)^2 + k_3^2}$ $k_z := \sqrt{1 + \left(\frac{1}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_3}\right)^2}$

$S_{kx} := k_x \cdot dx$

$S_{ky} := k_y \cdot dy$

$S_{kz} := k_z \cdot dz$

$S_k = 1513.5225193$

$S_{1k} = 1513.5225193$

$S_{2k} = -1513.5225193$

$D := \frac{1}{k_x^2} + \frac{1}{k_y^2} + \frac{1}{k_z^2}$

$D = 1$

$S_{kx} := \sqrt{1 + k_1^2 + k_2^2} \cdot (x_{mk} - x_{m0})$ $S_{kx} = 1513.5225193$

$S_{ky} := \sqrt{1 + \left(\frac{1}{k_1}\right)^2 + k_3^2} \cdot (y_{mk} - y_{m0})$ $S_{ky} = 1513.5225193$

$S_{kz} := \sqrt{1 + \left(\frac{1}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{k_3}\right)^2} \cdot (z_{mk} - z_{m0})$ $S_{kz} = -1513.5225193$

$T := T_{1k}$

$S_x(t) := S_{kx} \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right)$ $S_y(t) := S_{ky} \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right)$ $S_z(t) := S_{kz} \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right)$

$x_{mp}(t) := \frac{S_x(t) + x_{m0} \cdot k_x}{k_x}$ $x_{mp}(2) = -289.8261151$

$y_{mp}(t) := \frac{S_y(t) + y_{m0} \cdot k_y}{k_y}$ $S_x(0) = 0$

$z_{mp}(t) := \frac{S_z(t) + z_{m0} \cdot k_z}{k_z}$

$x_{mp}(t) =$

-297.251
-297.25
-297.243
-297.225
-297.19
-297.131
-297.045
-296.924
-296.763
-296.557
-296.301
-295.989
-295.615
-295.175
-294.664

$y_{mp}(t) =$

1129.7067108
1129.7073041
1129.7114566
1129.7227217
1129.7446422
1129.7807444
1129.8345325
1129.9094839
1130.0090431
1130.1366169
1130.2955689
1130.4892144
1130.7208153
1130.993575
1131.3106336

$z_{mp}(t) =$

740.4942717
740.4921237
740.4770915
740.4363106
740.3569565
740.2262636
740.0315458
739.7602152
739.399802
738.9379736
738.3625534
737.6615398
736.8231243
735.8357102
734.6879301

$$\phi := 0.323$$

$$l_4 := \sqrt{\left(za \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) - OO_1\right)^2 + \left(yb - za \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)\right)^2}$$

$$l_4 = 911.8948391$$

$$l_{2p}(t) := \sqrt{(xmp(t) - xb)^2 + (ymp(t))^2 + zmp(t)^2} \quad l_{4p}(t) := l_4 + (L4kn - l_4) \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right)$$

$$l_{3p}(t) := \sqrt{(xmp(t) - xc)^2 + (ymp(t))^2 + zmp(t)^2}$$

$l_{2p}(t) =$

1500
1499.9989703
1499.9917646
1499.9722171
1499.9341836
1499.8715535
1499.7782637
1499.6483127
1499.4757758
1499.2548219
1498.9797302
1498.6449082
1498.2449105
1497.7744576
1497.228456
...

$l_{3p}(t) =$

1352
1351.9993602
1351.9948829
1351.9827375
1351.9591084
1351.9202043
1351.8622693
1351.7815949
1351.6745337
1351.5375136
1351.367054
1351.1597822
1350.9124515
1350.6219594
1350.2853666
...

$l_{4p}(t) =$

911.8948391
911.8954806
911.8999698
911.9121484
911.9358463
911.9748759
912.0330256
912.1140545
912.2216868
912.3596052
912.5314461
912.7407938
912.9911745
913.2860515
913.6288195
...

$$z_a(t) := \frac{O1A^2 - l_{4p}(t)^2 - yb^2 + zd^2 + yb \cdot \left[l_{4p}(t)^2 \cdot yb - O1A^2 \cdot yb + zd \cdot \sqrt{(O1A^2 + 2 \cdot O1A \cdot l_{4p}(t) + l_{4p}(t)^2 - yb^2 - zd^2)} \cdot (2 \cdot O1A \cdot l_{4p}(t) - O1A^2 - l_{4p}(t)^2 + yb^2 + zd^2) + yb \cdot zd^2 + yb^3 \right]}{2 \cdot zd}$$

$$y_a(t) := \sqrt{l_{4p}(t)^2 - (z_a(t) - zd)^2 - y_o} \quad l_{ip}(t) := \sqrt{(xmp(t))^2 + (ymp(t) - y_a(t))^2 + (zmp(t) - z_a(t))^2}$$

$$y_a(t) := \sqrt{l_{4p}(t)^2 - (z_a(t) - zd)^2 - y_o} \quad l_{ip}(t) := \sqrt{(xmp(t))^2 + (ymp(t) - y_a(t))^2 + (zmp(t) - z_a(t))^2}$$

$z_a(t) =$

711.2155862
711.215841
711.2176242
711.2224618
711.2318743
711.2473741
711.2704623
711.3026248
711.3453294
711.4000211
711.4681188
711.5510107
711.6500502
711.7665511
711.9017834
...

$y_a(t) =$

-238.0596353
-238.058874
-238.0535464
-238.0390931
-238.0109683
-237.9646462
-237.8956273
-237.7994447
-237.6716693
-237.5079156
-237.3038472
-237.0551816
-236.7576949
-236.4072266
-235.9996839
...

$l_{ip}(t) =$

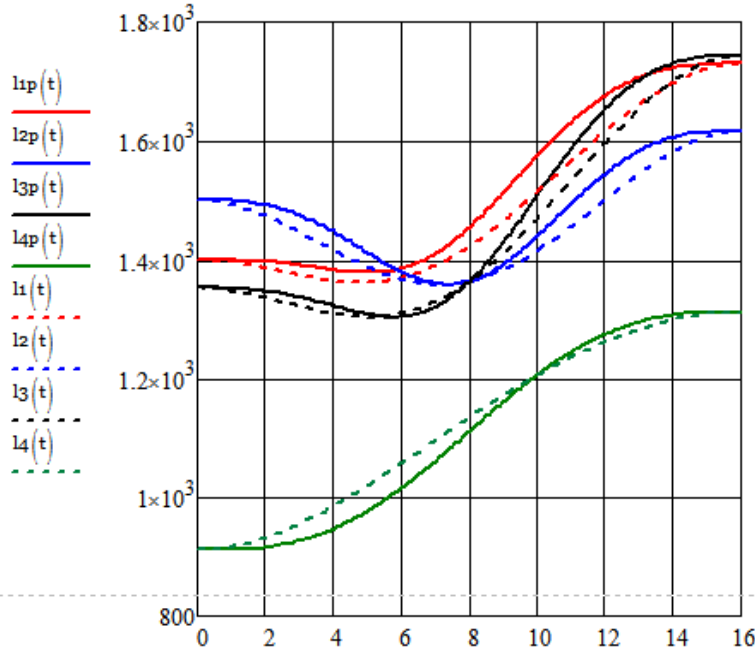
1400
1399.9995825
1399.9966609
1399.9887358
1399.9733189
1399.9479403
1399.9101572
1399.8575646
1399.7878065
1399.6985891
1399.587694
1399.4529941
1399.2924686
1399.1042202
1398.8864925
...

$$\phi_k := -0.4919$$

$$\phi_0 := \phi$$

$$\phi(t) := \left[\frac{-2 \cdot (\phi_k - \phi_0)}{T^3} \cdot t^3 + \frac{3 \cdot (\phi_k - \phi_0)}{T^2} \cdot t^2 + \phi_0 \right]$$

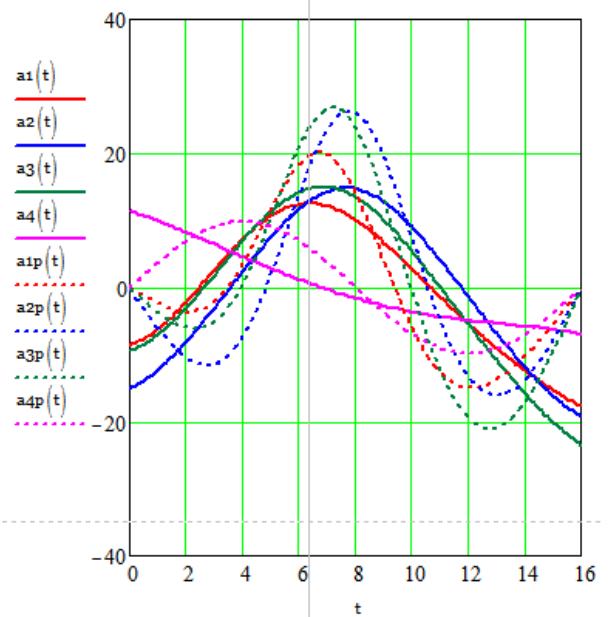
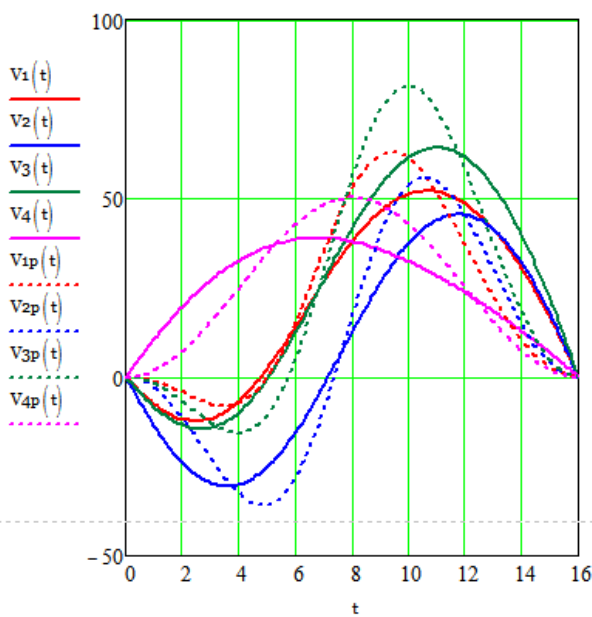
$$l_1(t) := \sqrt{(OK - OA \cdot \sin(\phi(t)))^2 + (OA \cdot \cos(\phi(t)) - DK)^2}$$



$$V_{1p}(t) := \frac{d}{dt} l_{1p}(t) \quad V_{2p}(t) := \frac{d}{dt} l_{2p}(t) \quad V_{3p}(t) := \frac{d}{dt} l_{3p}(t) \quad V_{4p}(t) := \frac{d}{dt} l_{4p}(t) \quad a_{1p}(t) := \frac{d}{dt} V_{1p}(t) \quad a_{2p}(t) := \frac{d}{dt} V_{2p}(t) \quad a_{3p}(t) := \frac{d}{dt} V_{3p}(t) \quad a_{4p}(t) := \frac{d}{dt} V_{4p}(t)$$

$$V_{1p}(t) := \frac{d}{dt} l_{1p}(t) \quad V_{2p}(t) := \frac{d}{dt} l_{2p}(t) \quad V_{3p}(t) := \frac{d}{dt} l_{3p}(t) \quad V_{4p}(t) := \frac{d}{dt} l_{4p}(t) \quad a_{1p}(t) := \frac{d}{dt} V_{1p}(t) \quad a_{2p}(t) := \frac{d}{dt} V_{2p}(t) \quad a_{3p}(t) := \frac{d}{dt} V_{3p}(t) \quad a_{4p}(t) := \frac{d}{dt} V_{4p}(t)$$

$$V_1(t) := \frac{d}{dt} l_1(t) \quad V_2(t) := \frac{d}{dt} l_2(t) \quad V_3(t) := \frac{d}{dt} l_3(t) \quad V_4(t) := \frac{d}{dt} l_4(t) \quad a_1(t) := \frac{d}{dt} V_1(t) \quad a_2(t) := \frac{d}{dt} V_2(t) \quad a_3(t) := \frac{d}{dt} V_3(t) \quad a_4(t) := \frac{d}{dt} V_4(t)$$



$$F1 := \begin{pmatrix} F1^{(0)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad F2 := \begin{pmatrix} F2^{(0)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad F3 := \begin{pmatrix} F3^{(0)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad F4 := \begin{pmatrix} F4^{(0)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad F5 := 0.001 \quad \lambda6 := -0.9 \quad l5_o := 300$$

Given

$$F1 \cdot \frac{x_o}{m \cdot l1_o} + F2 \cdot \frac{x_o - xb}{m \cdot l2_o} + F3 \cdot \frac{x_o + xb}{m \cdot l3_o} + F5 \cdot \frac{x_o - xe}{m \cdot l5_o} - \frac{\lambda6}{m} \cdot (ze + OA1 \cdot \sin(\phi_o)) = \frac{aax}{1000}$$

$$F1 \cdot \frac{y_o + OA1 \cdot \sin(\phi_o)}{m \cdot l1_o} + F2 \cdot \frac{y_o}{m \cdot l2_o} + F3 \cdot \frac{y_o}{m \cdot l3_o} + F5 \cdot \frac{y_o - ye}{m \cdot l5_o} + \frac{\lambda6}{m} \cdot xe = \frac{aay}{1000}$$

$$F1 \cdot \frac{z_o - OA1 \cdot \cos(\phi_o)}{m \cdot l1_o} + F2 \cdot \frac{z_o}{m \cdot l2_o} + F3 \cdot \frac{z_o}{m \cdot l3_o} + F5 \cdot \frac{z_o - ze}{m \cdot l5_o} - g = \frac{aaz}{1000}$$

$$F1 \cdot \frac{(y_o) \cdot \cos(\phi_o) + z_o \cdot \sin(\phi_o)}{OA1 \cdot ma \cdot l1_o} + F4 \cdot \frac{zd \cdot \sin(\phi_o) - yb \cdot \cos(\phi_o)}{OA1 \cdot ma \cdot l4_o} + \frac{g \cdot \sin(\phi_o)}{OA1} - \lambda6 \cdot \frac{(x_o - xe) \cdot \cos(\phi_o)}{OA1 \cdot ma} = \frac{a\epsilon}{1000}$$

BB(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, x_o, y_o, z_o, phi_o) := Find(F5, xe, ye, ze)

$$BB(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, x_o, y_o, z_o, \phi_o) = \begin{pmatrix} 150.7815162 \\ -113.9879153 \\ 1333.0444593 \\ -135.0166166 \end{pmatrix} \quad F1 = 0$$

$$F5 := \begin{pmatrix} mmm2^{(0)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad xe := \begin{pmatrix} mmm2^{(1)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad ye := \begin{pmatrix} mmm2^{(2)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad ze := \begin{pmatrix} mmm2^{(3)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad n := \begin{pmatrix} mmm2^{(4)} \\ 0 \end{pmatrix}_0$$

$$F1 := \begin{pmatrix} mmm^{(0)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad F2 := \begin{pmatrix} mmm^{(1)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad F3 := \begin{pmatrix} mmm^{(2)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad F4 := \begin{pmatrix} mmm^{(3)} \\ 0 \end{pmatrix}_0 \quad n := \begin{pmatrix} mmm^{(20)} \\ 0 \end{pmatrix}_0$$

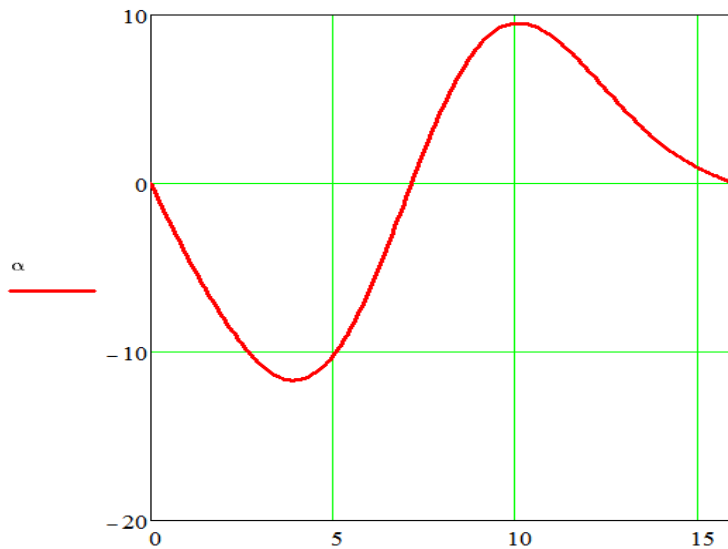
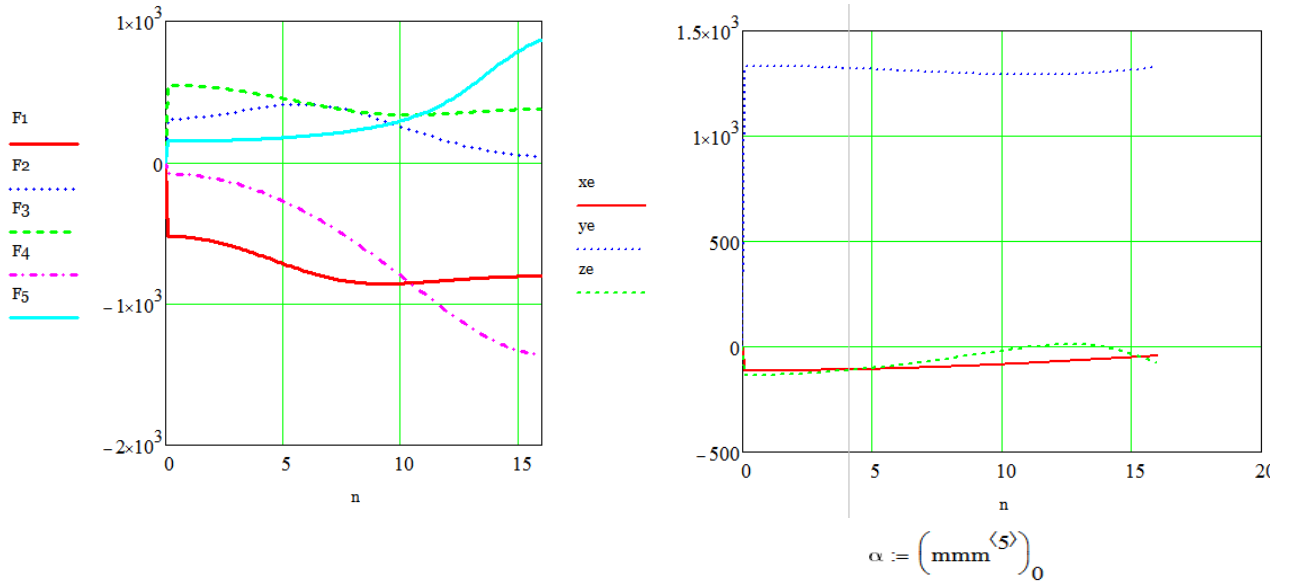
0	
0	0
1	-520.5264667
2	-520.8281014
3	-521.3278129
4	-522.0231919
5	-522.9118734
6	-523.9915308
7	-525.2598701
8	-526.7146223
9	-528.353536
10	-530.1743692
11	-532.1748798
12	-534.3528166
13	-536.7059092
14	-539.2318571
15	...

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	...

0	
0	0
1	547.0705298
2	546.9351783
3	546.7109135
4	546.3987703
5	545.9997455
6	545.5147995
7	544.9448592
8	544.2908195
9	543.5535461
10	542.7338775
11	541.8326277
12	540.8505889
13	539.788534
14	538.6472196
15	...

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	...

0	
0	0
1	150.7908908
2	150.8189434
3	150.8655774
4	150.9307099
5	151.0142716
6	151.116206
7	151.23647
8	151.3750331
9	151.5318778
10	151.7069989
11	151.9004039
12	152.1121128
13	152.3421579
14	152.590584
15	...



$ii := 50 \quad n := 1 \quad \eta := 0.75$

$p := \frac{5}{1000} \quad d_3 := \frac{25}{1000} \quad f := 0.1 \quad \alpha := 30\text{deg} = 0.5235988 \quad t_w := 0$

$\tan(\beta_3) = \frac{p \cdot n}{\pi \cdot d_3} \quad \tan(\varphi_3) = \frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad \text{atan}\left(\frac{n \cdot p}{\pi \cdot d_3}\right) = 0.0635762 \quad \text{atan}\left(\frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = 0.1031601$

$\frac{\text{atan}\left(\frac{n \cdot p}{\pi \cdot d_3}\right)}{\text{deg}} = 3.6426469 \quad \beta_3 := 3.6426469 \quad \varphi_3 := 5.9106389$

$\frac{\text{atan}\left(\frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right)}{\text{deg}} = 5.9106389$

$m_1 := 0.3 \quad m_3 := 0.2 \quad R := 0.06 \quad l_{1_o} := \frac{l_1(0)}{1000} \quad l_{2_o} := \frac{l_2(0)}{1000} \quad l_{3_o} := \frac{l_3(0)}{1000} \quad l_{4_o} := \frac{l_4(0)}{1000}$
 $l_{1_o} = 1.4 \quad l_{2_o} = 1.5 \quad l_{3_o} = 1.352 \quad l_{4_o} = 0.9118948$
 $I := \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2 \quad Mc_{21} := 0 \quad Mc_{22} := 0 \quad Mc_{23} := 0 \quad Mc_{24} := 0$

$F_1 := \left[\left(mmm^{(0)} \right)_0 \right]$ $F_2 := \left[\left(mmm^{(1)} \right)_0 \right]$ $F_3 := \left[\left(mmm^{(2)} \right)_0 \right]$ $F_4 := \left[\left(mmm^{(3)} \right)_0 \right]$
 $F_{1_o} := \left[\left(mmm^{(0)} \right)_{0,1} \right]$ $F_{2_o} := \left[\left(mmm^{(1)} \right)_{0,1} \right]$ $F_{3_o} := \left[\left(mmm^{(2)} \right)_{0,1} \right]$ $F_{4_o} := \left[\left(mmm^{(3)} \right)_{0,1} \right]$

$F_{1_o} = -520.5264667 \quad F_{2_o} = 306.4868668 \quad F_{3_o} = 547.0705298 \quad F_{4_o} = -78.9998307 \quad 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) = 0.0014537$

Given

$$\frac{1}{ii \cdot \eta} \cdot \left[\left(I \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3 \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{1_o} + Mc_{21} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot F_{1_o} \right] = 0$$

$$\frac{1}{ii \cdot \eta} \cdot \left[\left(I \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3 \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{2_o} + Mc_{22} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot F_{2_o} \right] = 0$$

$$\frac{1}{ii \cdot \eta} \cdot \left[\left(I \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3 \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{3_o} + Mc_{23} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot F_{3_o} \right] = 0$$

$$\frac{1}{ii \cdot \eta} \cdot \left[\left(I \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3 \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{4_o} + Mc_{24} + 0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot F_{4_o} \right] = 0$$

moment(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, F1_o, F2_o, F3_o, F4_o) := Find(Mc21, Mc22, Mc23, Mc24)

$$\text{moment}(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, F1_o, F2_o, F3_o, F4_o) = \begin{pmatrix} 0.756702 \\ -0.4455474 \\ -0.7952898 \\ 0.114844 \end{pmatrix}$$

$t := 0$ $pp := 0$
 mmm2 := for $i \in 1 \dots 130$

```

t ← t + 0.1
pp ← pp + 1

l1(t)
l1_o ←  $\frac{l1(t)}{1000}$ 

l2(t)
l2_o ←  $\frac{l2(t)}{1000}$ 

l3(t)
l3_o ←  $\frac{l3(t)}{1000}$ 

l4(t)
l4_o ←  $\frac{l4(t)}{1000}$ 

F1_o ←  $\left[ \left( mmm^{(0)} \right)_0 \right]_{pp}$ 

F2_o ←  $\left[ \left( mmm^{(1)} \right)_0 \right]_{pp}$ 

F3_o ←  $\left[ \left( mmm^{(2)} \right)_0 \right]_{pp}$ 

```

```

F4_o ← [ (mmm<sup>3</sup>) ]
         [ 0 ]_pp
otvet ← moment(l1_o, l2_o, l3_o, l4_o, F1_o, F2_o, F3_o, F4_o)
Mc21_i ← [ (otvet<sup>0</sup>) ]
          [ 0 ]
Mc22_i ← [ (otvet<sup>0</sup>) ]
          [ 1 ]
Mc23_i ← [ (otvet<sup>0</sup>) ]
          [ 2 ]
Mc24_i ← [ (otvet<sup>0</sup>) ]
          [ 3 ]
nn_i ← t
(Mc21 Mc22 Mc23 Mc24 nn )

```

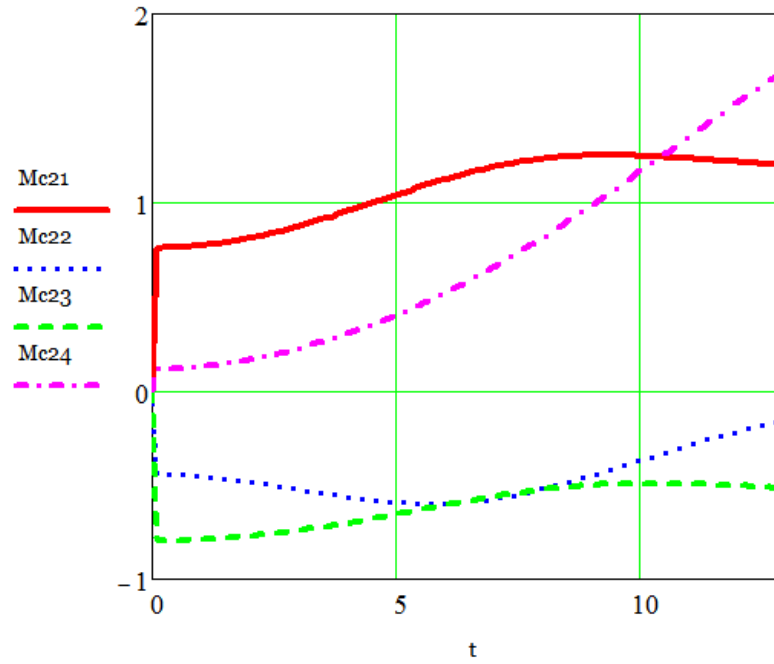
$$mmm2 = \{ \{131,1\} \quad \{131,1\} \quad \{131,1\} \quad \{131,1\} \quad \{131,1\} \}$$

$$\underline{Mc21} := \left(mmm2^{(0)} \right)_0 \quad \underline{Mc22} := \left(mmm2^{(1)} \right)_0 \quad \underline{Mc23} := \left(mmm2^{(2)} \right)_0 \quad \underline{Mc24} := \left(mmm2^{(3)} \right)_0 \quad \underline{t} := \left(mmm2^{(4)} \right)_0$$

$$mmm2 = \{ \{131,1\} \quad \{131,1\} \quad \{131,1\} \quad \{131,1\} \quad \{131,1\} \}$$

$$\underline{Mc21} := \left(mmm2^{(0)} \right)_0 \quad \underline{Mc22} := \left(mmm2^{(1)} \right)_0 \quad \underline{Mc23} := \left(mmm2^{(2)} \right)_0 \quad \underline{Mc24} := \left(mmm2^{(3)} \right)_0 \quad \underline{t} := \left(mmm2^{(4)} \right)_0$$

		0		0		0		0		0	
	0		0	0		0		0		0	
	1		0.756702	1		-0.4455474	1		0.114844	1	0.1
	2		0.7571405	2		-0.4458819	2		0.1152346	2	0.2
	3		0.757867	3		-0.4464353	3		0.1158818	3	0.3
	4		0.7588779	4		-0.447204	4		0.1167827	4	0.4
	5		0.7601698	5		-0.4481842	5		0.1179345	5	0.5
	6		0.7617393	6		-0.4493717	6		0.1193345	6	0.6
Mc21 =	7		0.7635831	7		-0.4507619	7		0.1209801	7	0.7
	8		0.7656979	8		-0.45235	8		0.122869	8	0.8
	9		0.7680804	9		-0.454131	9		0.1249987	9	0.9
	10		0.7707274	10		-0.4560995	10		0.1273671	10	1
	11		0.7736356	11		-0.45825	11		0.129972	11	1.1
	12		0.7768017	12		-0.4605764	12		0.1328115	12	1.2
	13		0.7802225	13		-0.4630726	13		0.1358835	13	1.3
	14		0.7838945	14		-0.4657322	14		0.1391862	14	1.4
	15		...	15		...	15		...	15	...



$$Mc_{11} \leftarrow 0.5$$

$$Mc_{12} \leftarrow 0.2$$

$$Mc_{13} \leftarrow 0.2$$

$$Mc_{14} \leftarrow 0.8$$

$$Mc_{21} \leftarrow 2$$

$$Mc_{22} \leftarrow 1$$

$$Mc_{23} \leftarrow 1$$

$$Mc_{24} \leftarrow 5$$

$$Mk_1 \leftarrow \left[\left(I_1 \cdot \frac{2\pi \cdot ii}{p \cdot n} + I_2 \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n \cdot ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3}{ii \cdot \eta} \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{1_o} + Mc_{11} + \frac{Mc_{21}}{ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3)}{ii \cdot \eta} \cdot F_{1_o} \right]$$

$$Mk_2 \leftarrow \left[\left(I_1 \cdot \frac{2\pi \cdot ii}{p \cdot n} + I_2 \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n \cdot ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3}{ii \cdot \eta} \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{2_o} + Mc_{12} + \frac{Mc_{22}}{ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3)}{ii \cdot \eta} \cdot F_{2_o} \right]$$

$$Mk_3 \leftarrow \left[\left(I_1 \cdot \frac{2\pi \cdot ii}{p \cdot n} + I_2 \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n \cdot ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3}{ii \cdot \eta} \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{3_o} + Mc_{13} + \frac{Mc_{23}}{ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3)}{ii \cdot \eta} \cdot F_{3_o} \right]$$

$$Mk_4 \leftarrow \left[\left(I_1 \cdot \frac{2\pi \cdot ii}{p \cdot n} + I_2 \cdot \frac{2\pi}{p \cdot n \cdot ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3) \cdot m_3}{ii \cdot \eta} \right) \cdot \frac{d^2}{dt^2} l_{4_o} + Mc_{14} + \frac{Mc_{24}}{ii \cdot \eta} + \frac{0.45 \cdot d_3 \cdot \tan(\beta_3 + \varphi_3)}{ii \cdot \eta} \cdot F_{4_o} \right]$$

$$nn_1 \leftarrow t$$

$$(Mk_1 \quad Mk_2 \quad Mk_3 \quad Mk_4 \quad nn_1)$$

$$Mk1 := \left(mmm3^{(0)} \right)_0 \quad Mk2 := \left(mmm3^{(1)} \right)_0 \quad Mk3 := \left(mmm3^{(2)} \right)_0 \quad Mk4 := \left(mmm3^{(3)} \right)_0 \quad t_{**} := \left(mmm3^{(4)} \right)_0$$

