Казахский национальный университет имени аль-Фараби

УДК 551.24:531.8:621.865.8

На правах рукописи

КАИМОВ СУЛЕЙМЕН ТАЛГАТОВИЧ

Разработка математического и программного обеспечения систем управления мобильным роботом с адаптивным исполнительным механизмом захвата, имитирующего движения руки человека

6D060300 – Механика

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)

Отечественный научный консультант:
Темирбеков Ербол Садуахасович,
доктор технических наук, профессор
Зарубежный научный консультант:
Ceccrelli Marco, Doctor of Science, professor

Республика Казахстан
Алматы, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 6
1.**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОГО ЗАХВАТЫВАНИЯ В СХВАТЕ ТВЭЛ-А РАЗЛИЧНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ФАЛАНГ (ПАЛЬЦЕВ) РОБОТА**..... 22
1.1 Конструктивные особенности зоны тепловыделяющих сборок (ТВС) АЭС…..... 22
1.2 Задача о захватывании кругового кольца двумя рабочими элементами…… 25
1.3 Захватывание кольца тремя рабочими элементами 31
1.4 Захватывание кольца при четырех, шести и восьми точках контакта . 33
Краткие выводы по разделу 39
2.**ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОГО СХВАТА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТВЭЛ-А ИЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТЕЙНЕРА С ТВРАО В ПОЛОСТЬ (ПОЛОСТИ) ОСНОВНОГО КОНТЕЙНЕРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ БЛОКА КРЕПКОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ**..... 40
2.1 Математическое и компьютерное моделирование двухфалангового схвата для перегрузки ТВЭЛ-а 45
2.2 Математическое и компьютерное моделирование трехфалангового адаптивного схвата для перегрузки ТВЭЛ-а..... 48
2.3 Выбор и обоснование геометрических структурно-кинематических параметров адаптивного схвата робота с учетом стохастической среды его функционирования для перегрузки ТВЭЛ-а 51
Краткие выводы по разделу 61
3. **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНОГО СХВАТА РОБОТА НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕГРУЗКИ АГРОСАДОВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ** 62
3.1 Математическая модель построения перспективного облика дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а, агросадоводческой продукции из транспортного контейнера в основной 62
3.2 Конструктивные особенности схвата для перегрузки агросадоводческой продукции..... 66
3.3 Разработка модернизированного двухфалангового схвата для агросадоводческой продукции..... 72
3.4 Прототип и экспериментальные испытания 77
Краткие выводы по разделу 87
4. **ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С АДАПТИВНЫМ СХВАТОМ ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ РАЗМЕРЫ**..... 88

Краткие выводы по разделу 95
Основные выводы и заключение по диссертации 96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 99
ПРИЛОЖЕНИЕ А 104
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 106

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АН	Академия Наук
АЭС	Атомная электростанция
ВВЭР	Водо-Водяной Энергетический Реактор
ВИЭ	возобновляемые источники энергии
ГТЭ	Гибкий тяговый элемент
ЕС	Европейского союз
ЗУ	захватные устройства
КазНУ	Казахский национальный университет
КазССР	Казахская Советская Социалистическая Республика
КПЧС	катастрофических природных чрезвычайных ситуаций
ЛППВ	любого по продолжительности периода времени
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
МОН РК	Министерство образовании и науки Республики Казахстан
МРМ ПР	механическая рука манипулятора промышленного робота
НОУ	низкообогащенный уран
ООН	Организация Объединённых Наций
ОЭСР	Организация экономического сотрудничества и развития
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо
ПР	Промышленный робот
РАО	радиоактивные отходы
РБМК	Реактор большой мощности канальный
САПР	Система автоматизированного проектирования
СПП	Сборочно-промежуточный пункт
СС	Степень свободы
СУЗ	Системы управления и защиты
ТВС	Тепловыделяющие сборки
ТВРАО	Твердый радиоактивный отход
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент
ТММ	Теория механизмов и машин
ТЧС	техногенных чрезвычайных ситуаций
УАПП	Универсальный асинхронный приёмопередатчик

ФРГ	Федеративной республики Германия
ЦБУ	Центральный блок управления
ЯТ	Ядерное топливо
ЯЦТ	ядерный топливный цикл

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Как известно, для решения актуальной современной проблемы улучшения климата на Земле, для решения которой в декабре 2015 года в Париже состоялась конференция ООН, на которой всем странам мира было рекомендовано принять свои национальные программы по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу Земли для улучшения климата. В связи с данными обстоятельствами каждый гражданин РК должен стремиться предложить инновационные технические, техногенные решения, направленные на совершенствование технологических процессов производства промышленной [56] и др. продукции в стране, главнейшей из которых является генерация электроэнергии. Одним из актуальных и перспективных направлений совершенствования технологии производства электроэнергии является часть ее, получаемая при эксплуатации атомной электростанции (АЭС), работающей на ядерном топливе, созданном из урансодержащих минералов, например, уран и др., геологические запасы которых в РК являются значительными в мире. РК занимает 1-2 место по запасам урансодержащих минералов среди всех стран мира.

В настоящий период времени АЭС эксплуатируется в 30 странах мира, где электроэнергия вырабатывается на 401 реакторе. При этом количество электроэнергии, вырабатываемой на АЭС в странах мира, составляет 5,6% от всего его количества, вырабатываемой в мире. При эксплуатации АЭС в атмосферу Земли не выбрасываются парниковые газы, что является несомненным ее преимуществом. Но, после окончания эксплуатации АЭС образуются твердые высокорадиоактивные отходы (ТВРАО), являющиеся чрезвычайно опасными для животного и растительного мира на Земле. За десятки лет эксплуатации АЭС в разных странах мира не созданы 100 – процентов безопасные способы захоронения ТВРАО. На современном этапе цивилизации человечества дальнейшее ее эффективное развитие невозможно без использования различных видов энергии, потребляемой при производстве разнообразной продукции и используемой в каждодневной жизни человека. При этом производство энергии играет решающую роль в формировании экономической, экологической безопасности и социального благополучия населения любого государства. Основные современные источники генерирования разных видов энергии следующие: большая часть (87%) энергии (тепло, электроэнергия) в странах мира вырабатывается за счет использования ископаемых видов топлива: нефти (39%), угля (26%), природного газа (22%); гидроэнергия (6%); возобновляемые источники энергии (ВИЭ)(1%); атомная энергия (6%) [1]. Количество энергии, производимой различными источниками ее, в настоящий период приведено в таблице 1[1].

Таблица 1 – Количество энергии, производимой различными источниками ее

Современные источники генерации энергии	Количество энергии, производимой определенным источником ее от общего количества ее, получаемой в течение года, %
Ископаемые виды топлива, %: - нефть - уголь - природный газ	87 39 26 22
Гидроэнергия, %	6
Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), %	1
Атомная энергия, %	6

Огромный задел возможностей в общей системе генерации электроэнергии и тепла сосредоточен в атомной энергетике. Наряду с ВИЭ атомная энергетика остается одной из существенных альтернатив по использованию органического топлива для производства электроэнергии и тепла. Актуальность атомной энергетики заключается в том, что запасы ископаемого топлива в странах мира сокращаются, а его использование в производстве электроэнергии накладывает существенную нагрузку на экологию окружающей среды на Земле. Большая часть выбросов парниковых газов в атмосферу происходит именно при сжигании органического топлива: угля, торфа, нефтепродуктов и природных газов. Так, в результате эксплуатации угольных электростанций в атмосферу ежегодно попадает 24 млрд. тонн углекислого газа (CO_2). В этих условиях использование атомной энергии – это также один из существенных способов снижения углеродной эмиссии в атмосферу.

Мировые энергетические ресурсы, сосредоточены в разных странах мира (оценки 2001 года), приведены в таблице 2 [1].

Таблица 2 – Мировые энергетические ресурсы (оценки на 2001 год)

Вид полезных ископаемы для производства электроэнергии	Средне-годовое потребление	Доказанные геологические запасы полезных ископаемых	Геологические запасы полезных ископаемых с учетом их доли потенциальных геологических запасов	Период времени использования доказанных геологических запасов полезных ископаемых при современном уровне энергопотребления, лет
Нефть, млрд.т	3,4	150	360	50-100
Газ, трлн.$м^3$	2,0	150	260	70-130

Продолжение таблицы 2

Уголь, лигнит, млрд.т, у.т.*	3,4	250	720	70-200
Уран, млн.т*	0,064	4	9	60-140 – без регенерации топлива. 180 – 400 - с регенерацией облученного топлива и использованием выделенного урана и плутония, 10000 и более – при регенерации топлива и использовании быстрых реакторов
*Поскольку угли разных пород и разных месторождений отличаются по своей теплотворной способности, в практических условиях используется единица измерения «тонна условного топлива» (т у.т.). Она соответствует количеству тепла, которое выделяется при сжигании 1 тонны топлива (любого, не только угля), 1 т у.т. = 29 ГДж. Например, 1 т торфа соответствует около 0,3 т у.т., бурого угля – 0,5, каменного угля – 0,75, бензина – 1,5				

Хотя положение нефти и угля остается еще доминирующим, их доля в производстве энергии несколько десятилетий назад начала стремительно снижаться, уступая природному газу и ядерной энергии. Электроэнергия составляет около трети (35%) от общего потребления энергии. Ископаемое топливо обеспечивает около 63% общего объема выработки электроэнергии в странах мира, в том числе, нефть – 10%, уголь – 38%, газ – 15%, и гидроэлектроэнергия – 18%, ВИЭ – 2% и др. – 7%.

В странах Европейского союза (ЕС) общие энергопотребности удовлетворяются следующим образом: за счет нефти – 41%, твердого топлива (антрацит, бурый уголь и торф) – 22%, газа – 16%, гидроэнергии и ВИЭ – 6%, атомной энергетики на 16-18% [1].

В большинстве развитых стран значительную долю электроэнергии производят на АЭС. Даже правительство Федеративной республики Германии (ФРГ) и Швеции, которые по политическим соображениям высказались против атомной энергетики, продолжают активно ее производить и использовать. В общем тенденция такова: слаборазвитые страны мира не имеют АЭС, технически и экономические развитые страны имеют, как правило, мощную атомную энергетику, интенсивно развивающиеся страны (например, Южная Корея, Китай, Индия, Турция), заявляют о планах расширения мощностей своей атомной энергетики и последовательно воплощают в практических условиях эти намерения.

В Казахстане еще не построено ни одной АЭС. Атомная энергетика Казахстана имеет значительные перспективы для развития. Казахстан обладает большими сырьевыми запасами урановых руд. В республике развита инфраструктура для проведения фундаментальных и прикладных исследований, созданы высокотехнологичные и наукоемкие центры, такие как Национальный ядерный центр в Курчатове, институты ядерной физики и радиационной безопасности, обладающие современной лабораторно-

промышленной базой, включая установки «Токомак». На Ульбинском металлургическом заводе отработана технологическая цепочка, которая включает производство ядерного топлива (урановых таблеток), а в перспективе - и топливах сборок для ядерных реакторов атомных станций.

Правительство Республики Казахстан в 2002 г. приняло концепцию развития урановой промышленности и атомной энергетики на 2002-2030 годы, которая направлена на значительное преобразование энергетики Казахстана динамично развивающую отрасль, которая может стать надежной основой для развития экономики и повышения благосостояния народа. Сегодня Казахстан занимает первое место в мире по добыче урана и второе место по объемам запаса, обладает 19% мировых разведанных запасов урана [1]. Уранодобывающая и перерабатывающая промышленности Республики дают возможность для выполнения исследований в области ядерной физики и ядерной энергетики.

В Казахстане на берегу Каспийского моря с 1972 г. до ее остановки в 1999 г. успешно работала атомная электростанция с реактором БН-350, ее тепловая мощность была 650 МВт, а электрическая - до 120 МВт. Она использовалась также для опреснения морской воды. Имея опыт эксплуатации 25 лет 10 месяцев, Казахстан сейчас планирует построить одну или две атомных электростанций средней мощности.

Применение атомной энергетики сопровождается рисками радиационного внутреннего и внешнего облучения человека и ухудшения экологии окружающей среды. Этот вид выработки электроэнергии ведет к образованию и накоплению радиоактивных отходов (РАО), поскольку на современном этапе существования цивилизации человечество не владеет инструментами и методами превращения радиоактивной субстанции в нерадиоактивную, поэтому при работе АЭС необходимо создать условия, чтобы максимально уменьшить объем образующихся РАО, перевести их в инертную форму и надежно изолировать их от биосферы. И для развитых стран, и для стран с развивающейся ядерной инфраструктуры обращение с РАО является одним из приоритетных направлений научных исследований и технических разработок [1].

Против ядерной энергетики первыми заявили Австрия, Дания, Ирландия. Однако в 2011 г, по данным МАГАТЭ, 12,3% электроэнергии в мире получено на АЭС. Министры стран, входящие Европейский Союз (Болгария, Великобритания, Венгрия, Испания, Литва, Польша, Румыния, Словакия, Финляндия, Франция и Чехия) в Лондоне заявили о приоритетности для их стран развития ядерной энергетики, и это является для этих стран стратегическим важным элементом.

Главной причиной данной ситуации является следующее обстоятельство: до настоящего периода времени (2015 год) во всех странах мира не создано абсолютно безопасного (100-процентного) в течение любого по продолжительности периода времени (ЛППВ) способа (способов) захоронения ТВРАО, образующихся при эксплуатации АЭС, в хранилище с учетом

воздействия на него катастрофических природных чрезвычайных ситуаций (КПЧС) и техногенных чрезвычайных ситуаций (ТЧС).

В настоящий период времени в мире накоплено около 300 тысяч тонн отработавшего ядерного топлива (ТВРАО), а в России – 20000 тонн (ТВРАО). Хранение ТВРАО в принципе представляет потенциальную опасность для окружающего животного и растительного мира. Следовательно, ТВРАО должны быть переработаны и окончательно надежно удалены из сферы деятельности человека, а при длительном хранении ТВРАО должна быть обеспечена максимально возможная степень безопасности.

Проблема обращения с ТВРАО в плане социальной приемлемости имеют определенную специфику, так как связаны с необходимостью оперировать временными интервалами в сотни и тысячи лет. Это приводит к ситуации, когда нынешняя технологическая деятельность человечества заведомо проецируется на последующее поколения населения Земли, что дополнительно осложняет как планирование ядерной энергетики в странах мирового сообщества, так и выбор участков территории определенной страны (стран) для хранения и захоронения ТВРАО.

Радиологическая опасность РАО, а следовательно, и необходимая продолжительность их контролируемого хранения должна составлять: - до 300 лет – для отходов низкого и среднего уровней активности, содержащих продукты активации и малое количество долгоживущих продуктов деления; - до 1000 лет – для высокоактивных отходов (ТВРАО), содержащих долгоживущие продукты деления; - более 1000 лет – для отходов, содержащих трансурановые элементы [1].

Радиоактивные отходы, образующиеся на АЭС в период эксплуатации, относятся в основном к низко активным отходам и содержат радионуклиды с периодом полураспада менее 30 лет. Количество высокоактивных отходов составляет менее 1% общего количества РАО.

Производство атомной энергии является одним из основных направлений развития мировой энергетики в настоящее время. Однако результатом работы предприятий ядерной энергетики является образование радиоактивных отходов (РАО). В основном, это связано с деятельностью атомных электростанций (АЭС), предприятий по добыче и переработке урановых руд, морского и гражданского атомных флотов. В настоящее время в нашей стране скопилось значительное количество радиоактивных отходов. Особенно неблагоприятная ситуация сложилась в Казахстане. Кроме того, приповерхностные хранилища не могут полностью гарантировать радиоэкологическую безопасность их эксплуатации. Весьма тяжелая ситуация существует со складированием РАО.

Изоляция радиоактивных отходов является важной и насущной проблемой для стран, которые используют атомную энергию. Исследователи со всего мира сошлись во мнении, что использование подземного пространства является наилучшим выбором для долговременного хранения РАО.

США, Бельгия, Канада, Китай, Финляндия, Франция, Германия, Япония, Россия, Испания, Швеция, Швейцария и Великобритания инвестируют

значительные средства в программы обращения с радиоактивными отходами.

Общий подход к созданию подземного хранилища заключается в выборе площадки, пригодной для захоронения РАО, геологической оценки, разработке схемы подземного хранилища, выбора типа контейнера для хранения РАО и других изолирующих материалов, системы транспортировки РАО до потенциального хранилища.

В качестве геологических формаций для размещения подземных хранилищ РАО в России и за рубежом применяются мощные слабопроницаемые массивы глин, каменной соли, гранита и прочих пород кристаллического типа.

По данным Всемирной атомной ассоциации в настоящий период времени во всех странах мира эксплуатируются 449 атомных реактора, еще 62 атомных реактора строятся и около 150 атомных реакторов запланированы для строительства. Мировым лидером в атомной энергетике являются США, где эксплуатируются более 100 атомных реакторов. Быстрее всех «мирный атом» развивает Китай. В Китае строятся 27 атомных реакторов, возведение еще 50 атомных реакторов запланировано в этой стране в будущий период времени [1].

При эксплуатации атомной электростанции (АЭС) образуются твердые высокорадиоактивные отходы (ТВРАО), являющиеся тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ-ами) после окончания их эксплуатации, тепловыделяющих сборок атомных реакторов. Радионуклиды, содержащиеся в ТВРАО, губительно действуют на биосферу Земли и резко ухудшают экологию окружающей среды. В настоящий период времени специалистами предусматривается осуществлять захоронение ТВРАО в подземных хранилищах (могильниках) ТВРАО. При осуществлении этой технологической операции ТВЭЛ-ы загружаются в промежуточный контейнер, который транспортируется от АЭС до сборочно-перегрузочного пункта (СПП), сооруженного возле подземного хранилища (могильника) ТВРАО. В СПП из промежуточного контейнера ТВРАО перегружаются в полость (полости), сформированную в теле основного контейнера (контейнеров), изготовленного из блока крепкой горной породы. Эту техническую операцию предусматривается осуществлять рабочим (рабочими) вручную с применением специальных приспособлений, когда он (они) находится непосредственно возле ТВРАО. Безусловно, при выполнении этой операции не обеспечивается требуемая безопасность труда рабочего (рабочих).

В настоящий период времени специалистами созданы инновационные способы перегрузки ТВЭЛ-а и/или ТВЭЛ-ов и др. из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера, изготовленного из блока крепкой горной породы, реализацию которых предусматривается осуществлять с применением инновационного схвата манипулятора промышленного робота (ПР) и мирового уровня инновационная конструкция трехфалангового адаптивного схвата - захватного устройства манипулятора ПР, которые представлены в работах профессоров М.Чикарелли,

Колпашникова С.Н., Челпанова И.Б., Батиста П.Е., Козлова В.В., Куафе Ф., Фролова К.В., Козлова В.В., Темирбекова Е.С., Мохаммед А.Х. и других [2-26].

Для научно-обоснованного выбора геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров конструктивных элементов инновационного схвата манипулятора ПР разработана математическая модель их расчета с учетом стохастических процессов их взаимодействия с объектом, т.е. с ТВЭЛ-ом. При этом точность оценки определения геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров конструктивных элементов трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР с учетом стохастических процессов взаимодействия его с верхним участком ТВЭЛ-а обеспечивается на основе определения оптимального весового коэффициента Калмана [2, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32-35].

Использование роботизированных захватных механизмов играют немаловажную роль не только в атомной энергетике, где технологический процесс генерирования электрической энергии производится в условиях опасных для жизни и здоровья обслуживающего персонала, но и в агропромышленности, например, при упаковке и сборе плодоовощной продукции и др. для автоматизации тяжелого ручного труда и др. Поэтому тема диссертации, где требуется автоматизация труда с использованием цифровой технологии является актуальной.

В качестве основной идеи, положенной в основу данного диссертационного исследования, является то, что требования высокого качества функционирования и расширения функциональных возможностей не всегда вытекает из необходимости значительного усложнения схемных и конструктивных решений захватных устройств и систем управления ими. Для достижения поставленной цели нередко удается обходиться самыми элементарными средствами и незначительной модернизацией имеющихся захватных устройств. Для обоснованного выбора схемных и технических решений, наиболее экономных в реализации, необходим научно-обоснованный выбор геометрических и структурно-кинематических параметров захватного устройства. В диссертационном исследовании мы вначале установили по отношению к каким факторам необходима адаптивность. Затем, определяли нельзя ли удовлетворить поставленным требованиям, принимая за основу традиционные схемные и технические решения, но выбирая оптимальные значения их параметров. Далее исследуется все возможные их модернизации, начиная с наиболее доступных, естественных и простых. И на последнем этапе, лишь только в тех случаях, когда эти приемы не дают результатов, мы переходили к рассмотрению более сложных технических решений для достижения поставленной цели.

Цель данной диссертационной работы заключается в разработке и создании адаптивного схвата дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки ТВЭЛ-а и/или ТВЭЛ-ов и др. из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера.

Объектом исследования являются промышленные роботы.

Предмет исследования – адаптивные схваты для перегрузки ТВЭЛ-ов АЭС.

В соответствии с поставленной целью определяются следующие **задачи исследования**:

- исследование обеспечения надежного захвата ТВЭЛ-а фалангами схвата;
- выбор и обоснование геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптирующегося схвата дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера, изготовленного из блока крепкой горной породы;
- разработка математического метода и компьютерной модели выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата;
- выбор и обоснование геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров исполнительного механизма адаптивного схвата с учетом условий стохастической среды его функционирования;
- выбор и обоснование архитектуры дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а;
- разработка и создание физического прототипа дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера, изготовленного из блока крепкой горной породы и его программная реализация.

Методы исследования: методы теоретической механики и ТММ, теории упругости и динамики элементов и конструкций; математические методы анализа и моделирования физико-технологических процессов, теория вероятностей и математическая статистика, теория игр, численные методы и теория передачи информации и цифровые технологии.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны научно-обоснованные критерии для выбора структурных и кинематических параметров адаптивного схвата дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнераой породы;
- разработан математический метод и компьютерная модель выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата с учетом условий стохастической среды его функционирования;
- разработаны и созданы конструкции трехфалангового и двухфалангового адаптивных схватов дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера, изготовленного из блока крепкой горной породы;

- разработана и создана физическая модель дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом, успешно протестированного в лабораторных условиях для перегрузки разных форм грузов;

- разработано программное обеспечение системы дистанционного управления мобильным роботом для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Полученные в работе результаты и сама концепция повышения точности геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата с учетом стохастической среды его функцнирования являются новыми, представляют научный и практический интерес и могут быть непосредственно применены в инженерии не только в Республике Казахстан, но и в других странах мира. По теме диссертации опубликовано более 17 научных работ, опубликованных в отечественных и зарубежных научных изданиях.

Научные положения, выносимые на защиту:

- научно-обоснованный метод выбора структурных и кинематических параметров адаптивного схвата дистанционно управляемого мобильного робота с учетом условий стохастической среды его функционирования;
- математический метод и компьютерная модель выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата;
- инновационные конструкции трехфалангового и двухфалангового адаптивных схватов дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера, изготовленного из блока крепкой горной породы;
- физическая модель дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом, успешно протестированного в лабораторных условиях для перегрузки разных форм грузов;
- программное обеспечение системы дистанционного управления мобильным роботом для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертации подтверждается использованием известных положений, принципов и методов механики и математики и согласованием полученных теоретических результатов с экспериментальными исследованиями.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

-Всемирном Конгрессе инженеров и ученых. «Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации». WSEC-2017. (г.Астана, 19-20 июня. Том 2.

– 2-я международная конференция «2nd International Conference of

IFToMM Italy, IFIT 2018» (Кассино, Италия, 29-30 Ноябрь 2018 г.);

– 4-й симпозиум Механики и робототехники международная научная конференция «4th IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics» (Удине, Италия, 11-13 сентябрь 2018 г.);

– Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники. Цифровые технологии в машиностроении», Алматы, 2018 г.

– Международная научная конференция «Slovak international Conference», Словакия, 2018г;

– Международная научно-практическая конференция Академии наук РК, Алматы, РК, 2017;

– Международная конференция «Зеленый Мост — платформа партнерства для передовых практик инноваций», ЭКСПО-2017, Астана, РК, 2017;

– Международный научный семинар «Актуальные проблемы инженерной механики», посвященный 95-летию академика АН КазССР, д.т.н., проф., заслуженного деятеля науки Казахстана Ж.С. Ержанова (Алматы, 18-19 июля 2017г.);

– научные семинары Института механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова и кафедры механики механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, 2015-2018гг.);

Публикации. По теме диссертации автором было опубликовано 17 работ, среди которых 3 публикации в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК для публикации основных результатов научной деятельности; 4 публикаций в научных журналах и трудах международных конференций, индексируемых базой данных Scopus ; 10 публикаций в трудах зарубежных и отечественных научных конференций, 1 патент «Бульдозерное устройство» № 94197, где при его создании были использованы разработанные автором методы оценки параметров его исполнительного механизма с учетом условий стохастической среды его функционирования; получено положительное решение на выдачу патента на изобретение «Механическая рука» №2019/0648.1.

Личный вклад автора. Основные результаты исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, получены автором самостоятельно.

В статье [2] соискателем разработан математический метод расчета параметров основных конструктивных элементов трехфалангового адаптивного свата манипулятора промышленного робота, с учетом стохастических условий его функционирования условий на примере расчета параметров его удерживающего зуба. А соавтору Каимову Абылаю принадлежат результаты по обоснованию расположения удерживающих зубьев фаланг рычагов схвата промышленного робота при их взаимодействии с оболочкой наружного участка тепловыделяющего элемента ядерного реактора атомной электростанции.

В статьях [32, 33, 34, 35, 39, 40, 42] соискатель приводит результаты

реализации разработанного им метода повышения точности оценки параметров исполнительного механизма рабочего органа машины, заключающийся в рационализации его основных конструктивных на примере конструкции исполнительного механизма отвала бульдозера с учетом стохастических условий его функционирования [57, 58] . А соавтору Каимову Абылаю принадлежат результаты по обоснованию структурно-кинематической схемы исполнительного механизма отвала бульдозера со съемным режущим ножом разрушения участка массива грунта

В статьях [23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 43, 44, 59, 60, 61, 62] соискателем представлены математические методы по выбору и обоснованию геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата и их компьютерные 3D модели. Выбраны и обоснованы различные варианты структурно-кинематических схем адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-ов. Разработаны компьютерные 3D модели при перегрузке ТВЭЛ-ов из транспортного контейнера в основной. Установлены зависимости между усилиями захвата ТВЭЛ-а от геометрических параметров адаптивного схвата. Проведены расчеты на прочность и жесткость элементов его конструкции. Там же представлена оригинальная математическая модель расчета геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров исполнительного механизма адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-ов с учетом стохастической среды технологического процесса их перегрузки из транспортного контейнера в основной. Идея методология базируется на системном подходе, при котором совокупность исполнительного механизма адаптивного схвата с ТВЭЛ-ом рассматривается как единая система взаимосвязанных и взаимодействующих элементов. А соавтор Каимов Абылай участвовал в проведении экспериментальных исследований и ему принадлежат результаты по математической обработке эмпирических результатов экспериментальных исследований и им построена регрессионная функция корреляции случайного процесса изменения силы захватывания перегружаемого объекта от геометрических параметров трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при осуществлении им стохастических процессов его взаимодействия с ТВЭЛ-ом, перегружаемого из промежуточного контейнера в основной контейнер.

В работе [25] соискателем разработана конструкция двухфалангового адаптивного схвата, на которое получено положительное решение на выдачу патента на изобретение. Соавтором Каимовым Абылаем разработана его структурно-кинематическая схема.

В статье [36] представлены результаты реализации математического метода построения перспективного облика технического объекта, разработанного соискателем, на примере построения перспективного облика математической модели бульдозера. Соавтором Каимовым Абылайем эта научная идея была реализована и им был построен перспективный облик математической модели бульдозера. На основе полученных результатов соискателем был построен перспективный облик дистанционно управляемого

мобильного робота с адаптивным схватом.

В работе [39] соискателем разработана конструкция исполнительного механизма отвала бульдозера для разрушения грунтов с учетом стохастических условий его функционирования. На эту конструкцию получен инновационный патент Республики Казахстан. Соавтором Каимовым Абылаем была предложена структурно-кинематическая схема исполнительного механизма отвала бульдозера.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает титульный лист, содержание, список обозначений и сокращений, введение, четыре раздела, заключение и список использованных источников, состоящий из 62 наименования. Общий объем диссертации составляет 107 страниц, включая 55 иллюстраций и 15 таблиц.

Основное содержание диссертации. Во введении отражены обоснование актуальности темы диссертационной работы, цель, объект, предмет, задачи исследования, используемые методы, обоснование научной новизны работы, ее теоретической и практической значимости, научные положения, выносимые на защиту, количество имеющихся публикаций, сведения об апробации работы и степени ее разработанности.

В первом разделе дается постановка задачи и проводится анализ работ предшественников по обеспечению надежного удержания в схвате ТВЭЛ-а при учете двух противоречивых требований: ограниченности упругих перемещений (или искажений формы) тонкостенного объекта и обеспечения запаса несущей способности схвата при переносе. Эта задача рассматривается для кругового кольца. Рассматриваются задача захватывания кругового кольца двумя, тремя рабочими элементами. Затем рассматриваются захватывания кольца при четырех, шести, восьми точках контакта. Ограничения представляются в виде аналитических неравенств и в виде графиков. В зависимости от соотношения между параметрами для фиксированного числа рабочих элементов требования могут оказаться несовместными, тогда для манипулирования с упругими объектами необходимо увеличивать число рабочих элементов. В главе приводятся необходимые рекомендации для выбора и обоснования оптимального количества точек контакта рабочих элементов схвата с ТВЭЛ-ом для его надежного захватывания, что необходимо для выбора и обоснования структурно-кинематических параметров адаптивного схвата для перегрузки ТВЭЛ-а из транспортного контейнера в основной. Приведенные формулы формулы позволяют обосновать количество фаланг и точек их контакта с перегружаемым ТВЭЛ-ом, а также развиваемые ими усилия захватывания.

Во втором разделе представлены математические методы по выбору и обоснованию геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата и их компьютерные 3D модели. Выбраны и обоснованы различные варианты структурно-кинематических схем адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-ов. Разработаны компьютерные 3D модели при перегрузке ТВЭЛ-ов из транспортного

контейнера в основной. Установлены зависимости между усилиями захвата ТВЭЛ-а от геометрических параметров адаптивного схвата. Проведены расчеты на прочность и жесткость элементов его конструкции. Там же представлена оригинальная математическая модель расчета геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров исполнительного механизма адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-ов с учетом стохастической среды технологического процесса их перегрузки из транспортного контейнера в основной. Идея методология базируется на системном подходе, при котором совокупность исполнительного механизма адаптивного схвата с ТВЭЛ-ом рассматривается как единая система взаимосвязанных и взаимодействующих элементов. При этом случайные ошибки, вызванные отклонением рассчитанного параметра исполнительного механизма адаптивного схвата робота от ее «идеальной» модели, и представляющие собой случайные ошибки, определяются первыми статистическими моментами $M\gamma_k$, величины которых и их законы распределения не зависят от времени (номера итерации k); средние значения ошибок равны нулю: $M\gamma_k = M\delta_k = 0$; закон распределения случайных величин может быть и не известен, но известны их дисперсии σ_γ^2 и σ_δ^2; предполагается, что все случайные ошибки независимы. Идея состоит в том, чтобы получить наилучшее приближение к истинной координате x_{k+1} выбирается так называемая «золотая» середина между показанием z_{k+1} источника с сенсора и $x_k^{opt} + u_k$, являющимся предсказанием того, что ожидается от него получить.

В третьем разделе диссертации разработан и создан физический прототип перспективного облика дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а из транспортного контейнера в основной. Он построен на основе идеи о том, что переход от существующего облика (начального состояния) совокупности машин к его новому облику перспективного состояния машин осуществляется с целью повышения эффективности (результативности) их эксплуатации. Эффективность определяется как отношение полученного эффекта к затратам, вложенными на его достижение, либо для достижения того и другого, то есть требующегося эффекта с возможно меньшими экономическими и материальными затратами. Для расчета реальных экономических параметров бульдозера нужно иметь информацию о значениях параметров существующей и предполагаемой перспективной машины. В общем виде методологический подход к обоснованию и выбору рационального варианта облика машины основывается на основных принципах системного анализа и синтеза сложных структур по критерию «эффективность-стоимость». Решение задачи экономической оценки вариантов облика перспективного перегрузочного робота должно осуществляться методом двухуровневой оптимизации по схеме многокритериального анализа альтернатив. В качестве частных показателей эффективности бульдозера при его эксплуатации выступает экспертный анализ оценки вариантов решения по результатам патентно-информационного поиска.

На основе преобразования результатов экспертного анализа предложено учитывать следующие показатели оценки эффективности бульдозера: ($\mathbf{X_1}$) – адаптивность, т.е. свойство приспособляемости к условиям эксплуатации; ($\mathbf{X_2}$) –ремонтопригодность, т.е. качество, заключающееся в приспособленности к восстановлению исправности конструктивных элементов дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом путем предупреждения, обнаружения и устранения неисправностей и отказов их; ($\mathbf{X_3}$) – долговечность, т.е. свойство изделия длительно (с возможными перерывами на ремонт) сохранять работоспособность в определенных условиях эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния; ($\mathbf{X_4}$) – безотказность машин, т.е. свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации; ($\mathbf{X_5}$) – экономичность, т.е. выполнение технологических операций с наименьшими затратами; ($\mathbf{X_6}$) –производительность, т.е. скорость выполнения производственных операций; ($\mathbf{X_7}$) – сложность системы управления, т.е. количество уровней управления; ($\mathbf{X_8}$) – срок службы конструктивных элементов ходовой части и механизмов передвижения робота; ($\mathbf{X_9}$) – качество структурно-кинематических схем исполнительных механизмов адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-ов, т.е. возможность точного воспроизведения запрограммированного его движения и распределения усилий между звеньями его конструкции. В данной модели первые девять критериев ($\mathbf{X_1}$) – ($\mathbf{X_9}$) составляют базовую часть. Для получения более полного представления об эффективности дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а предложен дополнительный параметр к базовой модели – ($\mathbf{X_{10}}$) - степень восприятия конструктивного решения машины инновационными изменениями, проводимыми в соответствии с требованиями ее эффективного функционирования, где $\mathbf{X_i}$ – экспертные оценки. Матрица основных эксплуатационных параметров математической модели перспективного облика дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом, эксплуатируемого при перегрузке ТВЭЛ-а, представлена в виде наличия эксплуатационных параметров обозначено "1", а отсутствие их – "0". В процессе разработки и создании математической модели построения его перспективного облика функционально-структурная оценка его сведена к решению задачи: свёрстка системы частных критериев в обобщенный критерий требующегося эффекта (эффективности). Данные критерии характеризуют структуру, надежность, адаптивность к условиям технологического процесса, производительность, оснащенность сменными рабочими органами, систему управления, инфраструктуру и всестороннее обеспечение запасными частями и др. Они во многом определяют функциональные и экономические параметры данного робота, которые связаны с затратами, необходимыми для реализации мероприятий по достижению ее цели и поддержанию функциональных показателей на необходимом уровне. Реализация алгоритма выбора многих критериев заключается в построение обобщенного критерия путем линейной

свертки критериев. Он сводится к тому, что обобщенный критерий выражается как линейная комбинация значений остальных критериев: $U(x)=\sum w_i x_i$ где: w_i – вес (важность) i-го критерия, назначенный экспертами; x_i – количественная оценка по Xi-му критерию. Структура облика робота изменяется за счет проводимых мероприятий, направленных на увеличение значения того или иного его параметра. Решение задачи сводится к тому, чтобы перестроить структуру состояния его облика, стремясь приблизить ее к конечному, целевому состоянию. Экономическая часть расчетного блока излагаемой методики начинается с определения потребности финансовых средств для реализации плана формирования нового облика робота в полном объеме и времени, необходимого для достижения этой цели при заданном уровне финансирования, которые определяются по формуле: $\Phi=\sum(K_i-C_i)\cdot S_i$, где Φ – потребность в дополнительных финансовых средствах для реализации программы формирования нового облика робота при заданном уровне финансирования; K_i - значение i – ого параметра перспективного облика робота; C_i - значение i – ого параметра существующего облика робота; S_i - цена за единицу i – ого мероприятия формирования нового облика робота.
Срок T, в течение которого будет реализована программа формирования нового облика робота, определяется по формуле: $T=\Phi/F$, где T – срок, в течение которого будет реализована программа формирования нового облика робота; Φ – потребность в дополнительных финансовых средствах для реализации программы формирования перспективного облика робота при заданном уровне финансирования.
После этого рассчитывается норма отклонения начального состояния существующего облика робота от его конечного целевого состояния, выраженная в процентах, которая определяется по формуле:
$N = (\sum C_i /K_i)/I$, где N – норма существующего состояния облика робота; I – общее количество параметров, характеризующих структуру существующего облика робота. Окончательное решение задачи сводится к поиску максимального значения нормы отклонения достигнутых параметров состояния перспективного облика робота при заданном уровне финансирования:
$H \rightarrow max;$ $H= (\sum P_i/K_i) / I;$ и $F= (P_i - C_i)\cdot S_i$, где H– норма достигнутого состояния перспективного облика робота; P_i –значение i – ого параметра достигнутого перспективного облика робота; S_i – цена за единицу i – ого мероприятия формирования перспективного облика робота; F–заданный уровень (выделенное) финансирования на формирование перспективного облика робота в течение определенного периода времени (как правило, в течение одного года); K_i –значение i – ого параметра конечного, целевого перспективного облика робота;C_i – значение i – ого параметра существующего облика робота; i – порядковый номер параметра структуры существующего облика робота.

Там же для построенной физической модели перспективного облика дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом были проведены экспериментальные исследования по реализации разработанного

соискателем математической модели расчета геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров исполнительного механизма адаптивного схвата робота на примере перегрузки фруктов, среднюю сферическую форму. имеющих ТВЭЛ-ов с учетом стохастической среды технологического процесса их перегрузки из транспортного контейнера в основной. При этом было получено наилучшее приближение к истинной координате x_{k+1} (усилия захватывания) от геометрического параметра (высоты губки) адаптивного схвата, так называемая «золотая» середина между показанием z_{k+1} источника с сенсора и $x_k^{opt} + u_k$, являющимся предсказанием того, что ожидается от него получить.

В четвертом разделе диссертации представлен материалы руководства пользователя программного обеспеения «имитационное моделирование функционирования дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки цилиндрических объектов, имеющих различные диаметры сечения. Описываются использованные компонены этого робота, а также описывается принцип его работы и взаимосвязь составляющих компонентов, представлены схемы взаимодействия компонентов, а также инструкия для пользователя и листинг этого программного обеспечения.

Полученные в работе результаты и сама концепция построения перспективного облика управляемого мобильного робота с адаптивным схватом и разработка математических методов повышения точности оценки геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата с учетом стохастической среды его функционирования являются новыми, представляют научный и практический интерес и могут быть непосредственно применены в инжинирии не только в Республике Казахстан, но и в других странах мира.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОГО ЗАХВАТЫВАНИЯ В СХВАТЕ ТВЭЛ-а РАЗЛИЧНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ФАЛАНГ (ПАЛЬЦЕВ) РОБОТА.

1.1 КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОНЫ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК (ТВС) АЭС

Свежее топливо поступает на АЭС в виде тепловыделяющих сборок (ТВС). На складе свежие ТВС извлекают из контейнеров и размещают в специальных чехлах. Объектом технологического процесса перегрузки ядерного топлива является зона перегрузки, в которую входят ядерный энергетический реактор и БВ [41]. Основным объектом перегрузки является ядерный реактор, в технической документации называемый обычно аппаратом. Водо-водяной энергетический реактор конструктивно представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд высокого давления с днищем эллиптической формы. Реактор устанавливается в бетонной шахте. Устройство наиболее распространенного реактора ВВЭР-1000 показано на рис. 1.1. Конструкция реактора обеспечивает фиксацию головок кассет относительно корпуса с точностью около 1 мм. Этим обусловливается возможность позиционирования захвата перегрузочного манипулятора (машины для перегрузки топлива) над кассетой при наведении ее на расчетное положение, а также обеспечивается сохранение заданного распределения нейтронного потока. Основным элементом активной зоны ВВЭР является ТВС. ТВС образована набором тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ-ов), связанных между собой дистанцирующими решетками, сквозь которые прокачивается вода, служащая теплоносителем и замедлителем. ТВЭЛ-ы представляют собой герметичные циркониевые трубки, заполненные таблетками двуокиси урана, обогащенной изотопом уран-235. Кроме перечисленных элементов каждая ТВС имеет головку для захвата перегрузочным манипулятором и хвостовик (рис. 1.2). В серийных реакторах ВВЭР-1000 применена бесчехловая конструкция ТВС, позволившая-уменьшить поглощение нейтронов, увеличить количество ТВС в реакторе, повысить его энергонапряженность.

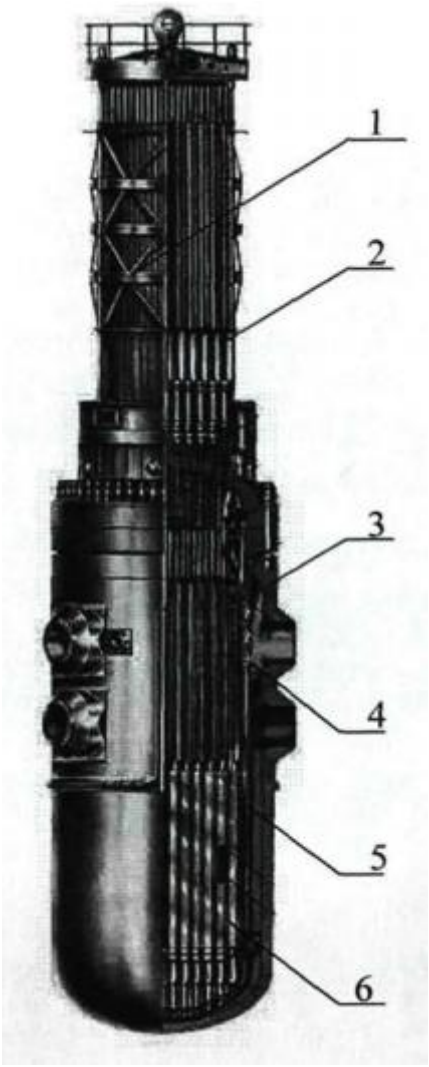


Рисунок 1.1 – Реактор ВВЭР-1000
1- верхний блок; 2 - привод СУЗ(системы управления и защиты);
3-корпус реактора; 4- шахта; 5-выгородка активной зоны; 6-топливные сборки;

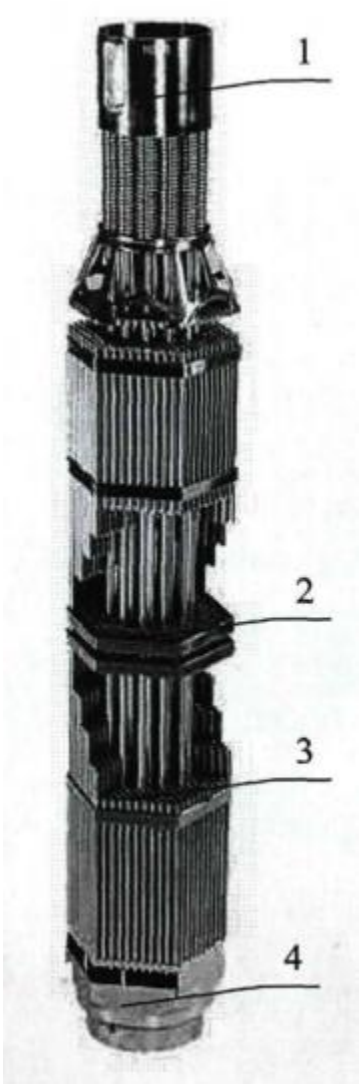


Рисунок 1.2 – Внешний вид ТВС;
1 - головка ТВС; 2-дистанцирующие решетки; 3-ТВЭЛы; 4- хвостик ТВС

Таблица 1.1 – Основные параметры элементов активной зоны реакторов типа ВВЭР

Наименование параметра	ВВЭР-210 (I блок Нововонежской АЭС)	ВВЭР-440 (серийный)	ВВЭР-1000 (Нововонежской АЭС)	ВВЭР-1000 (Запорожской АЭС)
Диаметр активной зоны, м	2,88	2,88	3,12	3,12
Высота активной зоны, м	2,50	2,50	3,50	3,50
Число ТВС	343 (включая КК)	349(включая КК)	151	163
Длина ТВС, мм	3200	3210	4665	4570

Продолжение таблицы 1.1

Масса ТВС, кг	196,6	220	765	705
Тип поглощающего элемента	КК	КК	Кластер из 12 стержней	Кластер из 12 стержней
Число поглощающих элементов	31(и 6 стержней АЗ)	37 (для НВАЭС –73)	109	61
Число пучков СВП	–	–	До 54	До 54
Длина надставки (кластера), мм	2630	2630	4260	4165
Масса надставки (кластера), кг	76	76	18	16

Конструкция ТВЭЛ-а, например, реактора РБМК приведена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Конструкция ТВЭЛ-а реактора РБМК: 1 — заглушка; 2 — таблетки диоксида урана; 3 — оболочка из циркония; 4 — пружина; 5 — втулка; 6 — наконечник.

Наружный диаметр трубки ТВЭЛ-а составляет 9,1±0,05 мм, толщина — 0,65±0,03 мм, внутренний диаметр — 7,72+0,08 мм. В трубке, толщина стенки которой составляет 0,19—0,32 мм, помещаются таблетки диоксида урана, высота каждой из которых составляет 9-12 мм, диаметр — 7,57−0,03 мм. В середине каждой таблетки имеется отверстие, диаметр которого составляет 2,3 мм, а края таблетки округляются фасками. В холодном состоянии общая длина столба таблеток в ТВЭЛ-е составляет 3530 мм. Длина трубки ТВЭЛ-а равна 3800 мм. Положение столба топливных таблеток фиксируется разрезными втулками из нержавеющей стали и пружиной, не препятствующими тепловым перемещениям.

Перегрузка ТВЭЛ-а осуществляется захватом корпуса его тела, сечение которого представляет тонкое кольцо, схватом перегрузочного робота. Универсальность и возможность применения схватов во многом зависят от способности регулирования усилия захватывания. При захватывании схватом ТВЭЛ-а его корпус деформируются под воздействием разных нагрузок (происходит изменение формы или размеров). В поставленной задаче важно точное сохранение формы, даже упругие деформации захватывания ТВЭЛ-а,

превосходящие допустимые значения, являются нежелательными, вредными. Кроме того, большие деформации могут приводить к разрушению ТВЭЛ-а (а именно, к техногенной аварии, когда материал является высокорадиоактивным, а объект тонкостенным). Деформации объектов захватывания зависят не только от вида и материала объектов или заготовок, от способа приложения зажимающих усилии и их величины.

Для выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата для надежного удержания объекта им ниже представлены исследования предшественников по выбору количества и места контакта рабочих элементов схвата с объектом, имеющим кольцевое сечение [26].

Исходными данными для расчета являются: номинальная геометрия при отсутствии деформации; конфигурация и геометрические параметры объекта и схвата; силы и моменты, действующие на объект; упругие характеристики материала объекта и элементов в схвате. При дискретных точках контакта и при линейной упругости объекта приложение к объекту любых малых сил и моментов приводит к линейно зависимым от них перемещениям точек объекта и углам поворота сечений объекта. Изменение параметров положения объекта в схвате, вызванное упругими деформациями, имеют порядок, соизмеримый с этими деформациями. Большие деформации захватываемого объекта при его зажатии в схвате приводят к нарушению условии жесткого фиксирования объекта и потере устойчивости захватывания. Деформации захватываемого объекта приводят к дополнительным погрешностям позиционирования и ориентирования в конечном положении. Вследствие деформации объекта согласование между ними и рабочими элементами может нарушиться, при этом часто возникает неопределенность положения равновесия. В этой работе рассматриваются различные примеры, который иллюстрируют последствия таких деформации. При переносен захваченного тонкого кольца вследствие действия сил инерции могут возникать его проскальзывание и перемещения в схвате. Чтобы это не произошло, нужно увеличивать усилие захватывания. Если же усилие захватывания окажется больше допустимого, то произойдет деформация, превышающая допустимую, а если усилие будет слишком малым, то при переносе произойдет проскальзывание под действием сил инерции. И допустимые силы по деформации и несущая способность схвата зависит от параметров кольца и схемы захватывания.

Ниже рассматриваются эти задачи захватывания объекта, имеющего кольцевое сечение, схватом робота.

1.2 ЗАДАЧА О ЗАХВАТЫВАНИИ КРУГОВОГО КОЛЬЦА ДВУМЯ РАБОЧИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Так как ТВЭЛ-ы выполнены в виде цилиндрических топливных стержней в качестве типового объекта захватывания рассмотрим тонкое круговое кольцо.

Для того, чтобы выбрать оптимальный вариант захватывания (с достаточно малыми упругими деформациями и без проскальзывания), проведем

анализ напряженного и деформированного состояния кольца при различных схемах захватывания (рис.1.1-1.3). Предполагается, что все рабочие элементы перемещаются радиально, каждый из них дает только одну точку контакта с объектом захватывания. Исследуются зависимости напряжении и деформации от диаметра D кольца, от числа точек контакта и от силы P. [45]

На рис.1.1 показано, как тонкостенное кольцо с радиусом R, захвачено схватом двумя рабочими элементами в двух точках (A_1,A_2). Определим вначале изгибающий момент M в произвольном сечении кольца, расположенном под углом φ к вертикали. В результате решения задачи статики статически неопределимой упругой системы известными методами теории изгиба тонких стержней записываем:

$$M=–PR(0.3183-0.5\sin\varphi) \qquad (1.1)$$

Следовательно, значения изгибающего момента в точках A_1,A_2,A_3,A_4 (рис.1.4) равны:

$$M_{A_1} = M_{A_2} = –0.3183PR \qquad (1.2)$$

$$M_{A_3} = M_{A_4} = 0.18168PR \qquad (1.3)$$

Дифференциальное уравнение средней линии кругового кольца имеет вид:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} + W = -\frac{MR^2}{EJ} \qquad (1.4)$$

где E– модуль упругости, J–момент сопротивления сечения.

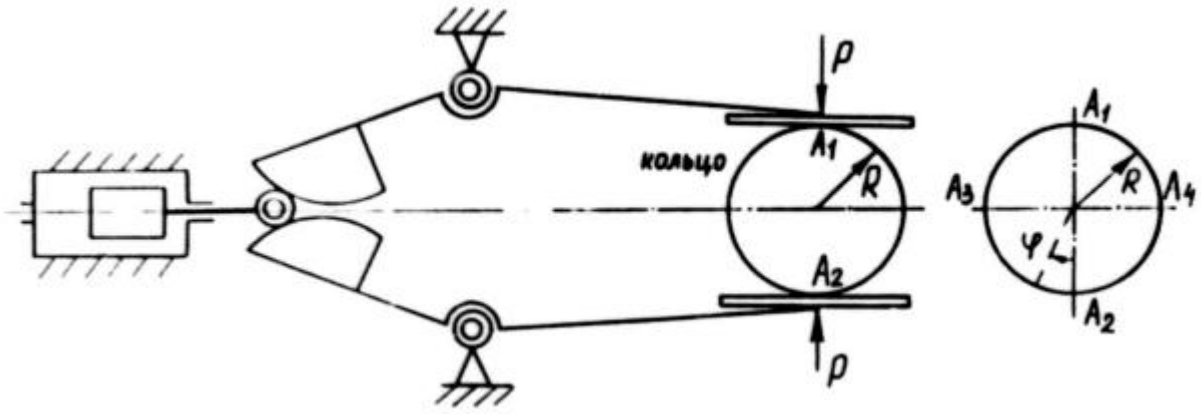


Рисунок 1.4 – Тонкостенное кольцо с радиусом R, захвачено схватом двумя рабочими элементами в двух точках (A_1,A_2)

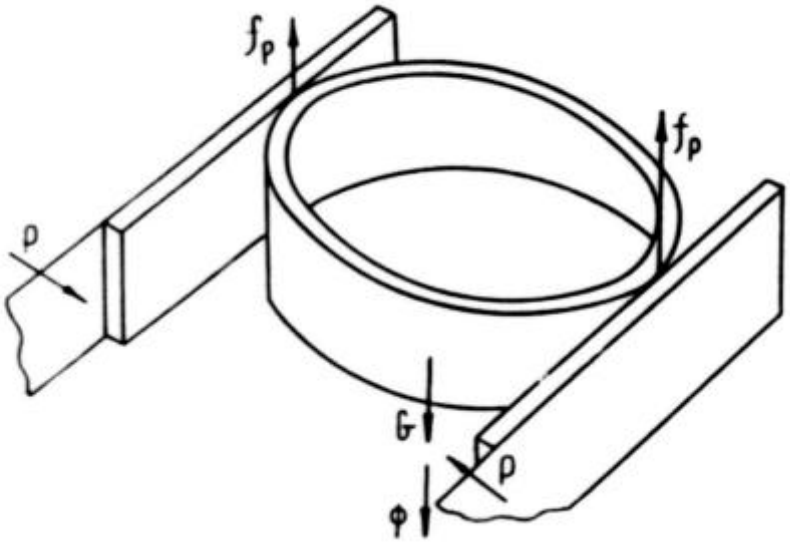


Рисунок 1.5 – Различные схемы захватывания

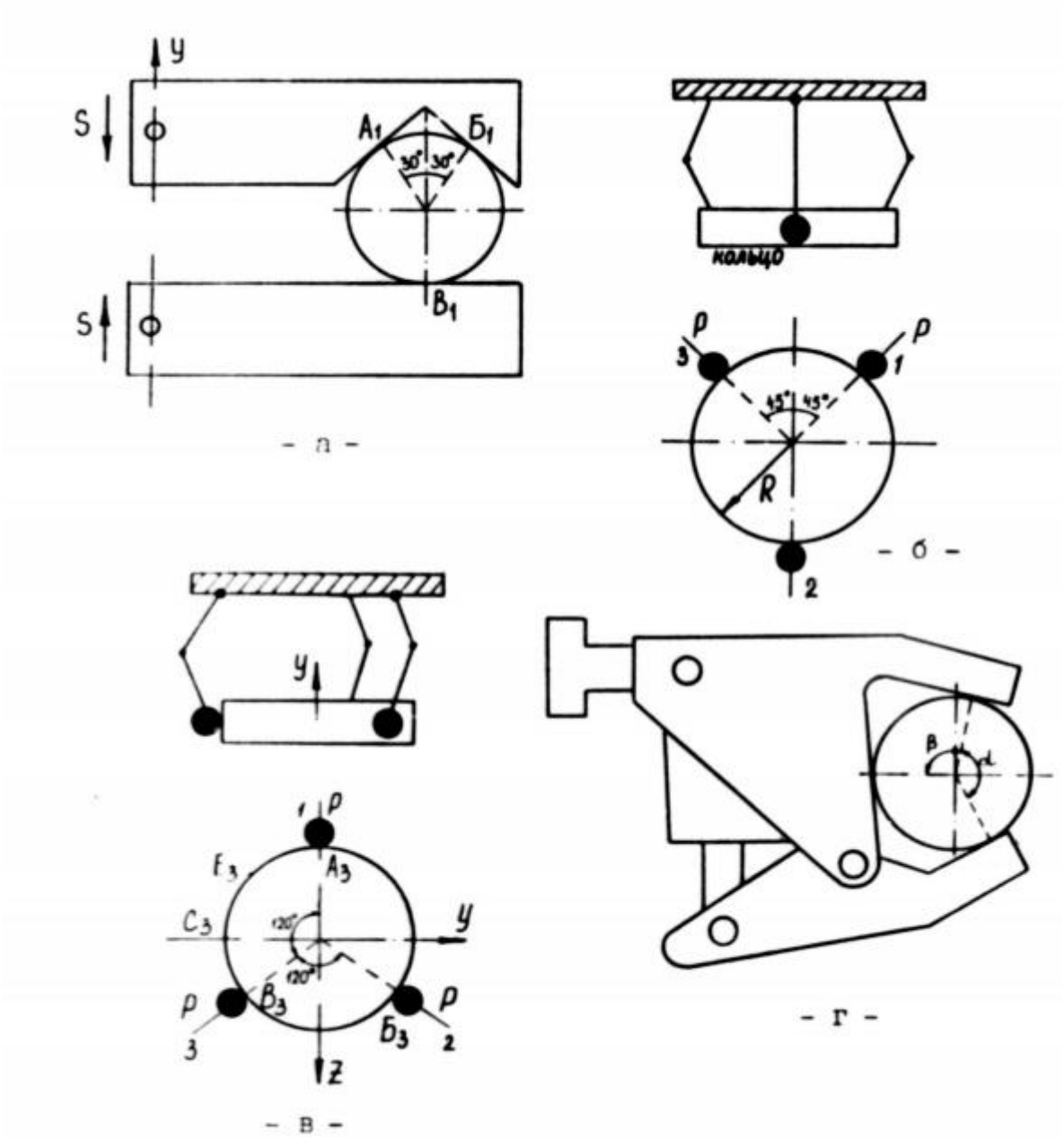


Рисунок 1.6 – Различные схемы захватывания

где W – радиальное смещение точек средней линии кольца. Из решения уравнения 1.4. при естественных граничных условиях (условия периодичности) получаем радиальное смещение в точках A_1,A_2,A_3 и A_4.

$$W_{A_1} = W_{A_2} = -0.2337\frac{C}{\pi}, \quad C = \frac{PR^3}{EJ} \tag{1.5}$$

$$W_{A_3} = W_{A_4} = 0.2149\frac{C}{\pi} \tag{1.6}$$

Для определения деформации при захватывании таких колец по внутренней поверхности можно также пользоваться данными и выражениями 1.1-1.6, соответственно изменив знаки изгибающего момента и перемещении.

Указанные перемещения относятся к случаям нагружения кольца радиальными силами, направленными к центру. Перемещения даны для участков приложения захватываемого усилия (сечения $A_{1\text{-}1}$, $A_{2\text{-}2}$) и наибольшего выпучивания (сечения $A_{3\text{-}3}$, $A_{4\text{-}4}$). Приведем также погрешности цилиндрической поверхности кольца

$$\Delta_\varphi = 2(|W_{A_1}| + |W_{A_3}|) = 2(|W_{A_2}| + |W_{A_4}|) \tag{1.7}$$

В данном случае получаем

$$\Delta_\varphi = 0.285C \tag{1.8}$$

В этих же сечениях получаем следующие выражения для максимальных нормальных напряжении изгиба:

$$\sigma_{A_1} = \sigma_{A_2} = \frac{1.91PR}{lt^2} \tag{1.9}$$

$$\sigma_{A_3} = \sigma_{A_4} = \frac{1.1PR}{lt^2} \tag{1.10}$$

где l- ширина кольца, t- толщина кольца. Из приведенных выражений следует, что максимальные радиальные перемещения и напряжения получаются в точках A_1 и A_2. Ограченичения на перемещения и напряжения могут налагаться независимо. Если радиальное перемещение ограничено предельным значением W_0, то из 1.9 получаем, что максимальное, предельно допустимое значение усилия захватывания определяется выражением:

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{A_{1,2}} \cdot l \cdot t^2}{1.91R} \tag{1.11}$$

Если же из условий прочности огрпаничено нормальное напряжение δ в материале, то предельно допустимое значение усилия захватывания определяется другим выражением.

С другой стороны, из условий надежного удерживания кольца в схвате без проскальзывания вытекают ограничения снизу на усилие захватывания. Предположим, что сила инерции Φ направлена по оси кольца, которая вертикальна. Тогда возможно проскальзывание кольца в схвате по этой оси. Условие отпускания проскальзывания имеет вид:

$$P > P_{\min} = \frac{G + \Phi}{2f} \tag{1.12}$$

где f- коэффициент трения между рабочими элементами и объектом, G- вес объекта, Φ -сила инерции.

На графике (рис. 1.7) на плоскости параметров P–D, представлены

кривые зависимости допускаемых приложенных сил от диаметра кольца для предельного состояния равновесия при захватывании объекта (кольца) двумя рабочими элементами.

Были рассчитаны смещения в сечении кольца по формуле 1.5 и необходимое усилие, исключающее проскальзывание кольца по формуле 1.12

На рисунке 1.7 представлены пять кривых :

Первая кривая (№1)относится к ситуации, когда деформация определяет максимально допустимую силу, которая может быть приложена к кольцу, кривые 1,2,3 и 4 соответствуют ограниченным смещениям кольца при разных диаметрах, кривая №5 определяет минимальную силу схватывания при отсутствии проскальзыванеия. Совокупность кривых 1-5 определяет область допустимых параметров (заштрихованная зона), которая соответствует удовлетворению всех требований для взятого в качестве примера кольца с диаметром 40 мм. Принято, что предельное допустимое радиальное смещением равно $\Delta d = 0.2$ мм.

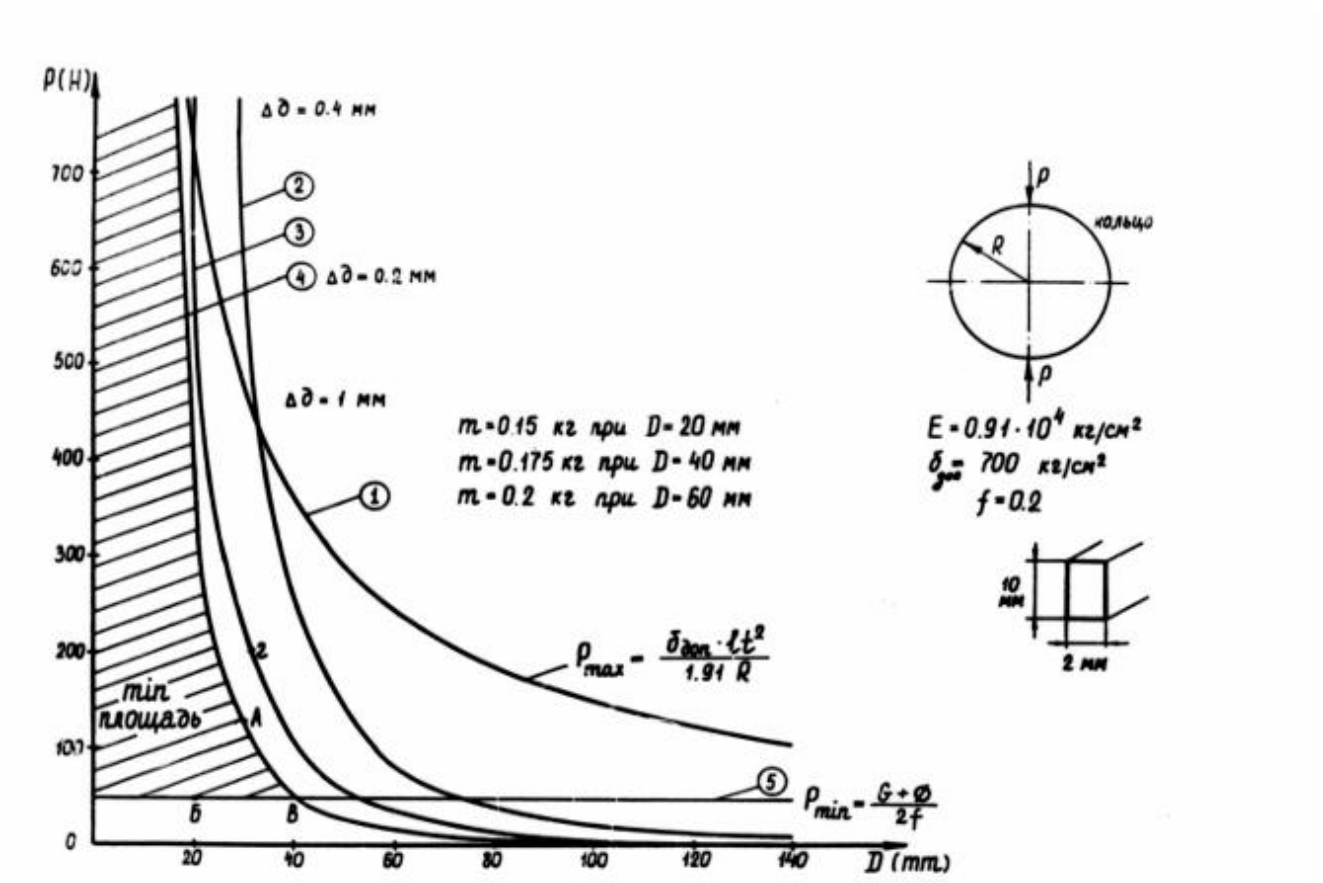


Рисунок 1.7

Точка А соответствует кольцу с диаметром 25мм и усилию захватывания 120Н. Точка находится в начале границы области, определяющей ограничение смещения 0.2 мм. Если приложить силу больше 120 Н, то произойдет упругое смещение, большее 0,2 мм. Точка Б относится к кольцу с диаметром 20 мм,

которое захвачено силой 43Н. В случае уменьшения силы захватывания при действии силы инерции будет происходить выскальзывание кольца из схвата. Точка В – критическая точка – совпадает с границей области допустимых состояний. Если приложить силу больше 45Н, то получается смещение больше 0.2мм; с другой стороны, возможно проскальзывание кольца, если действующая сила меньше 15 Н. Точка Г, для кольца с диаметром 32 мм и силы захватывания, равной 200Н, соответствует радиальному смещению, равному 0,4мм. Точка Д соответствует кольцу диаметром 88мм и силе захватывания 160Н, при этом кольцо деформируется со смешением больше 0,2 мм.

При больших диаметрах достаточно жестких ограничениях на радиальные перемещения условия отсутствия проскальзывания оказываются невыполнимыми. В этих случаях основной путь сводится к увеличению числа рабочих элементов и соответственно числа точек контакта

1.3 ЗАХВАТЫВАНИЕ КОЛЬЦА ТРЕМЯ РАБОЧИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Будем считать, что замкнутое тонкое кольцо захватывается в трех точках. На рисунке 1.6 представлены разные схваты, осуществляющие захватывание в трех точках. Имеется разница в геометрии распределения точек взаимодействия с кольцом вокруг центра в зависимости от вида схвата, рабочих элементов, диаметр кольца. Проанализируем сначала влияние распределения этих точек контакта с объектом. Преимущества имеют те варианты, которые дают минимальный момент изгиба в том сечении кольца, где момент максимален по углу и имеет минимальную деформацию. На рисунке 1.6 – а показано, что кольцо захвачено плоскопараллельной губкой с одной стороны и призматической с другой. Предполагаем, что силы захватывания расположены как на рис. 1.8, что соответствует рис.1.3 – а. После расчета получаем, что значения изгибающего момента в точках $А_1$, $Б_1$, $В_1$, $К_1$,$С_1$ равны:

$$M_{A_1} = -0.2948P \cdot R, \qquad M_{K_1} = -0.1023P \cdot R, \qquad (1.13)$$
$$M_{B_1} = -0.1346P \cdot R, \qquad M_{C_1} = -0.157P \cdot R, \qquad M_{B_1} = M_{A_1}$$

Значения изгибающего момента в случае расположения точек контакта, как на рис.1.6 –в и рис.1.9, в точках $А_2$, $Б_2$, $В_2$, $С_2$, $К_2$ равны

$$M_{B_2} = -0.1592P \cdot R, \qquad M_{K_2} = -0.001P \cdot R, \qquad (1.14)$$
$$M_{A_2} = M_{B_2} = -0.11907P \cdot R, \quad M_{C_2} = -0.1157P$$

При захватывании кольца, когда точки контакта располагаются под равными углами 120^0 (рис.1.10), изгибающие моменты в точках $А_3$, $Б_3$, $В_3$, $С_3$, $Е_3$ равны:

$$M_{Б_3} = M_{A_3} = M_{B_3} = -0.189P \cdot R, \quad M_{C_3} = 0.189P \cdot R, \quad M_{E_3} = 0.1P \cdot R$$

Из сравнения выражений 1.13, 1.14, 1.15 следует, что

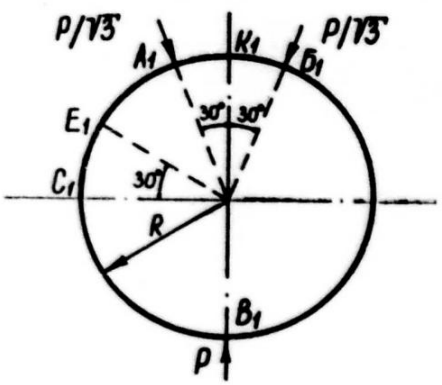


Рис.1.8.

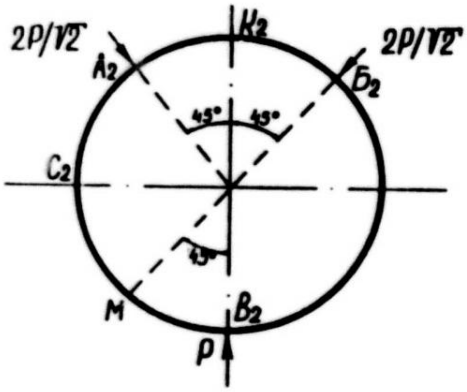


Рис.1.9.

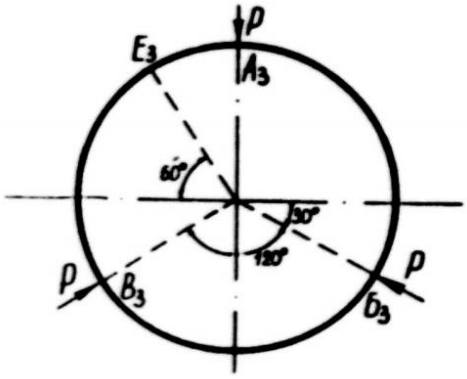


Рисунок 1.10

максимальный по сечениям изгибающий момент в этих трех случаях минимален, имеет место равномерное распределение точек контакта через 120^0 относительно центра (рис.1.10). Поэтому именно для этого случая были рассчитаны смещения в точках взаимодействия рабочих элементов или пальцев с объектом и максимально допустимое усилие захватывания. Тогда получаем

$$W_{A_3} = W_{Б_3} = W_{B_3} = -0.016C, \qquad W_{E_3} = 0.014C \tag{1.16}$$

Соответственно погрешность формы кольца Δ_ϕ равна

$$W_\phi = 2(|W_{A_3}| + |W_{E_3}|) = 0.06C \tag{1.17}$$

$$P_{\max} = \frac{\sigma_A \cdot lt^2}{1.134R} \tag{1.18}$$

Минимально допустимая сила определяется из условия надежного удерживания. Выражение для нее принимает вид:

$$P_{\min} = \frac{G + \Phi}{3f} \qquad (1.19)$$

На графике (рис.1.11) построены кривые для предельных состояний кольца подобно графику на рис.1.7. Можно отметить значительное увеличение области допускаемых усилий, при этом сказалось возможным захватывать при тех же условиях кольцо с диаметром до 80 мм без превышения упругими перемещениями предельных значений. Граница области допустимых усилий захватывания образуется из кривых, ограничивающих смещения кольца меньше 0.2 мм и исключающих скольжение кольца.

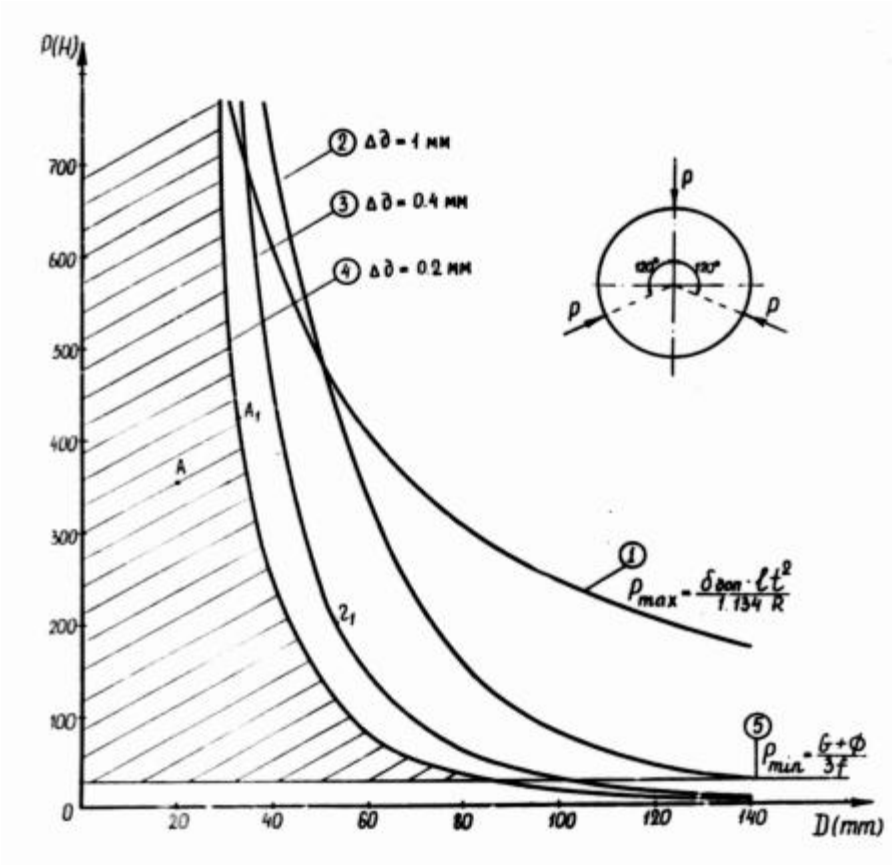


Рисунок 1.11

1.4 ЗАХВАТЫВАНИЕ КОЛЬЦА ПРИ ЧЕТЫРЕХ, ШЕСТИ И ВОСЬМИ ТОЧКАХ КОНТАКТА

На рисунке 1.12 представлена схема захватывания кольца в четырех точках с помощью призматических губок (рис. 1.12 - а), ,либо четырех пальцев (рис. 1.12 - б). При захватывании тонкостенных колец двумя центрующими призмами минимальная погрешность формы кольца возникает при угле между плоскостями призмы $\alpha = 90^0$. Расчетные формулы для этого случая следующие:

$$M_{A_{1-4}} = -0.1366PR \qquad (1.20)$$

$$M_{A_{1-4}} = -0.006C \quad (1.21)$$

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{доп} \cdot lt^2}{0.8196R} \quad (1.22)$$

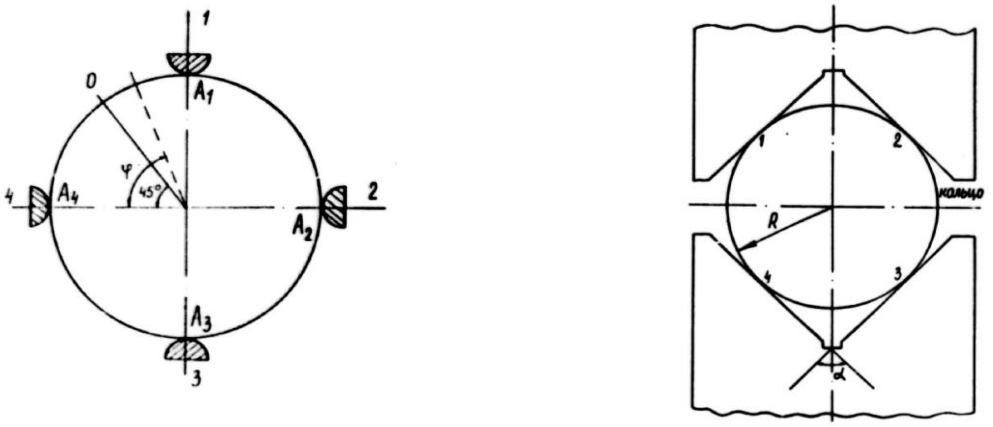
$$P_{\min} = \frac{G + \phi}{4f} \quad (1.23)$$

По уравнениям 1.20 – 1.23 построены кривые, представленные на рисунке 1.13. Получаемая при этом область допустимыъ сил расширяется при этом же ограничении на смещение больше 0.2 мм, можно захватывать кольца с диаметром до 120 мм.

Погрешность формы равна:

$$\Delta_{\varphi} = 2\left(|W_1| + |W_{0-0}|\right) \quad W_{0-0} = 0.005C \quad (1.24)$$

Теперь предположим, что захватывание кольца происходит в шести точках. Схема захватывания кольца показана на рисунке 1.14-а. Изгибающий момент и нормальную силу, действующую в сечении 1-1, можно найти, рассматривая разобранную ранее схему захватывания кольца в трех точках и используя принцип наложения . На рисунке 1.14-б, в изображены две схемы закрепления кольца в схвате. Накладывая одну схему на другую, получими случай нагрузки (рис.1.14-а). Изгнибающий момент в сечении 1-1 (рис.1.14-б) равен $M_{1-1} = -0.189PR$.



а) б)

Рисунок 1.12 – схема захватывания кольца в четырех точках с помощью призматических губок (а),либо четырех пальцев (б)

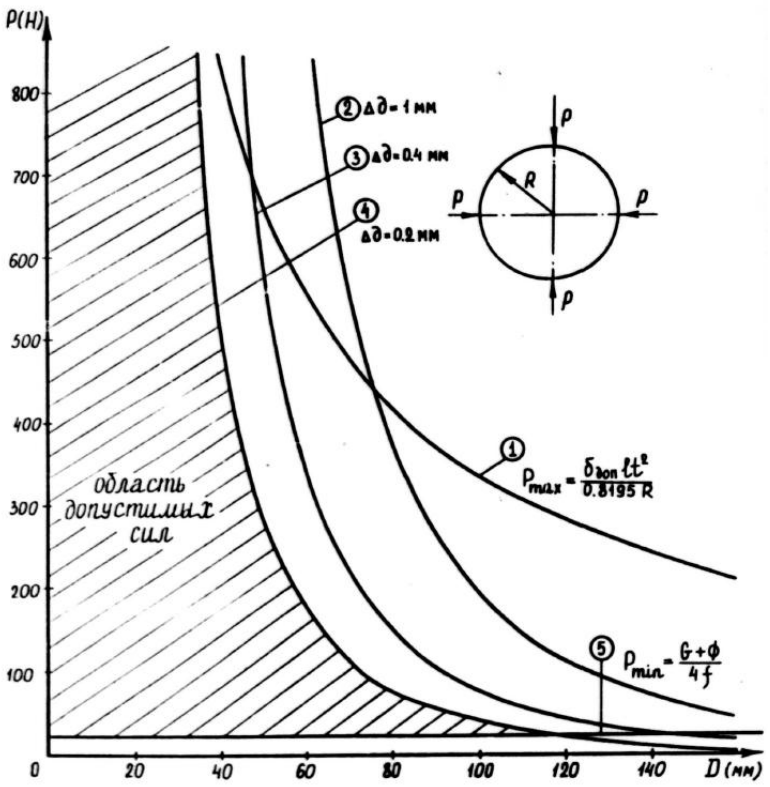


Рисунок 1.13

Изгибающий момент в сечении 1–1 (рис.1.14-в) равен $M_{1-1} = 0.1PR$. Суммируя эти моменты, получим момент в сечении 1–1 (рис.1.14-а) 0.089PR. Значения моментов в сечениях действия они равны моменту в сечении 1–1 на рис.1.14-а. Перемещение в сечениях действия усилий равно:

$$W_{1-6} = -0.00168C. \quad W_{0-0} = -0.0016C. \tag{1.25}$$

$$\Delta_{\varphi} = 0.0066C \tag{1.26}$$

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{доп} lt^2}{0.5334} \tag{1.27}$$

$$P_{\min} = \frac{G+\phi}{6f} \tag{1.28}$$

По формулам 1.25-1.28 построены кривые, представленные на рисунке 1.15, между ними получаем область допустимых усилий для этого случая.

Далее было рассмотрено кольцо, которое захвачено в восьми точках. Аналогично предыдущему случаю, используя принцип наложения схем захватывания кольца в четырех точках, для восьми рабочих элементов получаем следующие уравнения:

$$M_{1-8} = -0.006613PR. \quad W_{1-8} = -0.00217C. \tag{1.29}$$

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{доп} lt^2}{0.3967} \tag{1.30}$$

$$P_{\min} = \frac{G + \phi}{8f} \qquad (1.31)$$

На рисунке 1.16 представлены кривые, которые соответствуют выражениям 1.29-1.31.

Из всех результатов можно найти решение задачи при захватывании тонкого кольца с разным диаметром и различным количеством воздействующих усилий. Отметим, что всегда при увеличении числа рабочих элементов, то есть количества воздействующих сил на кольцо, область допустимых усилий увеличивается. При сравнении графиков, представленных на рисунках 1.7 и 1.11, видно, что площадь область допустимых усилий на рисунке 1.11 в 1.11 раз больше для первого случая, также видно, что оба случая не удовлетворяют требованиям ограниченности упругих перемещений точек кольца при больших диаметрах.

Возрастание числа рабочих элементов дает увеличение области допустимых усилий, то есть становится возможным захватывание кольца с большими диаметрами без нарушения при этом условий ограниченности деформации и напряжений.

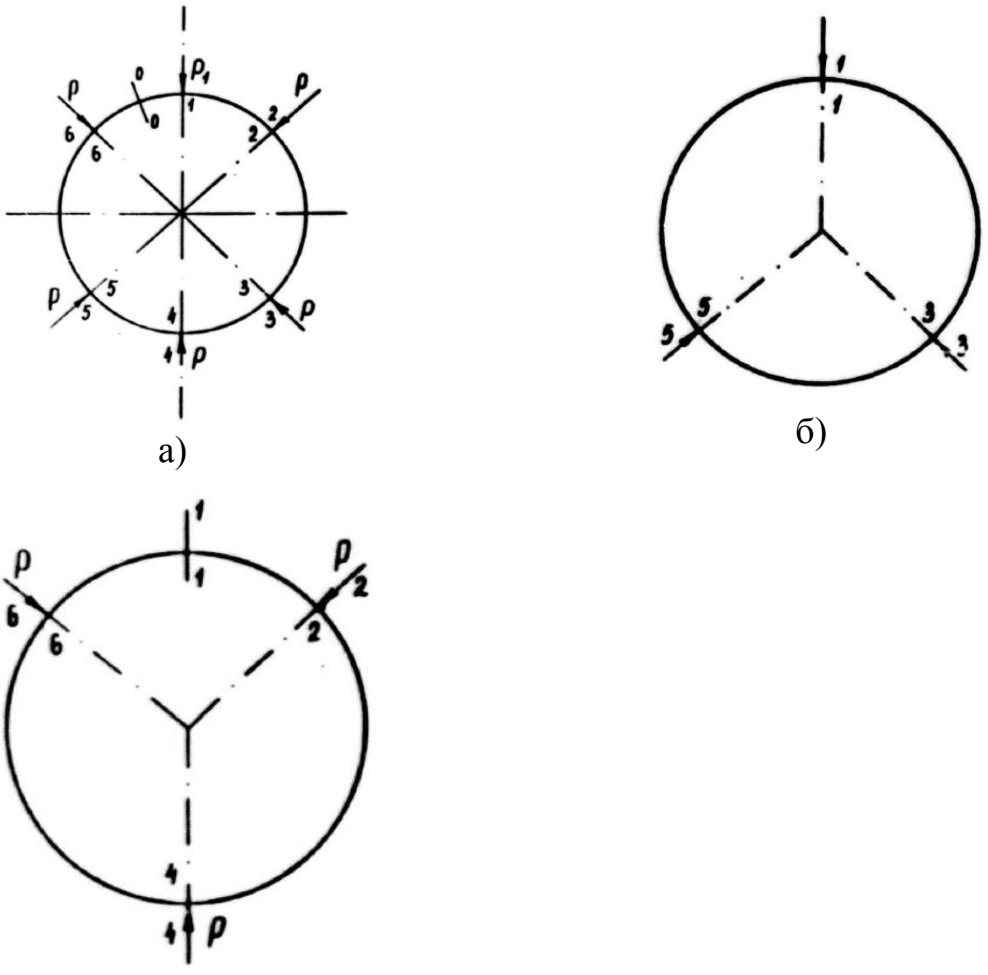


Рисунок 1.14

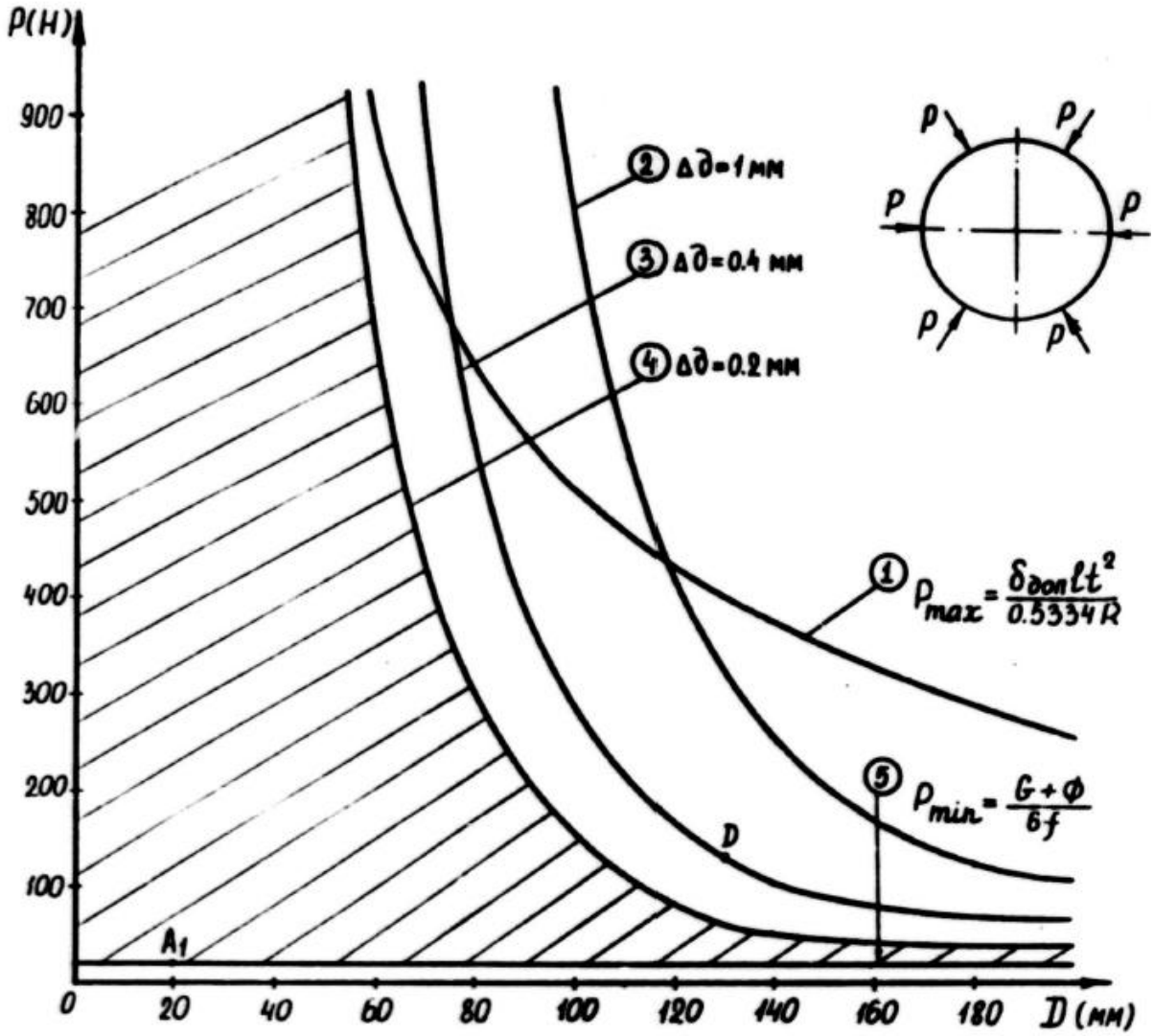

P(H)
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
D (мм)
A1
D
② Δd=1 мм
③ Δd=0.4 мм
④ Δd=0.2 мм
① $P_{max}=\frac{\delta_{доп} l t^2}{0.5334 R}$
⑤ $P_{min}=\frac{G+\Phi}{6f}$
P
P
P
P
P
P

Рисунок 1.15

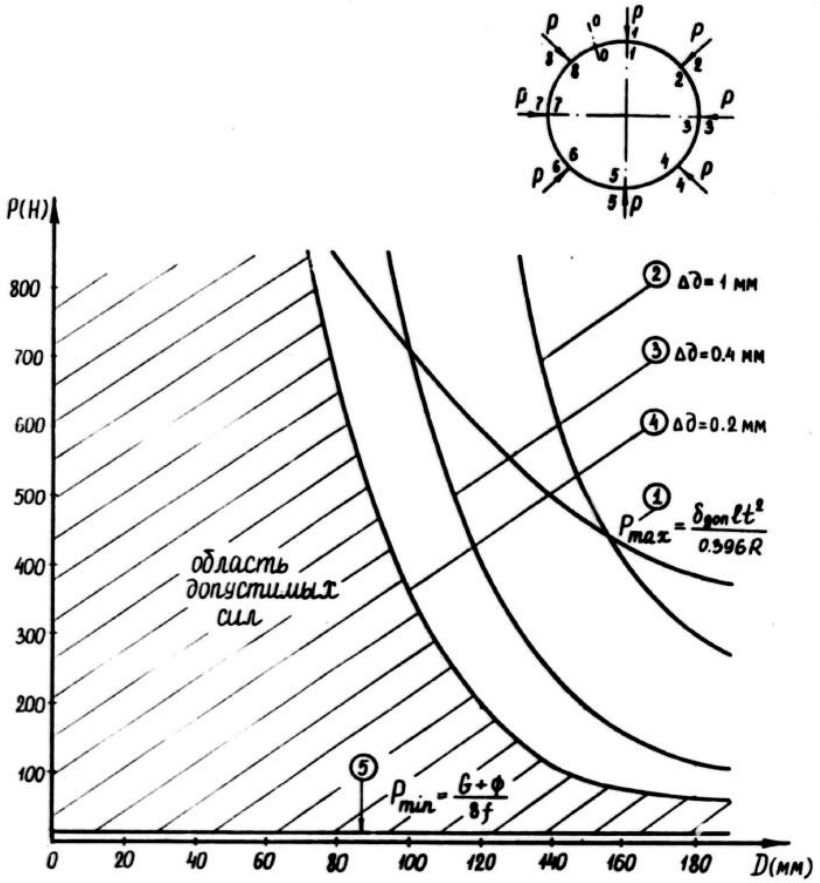

P(H)
800
700
600
500
400
300
200
100
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
D(мм)
область допустимых сил
② Δ∂ = 1 мм
③ Δ∂ = 0.4 мм
④ Δ∂ = 0.2 мм
① $P_{max} = \frac{\delta_{доп} \ell t^2}{0.396R}$
⑤ $P_{min} = \frac{G + \phi}{8f}$

Рисунок 1.16

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

Все основные приемы технического совершенствования возможностей надежного захватывания упругих и хрупких тонкостенных объектов были исследованы на примере кольца, так как сечение ТВЭЛ-а представляет собой тонкостенное кольцо из циркония. При этом установлено:

– при захватывании тонкостенных объектов, имеющих кольцевое сечение, необходимо учитывать ограничения сверху на усилия захватывания, вытекающие из требований обеспечения необходимых запасов прочности и малости упругих перемещений в основных сечениях;

– ограничения снизу на усилие захватывания определяется запасом несущей способности схвата при переносе объекта;

– условия ограничений сверху и снизу на усилие захватывания удобно представлять графически, в зависимости от варьируемого геометрического параметра объекта;

– для выбранных схем захватывания цилиндрического объекта установлены предельные значения геометрических параметров (максимальные габаритные размеры, минимальные значения толщины стенки), для изменения этих предельных значений необходимо изменять схему захватывания, в частности, увеличить число рабочих элементов.

2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОГО СХВАТА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТВЭЛ-а ИЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТЕЙНЕРА С ТВРАО В ПОЛОСТЬ (ПОЛОСТИ) ОСНОВНОГО КОНТЕЙНЕРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ БЛОКА КРЕПКОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Дистанционно управляемый мобильный ПР (рисунок 2.1) с инновационным адаптивным исполнительным механизмом схвата состоит из опорных стоек 1, горизонтальной перекладины 2, средства передвижения 3 (колесное, гусеничное, шагающее и т.д.), к которому прикреплен манипулятор 4 ПР, имеющий несколько степеней свободы подвижности, подобно человеческой руке. К конечной части манипулятора 4 ПР прикрепляется схват 5 . Инновационным схватом 5 ТВЭЛ 6 извлекается из промежуточного контейнера 7 и перегружается в основной контейнер 8.

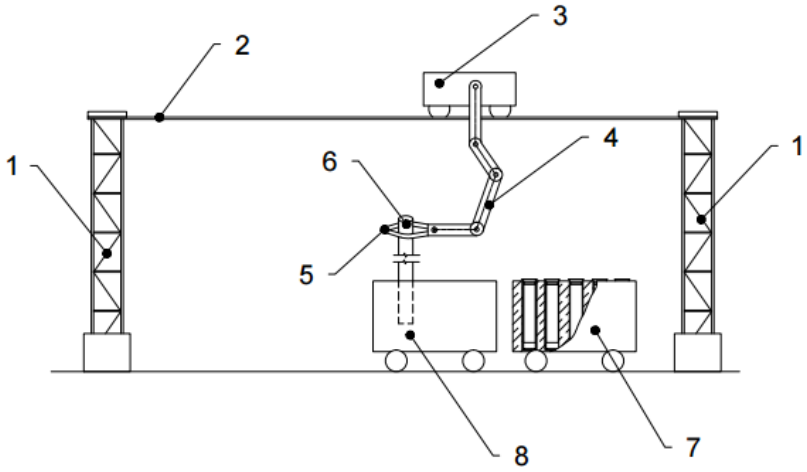


Рисунок 2.1 – Схема перегрузки ТВЭЛ-а ТВРАО из промежуточного контейнера в основной контейнер с применением инновационного схвата манипулятора ПР: 1 – опорная стойка; 2 – горизонтальная перекладина; 3 – средство передвижения; 4 – манипулятор; 5 – инновационный схват; 6 – тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ); 7 – промежуточный контейнер; 8 – основной контейнер.

На основе анализа работ предшественников [3-22],[26],[37] в работе предлагается инновационная конструкция трехфалангового адаптивного схвата - захватного устройства (ЗУ) манипулятора ПР. Инновационная конструкция (рисунок 2.2) трехфалангового адаптивного схвата манипулятора состоит из следующих конструктивных элементов: плитка-основание 1 для крепления фаланг – рычагов схвата, которая прикрепляется крепежным рычагом 2 к конечной части манипулятора.

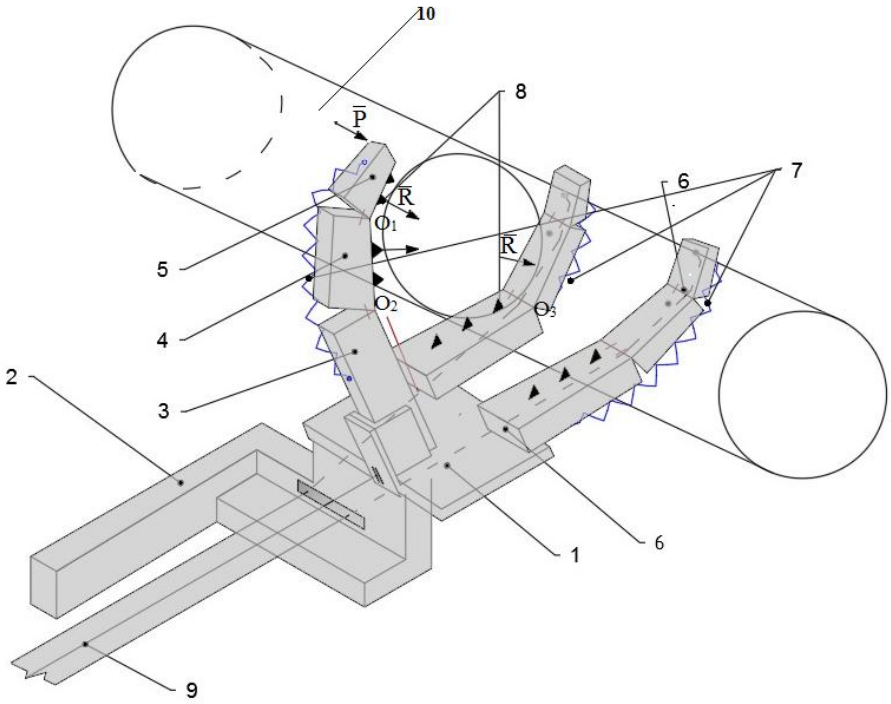


Рисунок 2.2 – Трехфаланговый адаптивный схват манипулятора робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера в основной контейнер для ТВРАО при захоронении его в хранилище (могильнике) ТВРАО: 1-плитка-основание для крепления основной фаланги рычага схвата; 2-крепежный рычаг манипулятора; 3-основная фаланга; 4-средняя фаланга; 5-конечная фаланга; 6-шарнир крепления смежных фаланг между собой; 7-стягивающая пружина; 8-удерживающий зуб; 9-гибкий тяговый элемент, 10 – ТВЭЛ.

ЗУ состоит из нескольких конструктивных элементов, так называемых схватывающих гибких рычагов схвата, кинематическая схема работы каждого из которых условно отождествляется с функционированием отдельного пальца руки человека. Каждый схватывающий гибкий рычаг схвата состоит, например, из 3-х фаланг: основной 3, средней 4 и конечной 5. Все фаланги 3–5 между собой соединяются шарнирами 6. Нижнее основание каждой основной фаланги 3 схватывающего гибкого рычага схвата крепится шарнирно к плитке – основанию 1. Между всеми смежно расположенными фалангами 3–5 каждого рычага схвата устанавливаются стягивающие пружины 7. На участках внутренней поверхности каждой фаланги 3–5 каждого рычага схвата укрепляются удерживающие зубья 8.

Захватывание предмета, например, ТВЭЛ-а, предназначенного для перемещения из промежуточного контейнера в основной контейнер для ТВРАО, осуществляется следующим образом. Схватывающие гибкие рычаги схвата, например, три схватывающих гибких рычага схвата позиционируются «рукой» манипулятора ПР над верхним участком ТВЭЛ-а, находящегося в промежуточном контейнере. Затем они перемещаются сверху вниз на тело верхнего участка ТВЭЛ-а и фиксируются напротив него таким образом, чтобы он был расположен между схватывающими гибкими рычагами схвата. В зависимости от конкретных условий, например, с одной стороны ТВЭЛ-а будут расположены два схватывающих гибких рычага схвата, а с противоположной

стороны его – один схватывающий гибкий рычаг схвата. В теле каждой фаланги 3 – 5 каждого рычага схвата формируется отверстие, продольная ось которого совпадает с продольной осью фаланги. После соединения всех фаланг 3 – 5 между собой шарнирами 6 каждого рычага схвата, в каждой из них размещается гибкий тяговый элемент 9. Первый гибкий тяговый элемент 9 размещается в отверстиях фаланг 3 - 5 от верхнего основания конечной фаланги 5, проходя вдоль нее в отверстии, сформированном в средней фаланге 4, в отверстии, сформированном в основной фаланге 3, и противоположный его конец размещается за ее пределами. Конец второго гибкого тягового элемента 9 закрепляется в верхней части средней фаланги 4, размещается в отверстии, сформированном в теле основной фаланги 3, и противоположный конец его размещается за ее пределами. Конец третьего гибкого тягового элемента 9 закрепляется в верхней части основной фаланги 3, устанавливается в отверстии, сформированном в теле ее, и противоположный конец его размещается за ее пределами. Каждый противоположно расположенный конечный участок гибкого тягового элемента 9 закрепляется на специальном приводе, установленном в пункте управления манипулятором ПР.
Аналогичным образом устанавливаются гибкие тяговые элементы 9 во всех фалангах 3-5 других схватывающих гибких рычагах схвата.

В зависимости от конкретных условий в полости, сформированной в основном контейнере, могут быть размещены один, два и более ТВЭЛ-ов и/или их части и др. Размещение ТВЭЛ-а и/или ТВЭЛ-ов и др. в других полостях, сформированных в основном контейнере, предусматривается осуществлять аналогичным образом.

При осуществлении технологической операции захватывания схватывающими гибкими рычагами схвата тела ТВЭЛ-а оператором на пункте управления специальным приводом осуществляется натяжение всех гибких тяговых элементов 9 схватывающих гибких рычагов схвата для осуществления прижатия внешних внутренних поверхностей всех фаланг 3-5, с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями 8 схватывающих гибких рычагов схвата к поверхности участка тела ТВЭЛ-а и обеспечения требуемого усилия взаимодействия между соответствующими поверхностями всех фаланг 3-5 с прикрепленными к каждой из них удерживающих зубьев 8, схватывающих гибких рычагов схвата и боковой поверхностью верхнего участка ТВЭЛ-а для его надежного удержания и базирования.

Затем манипулятором ПР ТВЭЛ поднимается вверх из промежуточного контейнера и манипулятор ПР с ТВЭЛ-ом перемещается по транспортному пути до места установки основного контейнера. Он устанавливается над соответствующей полостью, сформированной в основном контейнере, таким образом, чтобы нижнее основание ТВЭЛ-а совмещалось с участком верхнего основания полости, сформированной в основном контейнере.

Для освобождения верхнего участка ТВЭЛ-а 10 от каждой фаланги 3-5 каждого рычага схвата на пульте управления (на рисунке 2.2 не показано) механической рукой манипулятора ПР каждый конечный участок гибкого тягового элемента 9 освобождается от натяжения (фиксации) на приводе пункта управления. При этом усилие прижатия каждой фаланги 3-5, с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями 8, каждого рычага схвата к

поверхности верхнего участка тела ТВЭЛ-а 10 становится равной нулю. Под действием силы упругости сжимающе-разжимающей равной нулю. Под действием силы упругости сжимающе-разжимающей пружины 7 внешние внутренние поверхности каждой фаланги 3-5, с прикрепленными к каждой из них удерживающих зубьев 8,каждого рычага схвата отодвигаются от внешней ограничивающей поверхности верхней части ТВЭЛ-а 10.

Для повышения эффективности размещения ТВЭЛ-а и/или ТВЭЛ-ов и др. в полости, сформированной в основном контейнере, в ней предварительно устанавливается специальный направляющий элемент, например, воронка, изготовленная из металла и/или из пластика и др.

Применение данной технологической схемы перегрузки ТВЭЛ-а и/или ТВЭЛ-ов и др. из промежуточного контейнера в основной контейнер позволяет обеспечить высокую степень безопасности захоронения ТВРАО и безопасные условия работы персонала.

Ниже представлен другой вариант двухфалангового схвата для перегрузки ТВЭЛ-а (рис.2.3) [25].

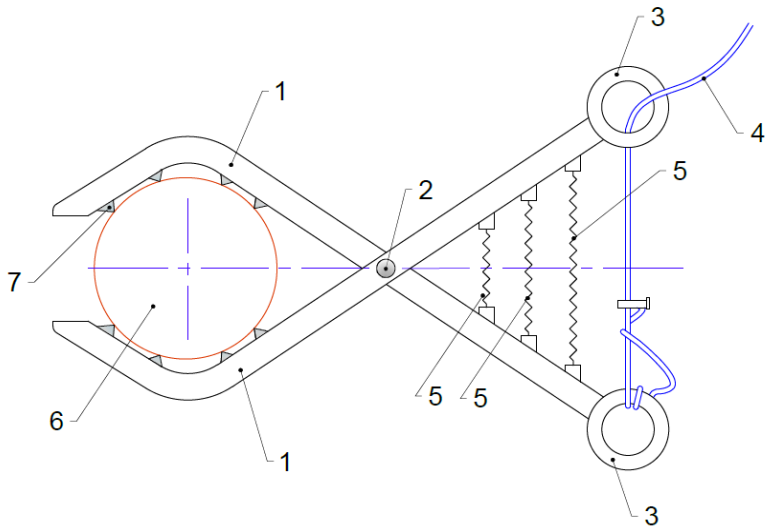


Рисунок 2.3 – Двухфаланговый схват для перегрузки ТВЭЛ-а

Общий вид конструкции механической руки приведен на рисунке 2.3 Зажимные рычаги 1 устанавливаются на общей оси 2 шарнирно с возможностью совершения возвратно-качательных движений относительно друг друга. При этом конечная часть каждого переднего зажимного рычага 1 имеет изогнутую форму, внешняя внутренняя поверхность которой, прижимаемая к ТВЭЛ-у, имеющему форму цилиндра различной длины, представляет собой дуги окружности, радиус которой равен радиусу ТВЭЛ-а и/или незначительно больше его. Противоположная внешняя наружная поверхность передней части каждого зажимного рычага 1 также может иметь форму дуги окружности и/или любую другую геометрическую форму, расположенной параллельно и/или практически параллельно и/или любым другим образом. Конечная задняя часть каждого зажимного рычага 1, являющаяся продолжением конечной передней части зажимного рычага,

имеющих произвольную форму. При этом внешняя внутренняя поверхность конечного участка каждого прижимного рычага 1 может быть прямолинейной и/или практически прямолинейной и/или представлять собой дугу окружности и/или иметь любую другую геометрическую форму с возможностью перемещении внешних внутренних поверхностей задних конечных частей зажимных рычагов 1 навстречу друг другу. При этом внешние наружные поверхности задних конечных частей зажимных рычагов 1 могут иметь любую геометрическую форму. К конечному участку задней части зажимного рычага жестко прикрепляется кольцо 3. К кольцу 3, жестко прикрепленного к конечному заднему участку зажимного рычага 1 жестко прикрепляется конечный участок гибкого тягового элемента 4. Противоположный конец гибкого тягового элемента 4 прикрепляется к кольцу 3. Конечный участок гибкого тягового элемента 4 размещается между кольцом 3 и пунктом управления манипулятора механического схвата (на рис. 2.3 не показано). Между участками внешних внутренних поверхностей задних частей захватывающих рычагов 1, расположенных напротив друг друга, устанавливается сжимающие-разжимающая пружина 5 и/или устанавливаются сжимающие-разжимающие пружины 5. При этом захват ТВЭЛ-а 6 производится посредством размещения над верхней частью его захватывающих рычагов 1. Затем захватывающие рычаги опускаются на верхний участок ТВЭЛ-а 6 таким образом, чтобы она была расположена между передними конечными частями захватывающих рычагов 1. При натяжении гибкого тягового элемента 4 его приводом (на рис. 2.3 не показано) задние конечные части захватывающих рычагов 1 перемещаются по направлению к друг другу. При этом сжимающе-разжимающая пружина 5 и/или сжимающе-разжимающие пружины 5 сжимаются. Внешние внутренние поверхности передних конечных частей захватывающих рычагов 1 прижимаются к внешней ограничивающей поверхности верхнего участка ТВЭЛ-а 6.

При этом в некоторых случаях для повышения точности базирования и надежности удержания захваченного ТВЭЛ-а 6 верхним участком внешних внутренних поверхностей передних частей захватывающих рычагов 1 на участке их внутренней внешней поверхности передней части захватывающих рычагов 1 жестко монтируется удерживающий зуб 7 и/или на участках их внутренней внешней поверхности жестко монтируются удерживающие зубья 7.

Для освобождения верхней части ТВЭЛ-а 6 от конечных передних частей захватывающих рычагов 1 на пульте управления (на рис.2.3) механической рукой манипулятора промышленного робота (МРМ ПР) 4 (рис.2.3) конечный участок гибкового тягового элемента 4 освобождается от натяжения (фиксации) (рис.2.3). При этом усилие прижатия передних частей захватывающих рычагов 1 становится равной нулю. Под действием силы упругости сжимающе-разжимающей пружины 5 и/или сжимающе-разжимающих пружин внешние внутренние поверхности конечных передних частей зажимающих рычагов 1 перемещаются от внешней ограничивающей поверхности верхней части ТВЭЛ-а 6. МРМ ПР 4 монтируется на грузовой

тележке 3 (рис.2.1), которая дистанционно устанавливается над транспортным контейнером 8 с ТВЭЛ-ми 6 для перегрузки их в основной контейнер 7. Грузовая тележка 3 МРМ ПР 4 перемещается по направляющей 2, установленной на опорах 1 (рис.2.1).

2.1 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЛАНГОВОГО СХВАТА ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТВЭЛ-а

Ниже дана кинематическая схема первого схвата и его 3D модель, которая просчитана на прочность и жесткость. Эта схема была разработана по рекомендациям работы [28],[29]. Сила прижатия внешних внутренних поверхностей передних конечных частей зажимающих рычагов 1 к внешней ограничивающей поверхности верхнего участка ТВЭЛ-а 6 определяется по следующей формуле[]:

$$F = K * G \qquad (2.1)$$

где, F – сжимающее усилие, К – коэффициент запаса, зависящий от характеристик материала схвата, G – масса перегружаемого ТВЭЛ-а 6.

Уравнение моментов сил, действующих на основную, среднюю и конечную фалангу каждого рычага схвата механической руки ПР относительно О (O_1, O_2, O_3), имеет вид:

$$\sum M_o(\varphi) = 0; \qquad (2.2)$$

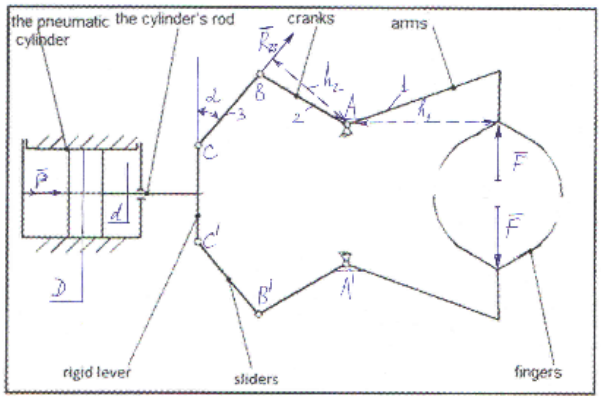
$$Pa(\varphi) = Rk \quad b(\varphi) + fRc(\varphi) + mgl(\varphi) \qquad (2.3)$$

где Р-сила, требуемая для надежного захвата всеми фалангами с прикрепленным к каждой из них удерживающих зубьев 8 каждого рычага схвата верхнего участка тела ТВЭЛ-а, н; φ - обобщенная угловая координата, определяющая положения рычага схвата, рад.(на рисунке 4 не показана); R-сила реакции со стороны поверхности верхнего участка ТВЭЛа на внутреннюю поверхность каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага схвата, н; a, b, c и l- плечи действия сил P и R относительно оси шарнира O каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага-схвата (на рисунке 4 не показано), мм; f – коэффициент трения между поверхностями верхнего участка ТВЭЛа и внутренними поверхностями каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага схвата (как правило, величина коэффициента трения скольжения между поверхностями конструктивных элементов, изготовленных из металлов , например, стали, равна 0,5).

Сила Р прижатия каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага схвата к поверхности верхнего участка ТВЭЛ-а определяется по формуле:

$$P = (a(\varphi))^{-1}\{Rk\ \ b(\varphi) + fRc(\varphi) + mgl(\varphi)\} \qquad (2.4)$$

Рассмотрим схват с двумя фалангами, общая схема которой была разработана в работе [28]



a)



b)

Рисунок 2.4 - схема механизма и 3D модель схвата по [28-29]

Соотношение между усилием на приводе и силой зажатия детали схватом (рис.2.4,а) определяются из условий статического равновесия:

- из условия равновесия сил $\sum F_i = 0$ в точке С для верхней симметричной ветви С-В-А имеем:

$$-\frac{P}{2} + R_{23}\sin\alpha = 0 \text{ или } R_{23} = \frac{P}{2\sin\alpha} = 0 \qquad (2.5)$$

- из условия равновесия моментов сил $\sum M_{Ai} = 0$ относительно точки А для верхней симметричной ветви С-В-А имеем:

$$Fh_1 - R_{23}h_2 = 0 \text{ или } P = 2\frac{Fh_1}{h_2}\sin\alpha \qquad (2.6)$$

Здесь - 1 и 2 составляют одно жесткое звено; R_{23} - реакция в шарнире В; α - угол между штоком и звеном 3 в шарнире С; h_1, h_2 - плечи моментов сил F, R_{23}.

Проведен типовой расчет 3D модели (рис.2.4 b) схвата на жесткость и прочность, разработанного и в [28-29].

Нагрузка на зубьях схвата взята равной 400 Н, моделирование проводилось на «Autodesk Inventor» [28-29]. Получены картины распределения напряжений, смещений, коэффициентов запаса прочности, деформаций, контактных давлений.

На рисунке 2.5 показано распределение приведенных напряжений по Мизесу. Слева на рисунке расположена цветовая шкала со значениями напряжений. Напряжения даются на рисунке в мегапаскалях (МПа), причем максимальное равно 784.2 МПа и оно возникает в окрестности точки модели, соответствующей точке А схемы схвата (рис.2.4,а).

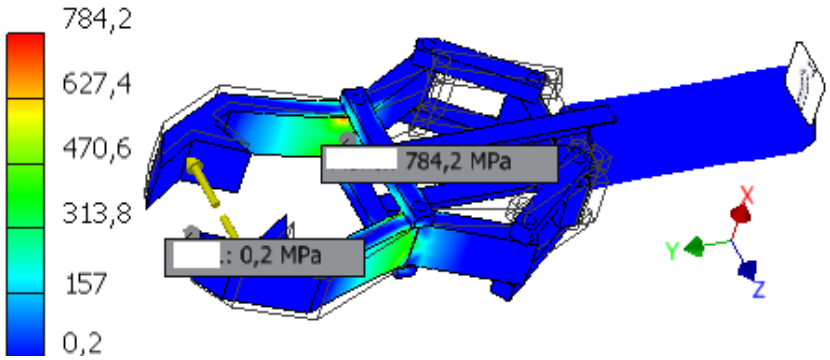


Рисунок 2.5 – Расчет 3D модели двухфалангового схвата на прочность

На рисунке 2.3 даны картины упругих смещений схвата, характеризующих его точность позиционирования за счет жесткости конструкции. Слева на рисунке расположена цветовая шкала со значениями упругих смещений. Упругие смещения даются на рисунке в миллиметрах. Как видно по картине распределения наибольшие упругие смещения расположены в районе зубьев схвата. Для данной модели максимальное смещение расположено на кончике зубьев и равно 0.8839 мм.

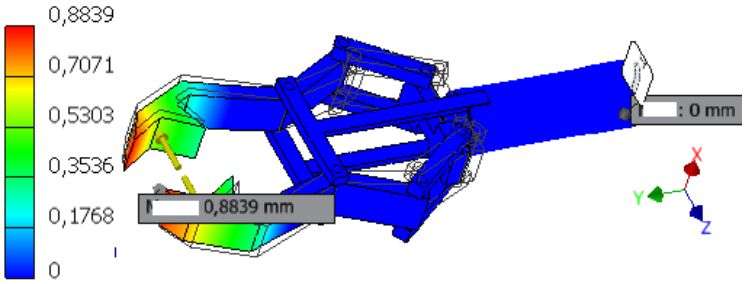


Рисунок 2.6 – Расчет 3D модели двухфалангового схвата на жесткость

На рисунке 2.4 даны картины распределения коэффициентов запаса прочности, показывающих во сколько раз предел прочности превышает приведенные напряжения по Мизесу в точках модели. Слева на рисунке расположена цветовая шкала со значениями коэффициентов запаса прочности. Коэффициент запаса прочности это безразмерная величина. Значения коэффициента запаса прочности показывают слабость конструкции в окрестности звена 1.

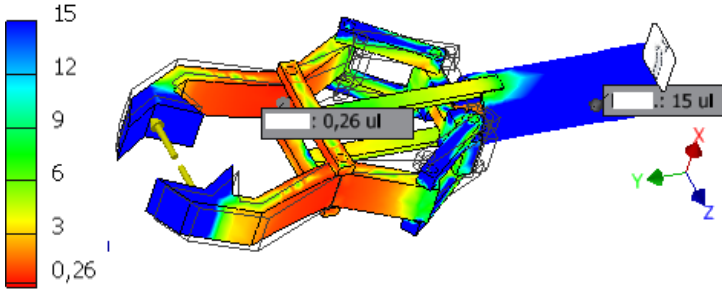


Рисунок 2.7 – Расчет 3D модели двухфалангового схвата на запас прочности

2.2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЛАНГОВОГО АДАПТИВНОГО СХВАТА ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТВЭЛ-а

Ниже исследуется трехфаланговый адаптивный схват манипулятора промышленного робота (ПР) для перегрузки ТВЭЛ-а и/или ТВЭЛ-ов из промежуточного контейнера в основной контейнер.

Выше была разработана структурная схема адаптивного трехфалангового схвата для перегрузки ТВЭЛ-а (рис.2.2). В этой работе дальнейшие исследования этого схвата продолжены.

Для нее получены соотношения, связывающие метрические и силовые параметры модели и разработан его 3D модель (рис.2.9). Эта схема была разработана с учетом рекомендаций работы [28-29].

Рассмотрим плоскую модель схвата с гибкими приводами (рис.2.9). Деталь (ТВЭЛ) радиуса R_1 находится в схвате (рис.2.5-2.7). Схват состоит из плитки-основания 0 для шарнирного крепления G основной фаланги 3. К ней последовательно, через шарниры B и A, крепятся средняя 2 и конечная 1 фаланги. В точке E прикрепляется первый гибкий тяговый элемент (ГТЭ). Он проходит через отверстия F, K. И противоположный конец первого ГТЭ проходит через точку L на плитке-основании. И далее ГТЭ идет к приводу. Конец второго ГТЭ закрепляется в точке F средней фаланги. Далее второй ГТЭ проходит в отверстии K основной фаланги. И противоположный конец ГТЭ проходит через точку L на плитке-основании. И далее второй ГТЭ идет к приводу. Конец третьего ГТЭ закрепляется в точке K основной фаланги. И противоположный конец его проходит через точку L на плитке-основании. И далее третий ГТЭ идет к приводу.

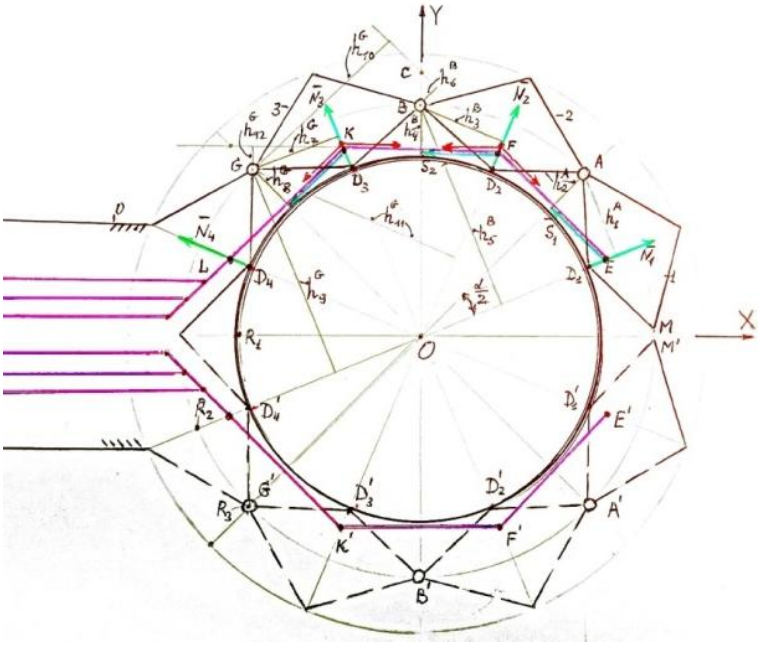


Рисунок 2.8 – плоская схема схвата с гибкими приводами для перегрузки ТВЭЛ-а

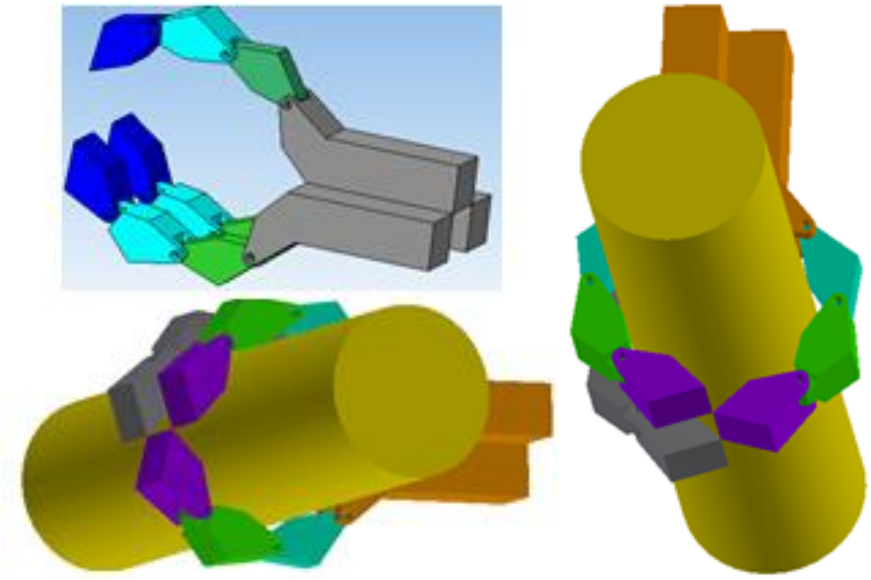


Рисунок 2.9 - 3D модель схвата с гибкими связями для перегрузки ТВЭЛ-а

Фаланги представляют собой четырехугольники, симметричные относительно радиальной линии (рис.2.8). Верхние точки этих четырехугольников лежат на радиальной линии, на расстоянии R_3 от точки О. Шарниры G, B и A расположены на окружности радиуса R_2. Дуги $\overset{\smile}{GB}$, $\overset{\smile}{BA}$, $\overset{\smile}{AM}$ опираются на центральные углы α. Радиусы окружностей связаны соотношением: $R_3 > R_2 > R_1$. Зубья схвата расположены в точках D_1, D_2, D_3, D_4 верхней симметричной ветви G-B-A-M схвата. И в точках D_1', D_2', D_3', D_4' нижнейсимметричной ветви G'-B'-A'-M' схвата.

Точки E, F, K и L расположены на расстоянии «а» в радиальном направлении от зубьев D_1, D_2, D_3, D_4. Причем, расстояние «а» такое, что 0<a<(R_2-R_1). Тогда ГТЭ создают моменты сил для удержания ТВЭЛа в схвате.

Из условия некасания ГТЭ к окружности детали имеем $(R_1 + a)\cos(\alpha/2) > R_1$ или $a > R_1/\cos(\alpha/2) - R_1$, где α – центральный угол (рис.2.8). Пусть $\alpha = 45^0$, тогда охват ТВЭЛ-а тремя фалангами пальца был достаточным для полуокружности. Найдем внутреннее усилие $\vec{N}_1$ (показано зеленой стрелкой), которое возникает в «зубе» 1 (точка D_1 конечной фаланги). Из условия равновесия моментов сил $\sum M_{Ai} = 0$ получим:

$$N_1 h_1^A - S_1 h_2^A = 0 \text{ или } N_1 = \frac{S_1 h_2^A}{h_1^A} \qquad (2.7)$$

Здесь h_1^A - плечо момента усилия $\vec{N}_1$ относительно точки А, h_2^A - плечо момента усилия $\vec{S}_1$ ($\vec{S}_1$ - внешнее усилие от ГТЭ-1, показано зеленой стрелкой). Причем $h_1^A = R_2 \sin(\frac{\alpha}{2})$, $h_2^A = R_2 - (R_1 + a)\cos(\frac{\alpha}{2})$

Найдем внутреннее усилие $\bar{N}_2$ (показано зеленой стрелкой), которое возникает в зубе 2 (точка D_2). Рассмотрим условие равновесия моментов сил $\sum M_{Bi} = 0$. От закрепленной в точке Егибкой связи, в точкеF возникают две реакции, равные по величине S_1. Они направлены: одна от F к E, вторая от F к K (показаны оранжевыми стрелками). Их сумма равна $S_F = 2S_1 \sin(\frac{\alpha}{2})$ и она направлена от точки Fк точке O. Она создает момент, прижимающий фалангу 2 к ТВЭЛу. Из условия равновесия имеем:

$$N_2 h_3^B - S_2 h_4^B + S_1 h_6^B + N_1 h_5^B - S_F h_3^B = 0 \qquad (2.8)$$

Здесь $\vec{S}_2$ - внешнее усилие от ГТЭ-2 (показано зеленой стрелкой), $h_3^B = h_1^A, h_4^B = h_2^A, h_5^B$ - плечо момента усилия $\vec{N}_1$, $h_5^B = R_2 \sin(3\frac{\alpha}{2})$. Найдем h_6^B - плечо момента усилия $\vec{S}_1$ относительно точки B. Линия OB в системе координат XOY: $X = 0$. Найдем точку E: $X_E = (R_1 + a)\cos(\frac{\alpha}{2}), Y_E = (R_1 + a)\sin(\frac{\alpha}{2})$. Найдем точку F: $X_F = (R_1 + a)\cos(3\frac{\alpha}{2}), Y_F = (R_1 + a)\sin(3\frac{\alpha}{2})$. Найдем точку C: $X_C = 0, Y_C = Y_E - \frac{X_E(Y_F - Y_E)}{X_F - X_E}$, $\angle OCE = 180^0 - 90^0 - 2\frac{\alpha}{2} = 45^0$. Длина $BC = Y_C - R_2$, тогда $h_6^B = BC\sin(\angle OCE)$.

Усилия $\vec{N}_2$ равно:

$$N_2 = \frac{1}{h_3^B}(S_2 h_4^B - S_1 h_6^B - N_1 h_5^B + S_F h_3^B) \qquad (2.9)$$

Здесь возникают некоторые условия. Усилие N_2 должно быть не меньше или равно усилию в зубе 1, то есть $N_2 \geq N_1$. Чтобы зуб 2 с не меньшим усилием давил на ТВЭЛ.

Найдем внутреннее усилие $\bar{N}_3$, которое возникает в зубе 3 (точка D_3). Рассмотрим условие равновесия моментов сил $\sum M_{Gi} = 0$. От закрепленной в точке E гибкой связи, в точкеF возникают две реакции, равные по величине S_1. Они направлены: одна от F к E, вторая от F к K. (показаны оранжевыми стрелками). Их сумма равна $S_F = 2S_1 \sin(\frac{\alpha}{2})$ и она направлена от точки F к точке O. От закрепленной в точке E гибкой связи, в точкеK возникают две реакции, равные по величине S_1. Они направлены: одна от K к F, вторая от K к L. (показаны оранжевыми стрелками). Их сумма равна $S_{K1} = 2S_1 \sin(\frac{\alpha}{2})$ и она направлена от точки K к точке O.

От закрепленной в точке F гибкой связи, в точке Kвозникают две

реакции, равные по величине S_2 и направленные – одна от K к F, вторая от K к L. Их сумма, равная $S_{K2} = 2S_2 \sin(\frac{\alpha}{2})$ и она направлена от точки K к точке O. Она создает момент, прижимающий фалангу 1 к ТВЭЛ-у. Из условия равновесия получим:

$$N_3 h_7^G - S_3 h_8^G + S_1 h_{10}^G + N_1 h_9^G + S_2 h_{12}^G + N_2 h_{11}^G - S_{K1} h_7^G - S_{K2} h_7^G = 0 \qquad (2.10)$$

где $\vec{S}_3$ - внешнее усилие от ГТЭ-3 (показано зеленой стрелкой), $h_7^G = h_3^B = h_1^A$, $h_{12}^G = h_6^B$, $h_8^G = h_4^B = h_2^A$, $h_{11}^G = h_9^G = h_5^B = R_2 \sin(3\alpha/2)$. Найдем h_{10}^G как кратчайшее расстояние от точки G до линии, проходящей через точки E и F в системе координат XOY: $X_G = -R_2 \sin(2\frac{\alpha}{2}), Y_G = R_2 \cos(2\frac{\alpha}{2})$. Уравнение линии, проходящей через точки E и F: $\frac{X - X_E}{X_F - X_E} = \frac{Y - Y_E}{Y_F - Y_E}$ или $A_0 X + B_0 Y + C_0 = 0$, где коэффициенты этого уравнения есть $A_0 = Y_F - Y_E$, $B_0 = X_F - X_E$, $C_0 = (X_F - X_E)Y_E - (\mathrm{Y}_F - Y_E)\mathrm{X}_E$. Тогда $h_{10}^G = \left| \frac{A_0 X_G + B_0 Y_G + C_0}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} \right|$. Тогда усилия $\vec{N}_3$:

$$N_3 = \frac{1}{h_7^G}(S_3 h_8^G - S_1 h_{10}^G - N_1 h_9^G - S_2 h_{12}^G - N_2 h_{11}^G + S_{K1} h_7^G + S_{K2} h_7^G) \qquad (2.11)$$

Усилие N_3 должно не меньше, чем усилия в зубьях 1и 2.

В зубе D_4, лежащем на плитке-основании 0, из условия равновесия усилий для верхней симметричной части сечения ТВЭЛа имеем: $-\bar{N}_1 - \bar{N}_2 - \bar{N}_3 - \bar{N}_4 = 0$ или $\bar{N}_4 = -\bar{N}_1 - \bar{N}_2 - \bar{N}_3$. Соответственные значения $\bar{N}_1', \bar{N}_2', \bar{N}_3', \bar{N}_4'$ в симметричной нижней ветви G'-B'-A'-M' в точках D_1', D_2', D_3', D_4' схвата будут им равными по величине и зеркально симметричными по направлению относительно оси OX. Получили картину статических усилий в плоской модели схвата.

Проведены расчеты, разработанной нами 3D модели (рис.2.9). Исследуется распределение напряжений, смещений, коэффициентов запаса прочности, деформаций, контактных давлений при различных значениях гибких тяговых усилий, моделируемых в шести гибких связях и различных метрических параметрах схвата.

2.3 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРНО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОГО СХВАТА РОБОТА С УЧЕТОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТВЭЛ-а.

Для научно-обоснованного выбора и обоснования конструктивных, геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров

инновационного схвата манипулятора ПР разработана математическая модель их расчета с учетом стохастических процессов его взаимодействия с объектом, т.е. с ТВЭЛ-ом (рис.2.10).

Одними из основных параметров схвата манипулятора робота для перегрузки ТВРАО, определяющими эффективность и качество его работы, являются форма, размеры и число удерживающих зубьев, укрепленных на внешней внутренней поверхности каждой фаланги каждого рычага схвата, а также предельная их грузоподъемность.

Величина силы сопротивления взаимодействия удерживающих зубьев с верхним участком тела ТВЭЛ-а, например, трех удерживающих зубьев, один из которых укрепляется на внешней внутренней поверхности в центральной части основной фаланги рычага схвата, второй из которых укрепляется на внешней внутренней поверхности центральной части средней фаланги рычага схвата, третий из которых укрепляется на внешней внутренней поверхности центральной части конечной части рычага схвата, для надежного базирования и фиксирования удерживаемого ими верхнего участка тела ТВЭЛ-а определяется размерами, формой и массой ТВЭЛ-а.

Связь между указанными параметрами конструктивных элементов конструкции схвата и ТВЭЛ-а предусматривается установить при следующих допущениях:

– верхний участок тела ТВЭЛ располагается в схвате внутри пространства условного цилиндра между внешними внутренними поверхностями всех фаланг всех рычагов схвата, диаметр D которого равен или практически равен его наибольшему диаметру (рисунок 2);

– отношение диаметра ТВЭЛ-а к максимальному диаметру свободного пространства между внешними внутренними поверхностями всех фаланг всех рычагов схвата, находящихся в рабочем состоянии, равняется коэффициенту $k_{н.}$, который в первом приближении является отношением диаметра ТВЭЛ-а к диаметру свободного пространства между внешними внутренними поверхностями всех фаланг всех рычагов схвата, и условно принимается равным $k_{н.} \cong 0{,}999$;

– величины длины удерживающих зубьев и расстояния между ними должны обеспечивать их свободное контактирование с внешней поверхностью оболочки ТВЭЛ-а, обуславливаемое силой трения скольжения между удерживающими зубьями и телом ТВЭЛ-а, и последующее его фиксирование и надежное базирование между удерживающими зубьями всех фаланг всех рычагов схвата.

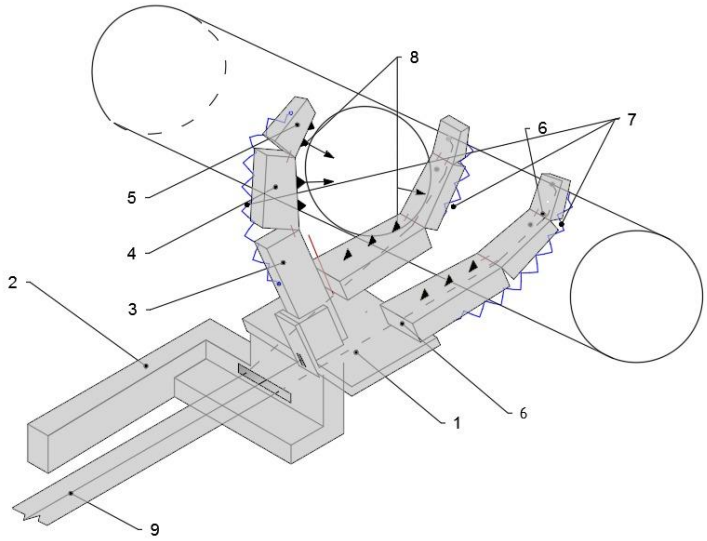


Рисунок 2.10 – Трехфаланговый адаптивный схват манипулятора робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера в основной контейнер для ТВРАО при захоронении его в хранилище (могильнике) ТВРАО: 1-плитка-основание для крепления основной фаланги рычага схвата; 2-крепежный рычаг манипулятора; 3-основная фаланга; 4-средняя фаланга; 5-конечная фаланга; 6-шарнир крепления смежных фаланг между собой; 7-стягивающая пружина; 8-удерживающий зуб; 9-гибкий тяговый элемент, 10 – ТВЭЛ.

Исходя из данных допущений и задавая массу ТВЭЛ-а, диаметр пространства между внутренними поверхностями всех фаланг, с прикрепленным к внешней внутренней поверхности каждой из них каждого рычага схвата удерживающим зубом, схвата определяется по формуле [37-38]:

$$D = \sqrt[3]{6m_k/(\pi\gamma_k k_H)}\ , \qquad (2.12)$$

где $m_к$ - масса ТВЭЛ-а, кг; γ_k- плотность материала ТВЭЛ-а, кг/м^3.

Определение оптимальной формы поперечного сечения удерживающего зуба с учетом условия его прочности производится с учетом следующих основных вариантов его нагружения (рисунок 2.11):

– поворот фаланг рычага схвата с удерживающими зубьями с целью фиксации их у внешней поверхности оболочки ТВЭЛ-а;

– осуществление операции взаимодействия каждого торцового участка удерживающего зуба с внешней поверхностью оболочки тела ТВЭЛ-а посредством генерирования силы трения скольжения между каждым удерживающим зубом и внешней поверхностью оболочки тела ТВЭЛ-а.

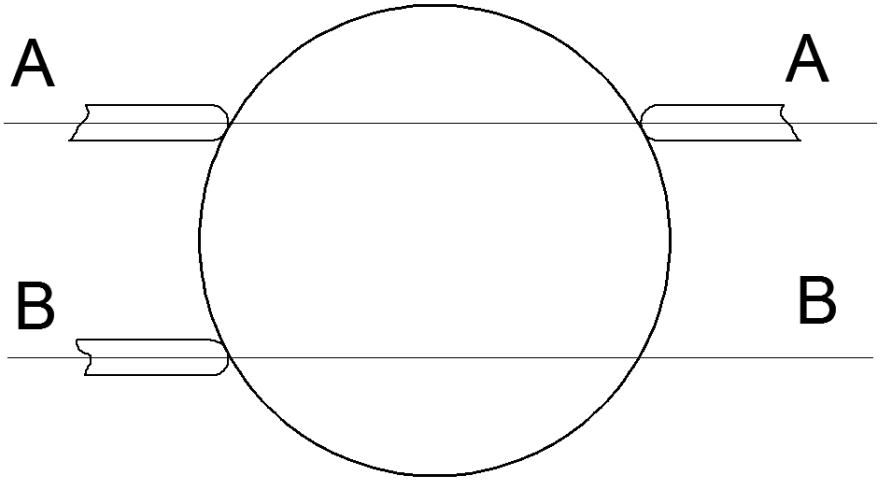
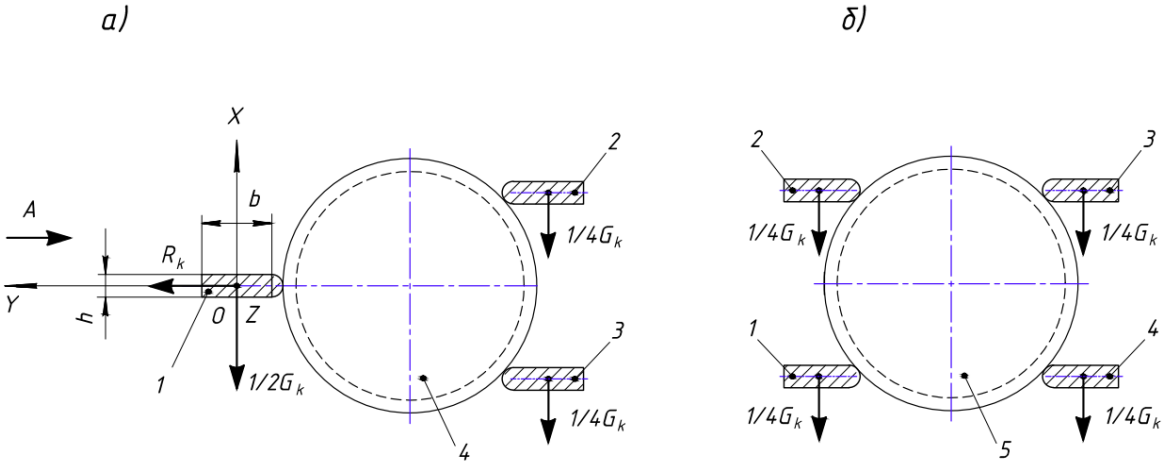


Рисунок 2.11 - Вариант расположения удерживающих зубьев фаланг рычагов схвата манипулятора робота при взаимодействии их с оболочкой участка тела ТВЭЛ-а.

Поворот фаланг рычагов схвата предусматривается осуществлять с применением двух наиболее эффективных вариантов расположения трех удерживающих зубьев фаланг рычагов схвата возле верхнего участка тела ТВЭЛ-а:

– два удерживающих зуба (рисунок 2.12,а), находящихся на внутренней поверхности фаланг рычагов схвата, располагаются с одной стороны внешней поверхности участка тела ТВЭЛ-а, один удерживающий зуб, находящийся на внешней внутренней поверхности фаланги рычага схвата, располагается возле противоположной стороны внешней поверхности участка тела ТВЭЛ-а;

– два удерживающих зуба (рисунок 2.12,б), находящихся на внешней внутренней поверхности фаланг рычага схвата, располагаются с одной стороны внешней поверхности участка тела ТВЭЛ-а и два удерживающих зуба, находящихся на внешних внутренних поверхностях фаланг рычага схвата, располагаются возле противоположной стороны внешней поверхности участка тела ТВЭЛ-а.



1, 2, 3 и 4 – удерживающие зубья; 5 – ТВЭЛ

b- длина удерживающего зуба; h - ширина удерживающего зуба.

Рисунок 2.12 - Варианты схемы нагружения удерживающих зубьев фаланг рычага схвата (вид по продольной оси удерживающего зуба): а- при зажиме удерживающими зубьями участка тела ТВЭЛ-а с боков; б- при зажиме удерживающими зубьями участка тела ТВЭЛ-а сверху и снизу.

Согласно первому варианту продольные оси удерживающих зубьев в процессе переноса ТВЭЛ-а (рисунок 2.12,а) располагаются горизонтально, площадь продольного сечения каждого удерживающего зуба *1,2,3* имеет прямоугольную форму с переменными по длине удерживающего зуба длиной b и толщиной *h* его, т. е. каждый удерживающий зуб имеет форму балки, площадь продольного сечения которой переменная (рисунок 2.13 *а, б)*.

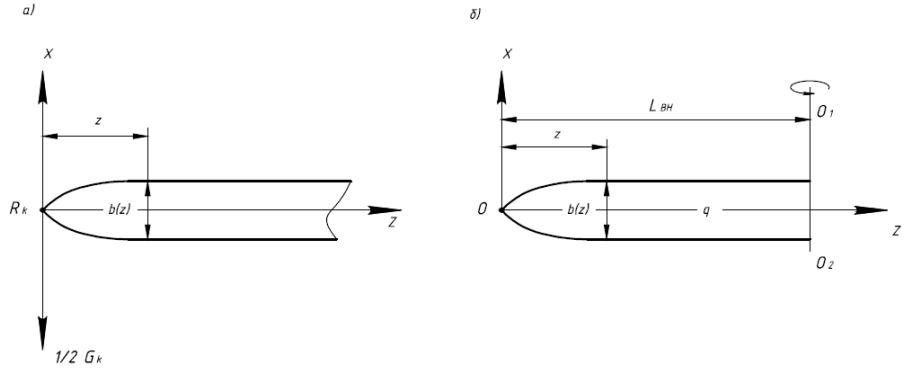


Рисунок 2.13 - Варианты схемы изгиба удерживающего зуба при зажиме ими участка тела ТВЭЛ-а с боков и при зажиме ими участка тела ТВЭЛ-а сверху и снизу.

Величина силы реакции R_k со стороны участка тела ТВЭЛ-а на каждую конечную торцовую часть удерживающего зуба, равная силе давления удерживающего зуба на тело ТВЭЛ-а. определяется из условия его надежного фиксирования удерживающими зубьями, которая определяется из условия его удержания за счет силы трения скольжения между контактирующими поверхностями конечных торцовых участков удерживающих зубьев и участка тела ТВЭЛ-а, по формуле [37-38]:

$$R_k = k_{зап} m_k g/(2f_{тр}) \qquad (2.13)$$

где $k_{м.}$–коэффициент, учитывающий физико-механические характеристики материалов удерживающего зуба и внешней оболочки тела ТВЭЛ-а, $k_{м.} > I$; m_k – масса ТВЭЛ-а, н; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $f_{ск.}$ - коэффициент трения скольжения между поверхностью удерживающего зуба и поверхностью участка тела ТВЭЛ-а.

Критическая сила на изгиб удерживающего зуба при взаимодействии его с участком тела ТВЭЛ-а производится по формуле [38]:

$$P_{КР.} = [\sigma_и] F\varphi, \qquad (2.14)$$

где $P_{КР.}$ – критическая сила на изгиб при взаимодействии удерживающего зуба

с участком тела ТВЭЛ-а, н; $[\sigma_и]$ - допускаемое напряжение на изгиб удерживающего зуба при взаимодействии его с участком тела ТВЭЛ-а, Па; F – площадь продольного сечения удерживающего зуба, м^2; φ – коэффициент продольного изгиба удерживающего зуба.

$$W_y = h(z)b^2(z)/6;$$

Параметры площади поперечного сечения удерживающего зуба на устойчивость при контактировании его конечной торцовой части с участком тела ТВЭЛ-а с учетом условия его закрепления в фаланге, определяемой коэффициентом приведения длины удерживающего зуба μ=1, определяются по формуле [38]:

$$F=P/[\sigma_и]\,\varphi, \qquad (2.15)$$

где P – сила прижатия удерживающего зуба к участку тела ТВЭЛ-а, н.

Условно принимается, что форма поперечного сечения удерживающего зуба представляет собой квадрат. Площадь квадрата поперечного сечения удерживающего зуба $F=b^2$, а его момент инерции относительно продольной оси равен $J_{min}=b^4/12$. Задача решается методом итерации. В первом приближении задается φ=0,5.

Величина площади поперечного сечения удерживающего зуба определяется по формуле (2.15). Величины стороны квадрата b и радиуса инерции поперечного сечения удерживающего зуба определяются по формулам:

$$b=(F)^{1/2}, \qquad (2.16)$$
$$i=(J_{min}/F)^{1/2}, \qquad (2.17)$$

Коэффициент гибкости удерживающего зуба определяется по формуле:

$$\lambda=l\,\mu/i, \qquad (2.18)$$

где λ – коэффициент гибкости удерживающего зуба; l – длина удерживающего зуба.

Затем на следующем шаге определяется уточненное значение коэффициента продольного изгиба удерживающего зуба φ_i на i-ом шаге [38].

Параметры площади поперечного сечения удерживающего зуба определяются при выполнении следующего условия:

$$|\,\varphi_{i+1} - \varphi_i\,|/\,\varphi_i \le \varepsilon, \qquad (2.18)$$

где φ_{i+1} и φ_i – соответственно, коэффициенты продольного изгиба удерживающего зуба на i+1 и i –ом шаге итерации.

Длина удерживающего зуба определяется с учетом его конструктивных особенностей и условий нагружения его относительно взаимодействия

конечной торцовой частью его с поверхностью участка тела ТВЭЛ-а .

Из условия (2.18) определяются геометрические параметры площади поперечного сечения и оптимальная длина удерживающего зуба.

Для повышения точности определения геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР с учетом стохастических процессов взаимодействия его с поверхностью верхнего участках захваченного объекта предлагается метод их оценки [2],[23], [27], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35].

Величина силы P, т.е. P_k, с которой схват взаимодействует с верхним участком тела захваченного объекта, определяется из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} P_{k+1} = P_k + u_k + \gamma_k \\ z_k = P_k + \delta_k \end{cases} \qquad (2.19\text{-}2.20)$$

где P_k – величина P, определяемая с учетом случайной ошибки ее отклонения в «идеальной модели»; x_k+1 – величина силы P, определяемая с учетом случайной ошибки ее отклонения в «идеальной модели» в другом временном интервале; u_k – величина силы P, контролирующая эволюцию матрицы состояния изменения ее, с которой схват взаимодействует с поверхностью верхнего участка тела манипулируемого объекта, которая определяется аналитически по формуле (2.14); z_k – величина силы P, определяемая экспериментально с учетом систематической ошибки, обуславливаемой точностью измерительных приборов; γ_k и δ_k - соответственно, ошибки математической модели аналитического расчета и экспериментального определения силы P, измеряемые техническими средствами измерения, и которые определяются по формулам (2.19) и (2.20).

При этом случайные ошибки, вызванные отклонением спроектированного трехфалангового адаптивного механизма схвата манипулятора ПР от его «идеальной» модели, и представляющие собой случайные ошибки, определяются статистическими моментами $M\gamma_i$, величины которых и их законы распределения не зависят от времени (номера итерации i); средние значения ошибок равны нулю: $M\gamma_i = M\delta_i = 0$; сам закон распределения случайных величин может быть и не известен, но известны их дисперсии σ_γ^2 и σ_δ^2; предполагается, что все случайные ошибки независимы.

Предполагается, что на i-ом шаге найдено отфильтрованное значение с сенсора P_i^{opt}, которое приближает истинную координату системы P_i. Неизвестная величина P_{i+1} определяется по формуле:

$$P_{i+1} = P_i + u_i + \gamma_i \qquad (2.21)$$

где u_i – величина, контролирующая эволюцию матрицы состояния изменения силы P.

Поэтому еще не получая значение с сенсора полагается, что на шаге

i+1 система эволюционирует согласно этому закону и с сенсор покажет величину близкую к значению $P_i^{opt} + u_i$. С другой стороны, на шаге i+1 имеется не точное показание с сенсора z_{i+1}. Идея состоит в том, чтобы получить наилучшее приближение к истинной координате x_{i+1} выбирается так называемая «золотая» середина между показанием z_{i+1} источника с сенсора и $P_i^{opt} + u_i$, являющимся его предсказанием. Показанию с сенсора дается весовой коэффициент Калмана К, а на предсказанное значение $(1 - K)$ величина P_{i+1}^{opt} определяется по формуле:

$$P_{i+1}^{opt} = K \cdot z_{i+1} + (1 - K) \cdot \left(P_i^{opt} + u_i\right) \quad (2.22)$$

где К – весовой коэффициент Калмана, величина которого выбирается такой, чтобы получившееся оптимальное значение координаты P_{i+1}^{opt} было бы наиболее близко к величине истинной координаты P_{i+1}. Например, если известно, что показания с сенсора очень точные, то степень доверия к нему будет больше и значение z_{i+1} имеет больший вес (К близко единице). Если же с сенсор, наоборот, совсем неточный, тогда необходимо больше ориентироваться на теоретически предсказанное значение $P_i^{opt} + u_i$. В общем случае, чтобы найти точное значение коэффициента Калмана необходимо минимизировать величину случайных и систематических ошибок γ_i и δ_i.

В общем случае, чтобы найти точное значение коэффициента Калмана необходимо минимизировать величину e_{i+1} среднего значения математического ожидания от квадрата ошибки:

$$e_{i+1} = P_{i+1} - P_{i+1}^{opt} \quad (2.23)$$

После подстановки в уравнение (3.10) формулы (3.9) получается:

$$e_{i+1} = (1 - K) \cdot \left(e_i + \gamma_i\right) - K \cdot \delta_{i+1} \quad (2.24)$$

Минимизируется среднее значение математического ожидания от квадрата ошибки:

$$M\left(e_{i+1}^2\right) \to \min \quad (2.25)$$

Математическое ожидание квадрата величины ошибки определения силы Р взаимодействия трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР с ТВЭЛ-ом при его перегрузке из промежуточного контейнера в основной контейнер определяется по формуле:

$$M\left(e_{i+1}^2\right) = (1 - K)^2\left(Me_i^2 + \sigma_\gamma^2\right) + K^2\sigma_\delta^2 \quad (2.26)$$

Это выражение принимает минимальное значение при условии:

$$K_{i+1} = \frac{Me_i^2 + \sigma_\gamma^2}{Me_i^2 + \sigma_\gamma^2 + \sigma_\delta^2} \quad (2.27)$$

Для определения весового коэффициента Калмана необходимо вычислить статистические моменты случайных ошибок математической модели и систематических ошибок измерений силы Р трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при взаимодействии его с верхним участком ТВЭЛ-а. Таким образом, реализуется алгоритм решения разработанной математической модели, оценки стохастической системы динамического процесса взаимодействия трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР с ТВЭЛ-ом с использованием итерационной формулы для вычисления весового коэффициента Калмана.

Расчет зависимости функции корреляции случайного процесса изменения силы Р от параметров трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР с учетом стохастических процессов его взаимодействия с ТВЭЛ-ом произведен на условном примере.

Результаты зависимости значений случайного процесса изменения силы Р от параметров трехфалангового адаптивного схвата ПР и стохастических процессов перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера в основной контейнер, полученными в лабораторных условиях для условного примера, приведены в таблице 3.2 [2, 23, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

Таблица 2.1– Результаты зависимости значений функции случайного процесса изменения силы P трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при осуществлении стохастических процессов перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера в основной контейнер, полученными в лабораторных условиях для условного примера

Показатели	Расстояние от условной оси шарнира О соединения смежнорасположенных фаланг с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями рычага схвата до точки контакта внутренней поверхности всех контактирующих фаланг с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага-схвата с поверхностью верхнего участка ТВЭЛа, X, мм				
	X_1=25	X_2=30	X_3=35	X_4=40	X_5=45
Значения функции случайного процесса изменения силы P	$5\cdot10^{-2}$	$3{,}9\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-2}$	$0{,}5\cdot10^{-2}$	$0{,}09\cdot10^{-2}$

Результаты зависимости функции корреляции случайного процесса изменения силы P от параметров трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при осуществлении стохастических процессов его взаимодействия с ТВЭЛ-ом, перегружаемого из промежуточного контейнера в основной контейнер, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты зависимости функции корреляции случайного процесса изменения силы P от параметров трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при осуществлении стохастических процессов его взаимодействия с ТВЭЛ-ом, перегружаемого из промежуточного контейнера в основной контейнер

Показатели	Продолжительность периода времени измерения силы P трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР , τ ,с				
	τ_1=0	τ_2=5	τ_3=10	τ_4=15	τ_5=20
Функция корреляции B(τ), в заданный период времени взаимодействия трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР с верхним участком ТВЭЛ-а, τ, с	2,82	2,2	1,04	0,3	0,05

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

– Разработана конструкция двухфалангового схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а;

– разработана конструкция трехфалангового схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а;

– разработаны математические и компьютерные модели двухфалангового схвата для исследование прочности и жесткости его основных конструктивных элементов;

– разработаны математические и компьютерные модели трехфалангового схвата для исследование прочности и жесткости его основных конструктивных элементов;

– разработан математический метод выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров исполнительного механизма схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а с учетом стохастического процесса его функционирования.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНОГО СХВАТА РОБОТА НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕГРУЗКИ АГРОСАДОВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

3.1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ОБЛИКА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С АДАПТИВНЫМ СХВАТОМ ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ТВЭЛ-а, АГРОСАДОВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ ТРАНСПОРТНОГО КОНТЕЙНЕРА В ОСНОВНОЙ

Переход от существующего облика (начального состояния) совокупности машин к его новому облику перспективного состояния машин осуществляется с целью повышения эффективности (результативности) их эксплуатации. Эффективность определяется как отношение полученного эффекта к затратам, вложенными на его достижение, либо для достижения того и другого, то есть требующегося эффекта с возможно меньшими экономическими и материальными затратами. Для расчета реальных экономических параметров бульдозера нужно иметь информацию о значениях параметров существующей и предполагаемой перспективной машины. В общем виде методологический подход к обоснованию и выбору рационального варианта облика машины основывается на основных принципах системного анализа и синтеза сложных структур по критерию «эффективность-стоимость» [36].

Решение задачи экономической оценки вариантов облика перспективного робота должно осуществляться методом двухуровневой оптимизации по схеме многокритериального анализа альтернатив. В качестве частных показателей эффективности робота при его эксплуатации выступает экспертный анализ оценки вариантов решения по результатам патентно-информационного поиска. На основе преобразования результатов экспертного анализа предложено учитывать следующие показатели оценки эффективности робота: ($\mathbf{X_1}$) –адаптивность, т.е. свойство приспособляемости к условиям эксплуатации; ($\mathbf{X_2}$) –ремонтопригодность, т.е. качество, заключающееся в приспособленности к восстановлению исправности конструктивных элементов робота путем предупреждения, обнаружения и устранения неисправностей и отказов их; ($\mathbf{X_3}$) – долговечность, т.е. свойство изделия длительно (с возможными перерывами на ремонт) сохранять работоспособность в определенных условиях эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния; ($\mathbf{X_4}$) – безотказность машин, т.е. свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации; ($\mathbf{X_5}$) – экономичность, т.е. выполнение технологических операций с наименьшими затратами; ($\mathbf{X_6}$) –производительность, т.е. скорость выполнения производственных операций; ($\mathbf{X_7}$) – сложность системы управления, т.е. количество уровней управления; ($\mathbf{X_8}$) – срок службы конструктивных элементов ходовой части и механизмов передвижения робота;

($\mathbf{X_9}$) – качество структурно-кинематических схем исполнительных механизмов робота, т.е. возможность точного воспроизведения запрограммированного движения схвата робота и распределения усилий между звеньями его конструкции.

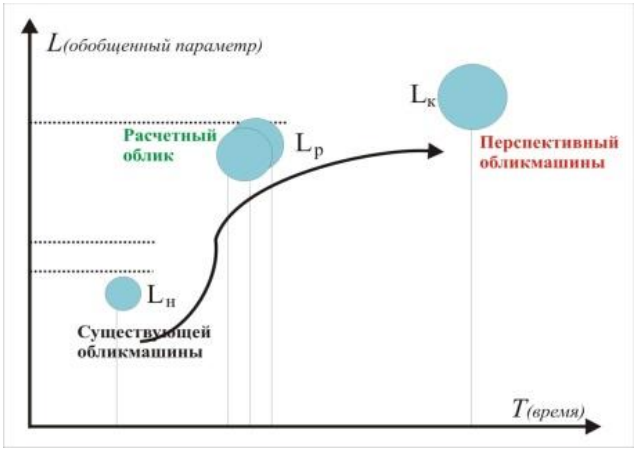
В данной модели первые девять критериев ($\mathbf{X_1}$) – ($\mathbf{X_9}$) составляют базовую часть. Для получения более полного представления об эффективности строительных машин предложен дополнительный параметр к базовой модели – ($\mathbf{X_{10}}$) - степень восприятия конструктивного решения машины инновационными изменениями, проводимыми в соответствии с требованиями ее эффективного функционирования.

Матрица основных эксплуатационных параметров математической модели перспективного облика ЗСМ на примере робота, эксплуатируемого при перегрузки ТВЭЛ-а, представлена в виде наличия эксплуатационных параметров обозначено «1», а отсутствие их – «0».

В процессе разработки и создании математической модели построения перспективного облика робота функционально-структурная оценка его сведена к решению задачи: свёрстка системы частных критериев в обобщенный критерий требующегося эффекта (эффективности).

Данные критерии характеризуют структуру, надежность, адаптивность к условиям технологического процесса, производительность, оснащенность сменными рабочими органами, систему управления, инфраструктуру и всестороннее обеспечение запасными частями и др. Они во многом определяют функциональные и экономические параметры машины на примере робота с адаптивным схватом, которые связаны с затратами, необходимыми для реализации мероприятий по достижению ее цели и поддержанию функциональных показателей на необходимом уровне.

Графическое представление процесса формирования перспективного облика робота представлено на рисунке 3.1



T(время)

L_H – существующей облик робота; L_k - перспективный облик робота

Рисунок 3.1 – Графическое представление процесса формирования перспективного облика робота.

Реализация алгоритма выбора многих критериев заключается в построение обобщенного критерия путем линейной свертки критериев. Он сводится к тому, что обобщенный критерий выражается как линейная комбинация значений остальных критериев:

$$U(x)=\sum w_i x_i \ , \qquad (3.1)$$

где: w_i – вес (важность) i-го критерия, назначенный экспертами;
x_i – количественная оценка по Xi-му критерию.

Структура облика робота изменяется за счет проводимых мероприятий, направленных на увеличение значения того или иного его параметра. Решение задачи сводится к тому, чтобы перестроить структуру состояния облика робота, стремясь приблизить ее к конечному, целевому состоянию.

Экономическая часть расчетного блока излагаемой методики начинается с определения потребности финансовых средств для реализации плана формирования нового облика робота в полном объеме и времени, необходимого для достижения этой цели при заданном уровне финансирования, которые определяются по формуле:

$$\Phi=\sum(K_i - C_i)\cdot S_i \ , \qquad (3.2)$$

где Φ – потребность в дополнительных финансовых средствах для реализации программы формирования нового облика робота при заданном уровне финансирования; K_i - значение i – ого параметра перспективного облика робота; C_i - значение i – ого параметра существующего облика робота; S_i - цена за единицу i – ого мероприятия формирования нового облика робота.

Срок T, в течение которого будет реализована программа формирования нового облика бульдозера, определяется по формуле:

$$T = \Phi / F, \qquad (3.3)$$

где T – срок, в течение которого будет реализована программа формирования нового облика робота; Φ – потребность в дополнительных финансовых средствах для реализации программы формирования перспективного облика робота при заданном уровне финансирования.

После этого рассчитывается норма отклонения начального состояния существующего облика бульдозера от его конечного целевого состояния, выраженная в процентах, которая определяется по формуле:

$$N = (\sum C_i / K_i)/I, \qquad (3.4)$$

где N – норма существующего состояния облика робота;
I – общее количество параметров, характеризующих структуру существующего облика робота.

Окончательное решение задачи сводится к поиску максимального

значения нормы отклонения достигнутых параметров состояния перспективного облика робота при заданном уровне финансирования:
$H \rightarrow max;$

$$H = (\sum P_i/K_i) / I; \quad (3.5)$$

и

$$F \sum (P_i - C_i) \cdot S_i, \quad (3.6)$$

где H– норма достигнутого состояния перспективного облика робота;
P_i –значение i – ого параметра достигнутого перспективного облика робота;
S_i – цена за единицу i – ого мероприятия формирования перспективного облика робота;
F–заданный уровень (выделенное) финансирования на формирование перспективного облика робота в течение определенного периода времени (как правило, в течение одного года);
K_i –значение i – ого параметра конечного, целевого перспективного облика робота; C_i – значение i – ого параметра существующего облика робота; – порядковый номер параметра структуры существующего облика робота.

Результаты расчета параметров функционально-экономической модели оценки перспективного облика машины примере робота в течение заданного периода времени, выполненный для условного примера, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1– Исходные данные и результаты расчета перспективного облика робота для условного примера

Облик роботаа					
Выделенные финансовые средства, единица, 70	Потребные финансовые средства, единица, 144	Срок достижения цели, год, 2,5	Норма начального состояния %, 64,	Норма достигнутого состояния, %, 81	
Результаты расчета					
Наименование параметра	Исходное состояние	Требуемый облик	Цена за единицу	Полученный облик, %	Достижение цели, %
Безотказность	38	50	2	39	78
Ремонтопригодность	16	20	2	16	80
Долговечность	4	10	2	8	80
Производительность	16	20	5	16	80
Адаптивность	8	10	5	8	80
Сложность управления	7	15	5	12	80
Структура конструкции схвата робота	3	4	10	4	100
Срок эксплуатации робота	1	3	10	3	100

Задача решается в два этапа. На первом этапе определяется потребность в денежных средствах и продолжительность периода времени, необходимого для

достижения цели. В условном примере они, соответственно, составляют 144 единицы и 2,5 года. Норма начального состояния облика робота определяется в процентах. В условном примере она равняется 64%.

На втором этапе детализируется расчет, где определяются достигнутые рассчитанные показатели относительно конечного, целевого параметра состояния перспективного облика роботаа. На рисунке 3.1 представлены отклонения каждого рассчитанного показателя относительно конечного перспективного облика робота. Структура достигнутого перспективного облика робота существенно изменилась, значения одного параметра (в условном примере он имеет номер 8), составляющее на начальное состояние 33%, достигло 100%.

Лепестковая диаграмма результатов расчета показателей перспективного облика робота, произведенных для условного примера, приведена на рисунке 3.2

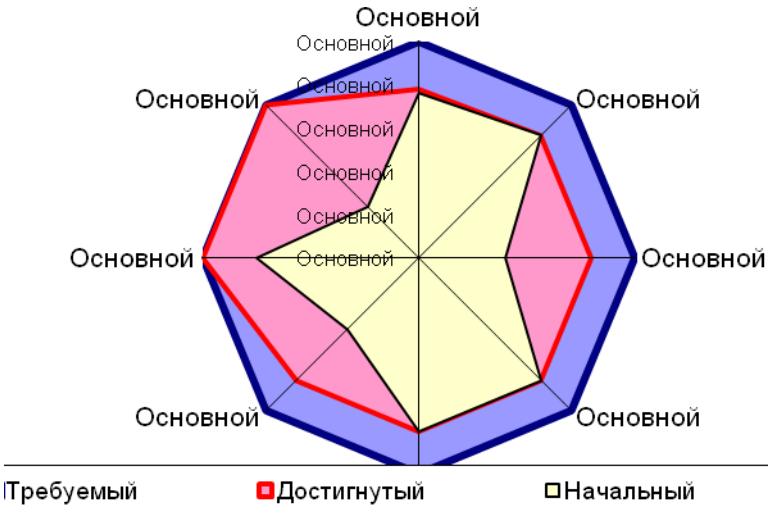


Рисунок 3.2 – Лепестковая диаграмма результатов расчета показателей перспективного облика робота, проведенных для условного примера.

3.2 КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СХВАТА ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ АГРОСАДОВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Разработанные и созданные конструкции двухфалангового и трехфалангового схватов, а также разработанные соискателем методы их исследований были протестированы им для перегрузки агросадоводческой продукции в производственных условиях в 2017 г. В период прохождения им научной стажировки в Университете Кассино (г. Кассино, Италия) под научным руководством профессора М.Чакорелли.

В данном параграфе описывается конструкция модернизированного механизма схвата для захвата продукции садоводства. Проектное решение было достигнуто посредством систематического подхода путем оценки всех возможных конструктивных исполнений. Предложенная структура

оптимизирована и математически смоделирована. Затем прототип был построен и испытан в лаборатории. Процесс разработки и результаты испытаний изучались для подтверждения эффективности разработанного прототипа.

Захватное устройство является наиболее важным компонентом робота в процессе работы с садоводческой продукцией, так как оно выступает в качестве интерфейса между роботизированной системой и продуктом.

В настоящее время сбор продукции садоводства обычно осуществляется вручную работниками



a) b)

Рисунок 3.3 – Примеры упаковочных линий: а) Автоматическая упаковочная линия для яблок; б) Упаковочные операции, выполняемые людьми

После операции сбора урожая обычно происходит автоматический отбор и упаковка линиями, показанными на рис. 3.3(a). Тем не менее, упаковка для высококачественных продуктов по-прежнему выполняется в основном людьми-операторами, как показано на рис. 3.3(b). Основным препятствием для автоматизации задачи является эффективность захватов, так как механизм должен уметь аккуратно захватывать и удерживать продукты садоводства. Это может привести к снижению производственных затрат и сокращению времени между сбором урожая и продажей на рынке.

Чтобы спроектировать захват для роботизированной установки, требуется анализ объекта [3-6]. Эта статья посвящена средним продуктам садоводства, таким как яблоки, помидоры, цитрусовые и персики. С 1961 года Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) устанавливает международные стандарты для фруктов и овощей, предоставляя информацию о стандартных размерах для коммерческих продуктов. Соответствующая информация суммирована в таблице 3.1. ОЭСР устанавливает стандарты даже для качества фруктов и овощей, но научный подход не используется для проверки качества, поскольку для параметров качества требуется только визуальное наблюдение. Средний диаметр большинства рассматриваемых продуктов садоводства находится в диапазоне от 40 до 100 мм. Вес варьируется даже у разных видов, но всегда находится в диапазоне от 50 до 500 г [3-6].

Форма этих продуктов приблизительно сферическая с некоторыми существенными исключениями в лимонах и продолговатых помидорах. Механические свойства яблок, груш и томатов были измерены в нескольких исследовательских проектах [3-6]. Данные суммированы в таблице 3.2. Поскольку помидор обладает худшими механическими свойствами, его можно использовать в качестве эталонного фрукта для разработки захватов для продуктов садоводства.

Возможные решения для захватных устройств могут быть определены по общим соображениям среди следующих схем, как показано в таблице 3.3:

– захваты, которые состоят из двух или более жестких губок и механизма для перемещения их к объекту. Захват обычно имеет структуру с 1-3 степенями подвижности. Управление силой необходимо для функционирования, и даже одного датчика достаточно, чтобы избежать повреждения объекта. Низкая гибкость захвата является его основным недостатком, поскольку жесткие губки не могут обернуться вокруг объекта или приспособиться к нему.

– Искусственные руки, дизайн которых делает их похожими на человеческие руки. Они состоят из нескольких антропоморфных пальцев и способны захватывать объект, оборачиваясь вокруг него. Они могут быть гибкими и адаптироваться к большинству форм, но им нужно несколько исполнительных механизмов и датчиков. Это усложняет управление и приводит к чрезмерным затратам.

– Пневматические устройства, которые используют частичный вакуум для захвата объектов с непористой поверхностью. Сцепление трудно контролировать, и оно может оставить следы на поверхности продуктов садоводства или даже повредить их. Кроме того, присоски не могут прилипать к некоторым изогнутым или неровным поверхностям, не в состоянии поднять продукт. По этим причинам пневматические устройства не могут считаться подходящими для применений с продуктами садоводства.

Таблица 3.1 – Стандартная форма продуктов садоводства

Продукт	Мин.размер (мм)	Макс.размер(мм)
Яблоки	60	110
Абрикосы	30	60
Клементины	35	60
Лимоны	45	90
Апельсины	53	120
Персики	56	100
Помидоры	35	105

Таблица 3.2 – Механические свойства общих фруктов и овощей

Продукт	Модуль Юнга средний [МПа]	Отклонение модуля Юнга [МПа]	Коэффициент Пуассона
Помидор – Спелый	2,32	н.д.	0,74

Продолжение таблицы 3.2

Помидор - не спелый	4,07	н.д.	0,55
Груша	5,80	0,50	0,25
Яблоко	12,89	2,43	0,32

Таблица 3.3 – Требования к захватам продукции садоводства

Требование	Захват	Рука	Пневм.устр.
Геометрия: Радиус: 20–50 мм	Да	Да	Да
Сила: Захват без повреждений	Да	Да	Нет
Энергия Электроприводы	Да	Да	Нет
Материалы Нетоксич.мат-лы	Да	Да	Да
Операция: Легкоуправляемый	Да	Нет	Да

– Другие механизмы захвата, которые могут быть основаны на магнито или электроадгезии; они не могут управлять органическими продуктами.

Таким образом, подходящую конструкцию захватного механизма можно рассматривать как пересечение захватов и рук, так как она должна быть гибкой, чтобы адаптироваться даже к неправильным формам, но в то же время она должна иметь структуру с 1 до 3 СП для легкого управления.

Таблица 3.4 – Требования к структуре захватных губок при захвате продукции садоводства

Требование	Жесткая губка	Шарнирная губка	Эластичная губка
Силы: Захват	Да	Да	Да
Без повреждений	Да	Да	Да
Адаптивный	Нет	Да	Да
Материалы: Нетоксичный матер.	Да	Да	Да
Операция: легконтролируемый	Да	Нет	Да

Самым важным компонентом роботизированного захвата или руки является захватная губка, так как именно эта деталь непосредственно контактирует с захваченным предметом. К разработке губки можно подойти, используя следующие решения:

–жесткие губки, состоящие из одного твердого тела; они перемещаются механизмом захватного устройства. Они достигают захвата также благодаря трению. Большинство современных конструкций захватов используют их, поскольку они довольно просты в проектировании, сборке и управлении.

–Шарнирные губки, которые образованы двумя или более корпусами, соединенными приводными соединениями. Они могут адаптировать свою

конфигурацию захвата к нерегулярным и сложным формам, но им требуется более сложная разработка и управление с несколькими двигателями.

– Эластичные губки, основанные на эластичных материалах. Эта губка имеет структуру, которая может адаптироваться к неправильным формам. Коэффициент податливости увеличивает контактную поверхность, следовательно, уменьшается напряжение на захваченном объекте. Таблица 3.5 указывает ожидаемые результаты вышеупомянутых решений.

После оценки этих аспектов был выбран захват 1-DoF с совместимыми иглами в качестве подходящей конструкции для захвата продукции садоводства.

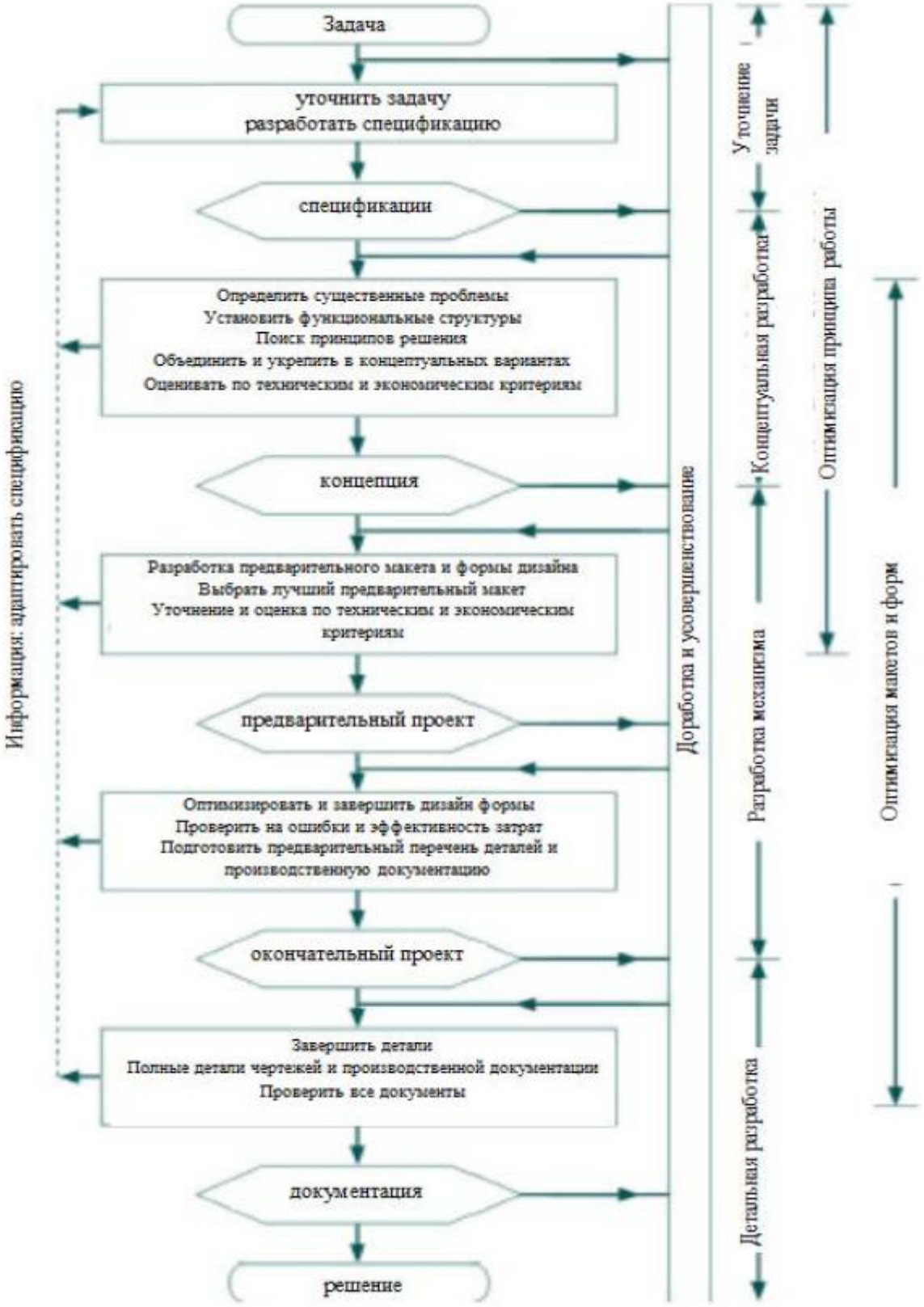


Рисунок 3.3 – Процедура систематического инженерного проектирования в соответствии с директивой VDI 2221 [8]

3.3 РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ДВУХФАЛАНГОВОГО СХВАТА ДЛЯ АГРОСАДОВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Конструкция предлагаемого захвата была разработана с помощью систематической процедуры, описанной Pahl и Beitz [3-6], в соответствии с руководством VDI. Процесс проектирования был сделан с особым вниманием к заявке на продукцию для садоводства, выполнив шаги на рис. 3.3:

- Анализ проблем для описания и идентификации задач;
- Определение требований к заданию;
- Концептуальный дизайн на основе функциональных структур;
- Оценка технико-экономической эффективности;
- Разработка предварительного дизайна;
- Оптимизация размеров и функциональности;
- Точный дизайн и CAD модель.

Структура захвата была выбрана путем анализа необходимых функциональных возможностей для продукции садоводства, чтобы получить решение для сцепления с надлежащей механикой захвата. Окончательный дизайн разработан с конкретными чертежами деталей после итеративного процесса оптимизации.

Предложенное решение представляет собой трехзвенный захват, основанный на кривошипно-шатунном механизме, как на рис. 3.4(a). Фиксатор (корпус 2) соединен с кулисой (корпус 1) и с ползунком (корпус 3). Ползунки трех губок закреплены на одной раме, и их движение контролируется одним линейным приводом. Даже если можно использовать губки с высокой степенью соответствия, предпочтение может отдаваться жесткому механизму, поскольку его довольно легко анализировать, создавать и проверять на правильность операции захвата.

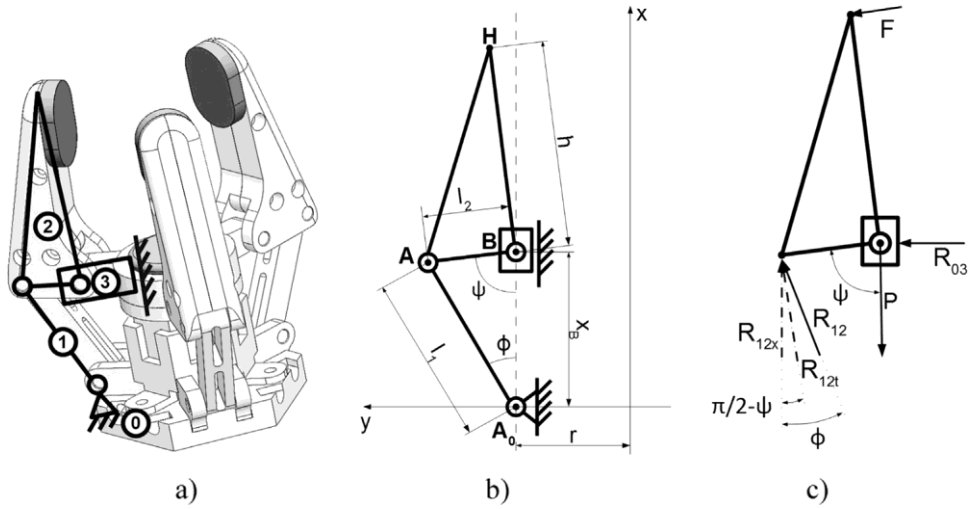


Рисунок 3.4 – Предлагаемое захватное решение: a) кинематическая схема механизма губки; b) кинематическая схема с расчетными параметрами; c) Диаграмма свободного тела для ползунка (корпус 2) и ползунка (корпус 3)

Соответствие ограничено областью кончиков губок. Наиболее важным параметром кончиков губок является материал, так как он должен обладать гиперэластичным поведением. Возможное решение может быть идентифицировано с видом резины. Несколько различных каучуков могут быть использованы для захвата:

– поролон, который представляет собой каучук, изготавливаемый с пенообразователем для создания заполненной воздухом матрицы структуры [3-6]. Поролон обычно изготавливается из полиуретана или латекса, так что он легкий и может смягчать удары, путем упругого сжатия изделия во время манипуляции, но его коэффициент трения может быть слишком низким для данной задачи;

– натуральные каучуки, основанные на латексе и собираемые с определенных деревьев. Они имеют большой коэффициент растяжения и высокую упругость;

– силиконовая резина, стабильный и стойкий эластомер. Его можно легко формовать в гелеобразном или жидком состоянии посредством литья под давлением, а затем он может быть преобразован в твердое состояние посредством процесса после впрыска. Он очень инертен, но его амортизирующая способность может быть ниже, чем у пенных каучуков [3-6];

– другие синтетические каучуки, которые можно использовать при условии, что они не содержат токсичных пластификаторов, таких как фталаты.

Среди всех возможных вариантов в качестве критерия проектирования используется индекс захвата (G.I.) в [3-6], поскольку он представляет собой компактное выражение для оценки производительности механизма захвата. Индекс захвата определяется в [3-6] как

$$G.I. = \frac{F \sin \zeta}{P} \tag{3.7}$$

в которой P - сила, действующая на привод, F - сила захвата, а ζ - угол конфигурации механизма при захвате. Следующие уравнения могут быть записаны со ссылкой на параметры конструкции, показанные на рис. 3.4(b), для описания кинематики механизма захвата как

$$l_2 \sin \psi = l_1 \sin \phi \tag{3.8}$$

$$\cos \phi = \frac{x_B^2 + l_1^2 + l_2^2}{2 x_B l_1} \tag{3.9}$$

где l_1 и l_2 - соответственно длина первого и второго звена механизма, а положение губки x_B описывает конфигурацию механизма.

Кроме того, статическое равновесие захвата может быть оценено для характеристики механизма при захвате. Со ссылкой на рис.3.4 с условиями равновесия для моментов вокруг точки B и для сил в направлении X можно записать в виде

$$Fh - R_{12t} l_2 = 0 \quad (3.10)$$

$$R_{12x} - P = 0 \quad (3.11)$$

где силы R_{12x} и R_{12t} представляют компонент реакции ограничения R_{12} соответственно вдоль оси X и оси, перпендикулярной к связи 2 (AB). Поскольку никакая внешняя сила или момент не действуют на ссылку 1 (A_0A), R_{12} имеет ту же ориентацию ф этой ссылки. Реакции R_{12x} и R_{12t} можно выразить как

$$R_{12t} = R_{12}\cos(\phi + \psi - \frac{\pi}{2}) \quad (3.12)$$

$$R_{12x} = R_{12}\cos\phi \quad (3.13)$$

Эти уравнения дают

$$P = \frac{Fh\cos\phi}{l_2\cos(\phi + \psi - \frac{\pi}{2})} \quad (3.14)$$

Затем, подставляя уравнения. (4.2) и (4.8) в формуле (4.1) Индекс захвата для предлагаемого захвата может быть выражен как

$$G.I. = \frac{l_1}{h} tg\phi\cos(\phi + \psi - \frac{\pi}{2}) \quad (3.15)$$

Как показано в формуле (3.15) G.I. Размер захвата зависит от отношения первого звена к высоте гребня и от конфигурации механизма. Самый простой способ увеличить индекс захвата - сделать палец максимально коротким, уменьшив высоту пальца h. К сожалению, минимальная высота ограничена размером изделия, поскольку она должна составлять более половины максимального диаметра захваченного объекта. Другая прямая зависимость G.I. находится на l_1. Поскольку l_1 оказывает влияние даже на зависимую от конфигурации часть, любое изменение может привести к неожиданным изменениям G.I. Следовательно, никакая тривиальная оптимизация невозможна, и требуется численная оптимизация путем решения задачи оптимизации, поскольку индекс захвата зависит от конфигурации. Таким образом, механизм может быть оптимизирован двумя различными способами [3-6], а именно:

Максимизация среднего индекса захвата, который может быть выражен как

$$\max G.\,I._{mean} \text{ объект } l_{i,min} < l_i < l_{i,max} \text{ for } i=1,2 \quad (3.16)$$

Минимизация отклонения индекса захвата, используя в качестве постановки задачи

$$min \frac{G.I._{max} - G.I._{min}}{G.I._{mean}} \text{ объект } l_{i,min} < l_i < l_{i,max} \text{ for } i=1,2 \quad (3.17)$$

Каждый геометрический параметр захвата ограничен минимальными и

максимальными размерами в зависимости от заданного ассортимента, как показано в таблице 3.6. Разработка более мелких звеньев затрудняет изготовление и сборку шарниров. Большие узлы приведут к более крупным размерам для этой задачи. Чтобы получить оптимальные значения расчетных параметров захвата, их диапазоны были дискретизированы и кэффициент G.I. был оценен для каждой возможной геометрической комбинации. Тогда для каждой геометрии среднее значение G.I. и отклонения G.I. были оценены для всех конфигураций. Результаты оптимизации приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.6 – Пределы диапазонов расчетных параметров захвата

Переменная:	Мин.[мм]	Макс.[мм]
l_1	30.00	60.00
l_2	15.00	20.00
R	30.00	30.00

Таблица 3.7 – Результаты оптимизации захвата

l_1[мм]	l_2[мм]	$G.I._{mean}$	Отклонение	Критериа:
30.00	20.00	0.316308	0.126631	Макс.значение
42.00	20.00	0.297702	0.060774	Мин.отклонение

Так как первое решение выглядит лучше, чем второе по среднему значению G.I. (6,2%), но значительно хуже (108,5%) по отклонению, тот, с минимальным отклонением, можно считать наиболее удобным. Выбранное конструктивное решение относится к случаю с l_1, равным 42,00 мм, и l_2, равным 20,00 мм. Ход ползунка для этого решения составляет 15,00 мм, при x_B в диапазоне от 31,00 до 46,00 мм. Расстояние кончика губки от оси симметрии, как на рис. 4.3(b), равно среднему радиусу захваченного продукта и может быть выражено как

$$r_H=r+h\sin(\frac{\pi}{2}-\psi) \qquad (3.18)$$

Анализируя движение захвата с помощью разработанной конструкции механизма, r_H колеблется от 7,25 мм до 58,61 мм. Следовательно, захват может схватывать любое изделие в диапазоне диаметров от 14,50 до 117,22 мм. Сила срабатывания P может быть определена из уравнения (3.14) с использованием силы F, геометрии и конфигурации механизма. Как только конфигурация захвата определена по его кинематике, сила F может быть рассчитана из условий статического равновесия при захвате. Следующие допущения исходят из условии что и фаланги и продукт моделируются как твердые тела, и внешние силы отсутствуют. Кулоновская модель с коэффициентом трения μ, равным 0,5, может удобно описывать трение между пальцем и продуктом. Каждая фаланга загружается таким же образом (как для осесимметричного условия) с полезной нагрузкой Q. Таким образом, из рис. 3.4(c), баланс сил на оси Z можно записать в виде

$$3\mu F\sin\psi - 3F\cos\psi - Q = 0 \quad (3.19)$$

получаем

$$F = \frac{Q}{3(\mu \sin\psi - \cos\psi)} \quad (3.20)$$

Подставляя уравнение (3.20) в уравнение (3.11) максимальная сила срабатывания P_{max} может быть вычислена непосредственно. Большинство продуктов для садоводства имеют вес в диапазоне от 0,5 до 2,0 Н [9]. Принимая во внимание вес продукта 5,0 Н и расчетный коэффициент безопасности 2,5, P_{max} рассчитывается равным 106,66 Н, а средняя сила приведения в действие P_{mean} между всеми конфигурациями равно 56,41 Н. Вращательный двигатель, такой как шаговый двигатель или двигатель с сервоприводом постоянного тока, можно удобно использовать для приведения в действие захвата, добавив в систему ведущий винт. Чтобы рассчитать момент срабатывания, необходимо смоделировать геометрию винта. Коммерческий шпиндель и гайка ходового винта были выбраны для сбора данных [3-6], а затем для создания прототипа. Шпиндель и гайка имеют трапецеидальную резьбу (DIN103 Tr.10 3). Крутящий момент, необходимый для поднятия нагрузки с помощью ходового винта, определяется в [3-6] как

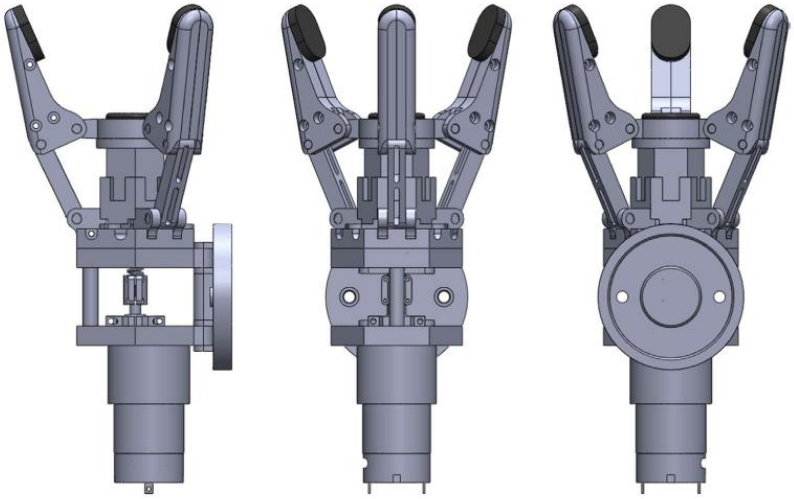


Рисунок 3.5 – Окончательная САПР захвата: а) вид справа; б) вид спереди; в) вид сзади

$$T = \frac{P d_m}{2}\left(\frac{l + \pi \mu_s d_m}{\pi d_m + \mu_s l}\right) \quad (3.22)$$

где l - ведущий винт, d_m - его средний диаметр и μs - коэффициент трения для скользящего контакта между винтом и гайкой. Коэффициент статического

трения равен μ_s ¼ 0,33 для сухой стальной гайки на стальном винте, а коэффициент динамического сухого трения равен μsd ¼ 0,15, как сообщается в [3-6]. Максимальный требуемый крутящий момент рассчитывается как T ¼ 0,22 Нм.

Дизайн захвата был завершен с помощью 3D CAD модели со всеми деталями. CAD-модель захвата основана на вышеупомянутых результатах и предназначена для 3D-печати прототипа [3-6]. Даже если сборка может быть собрана с использованием только 8 корпусов - основания механизма, трех кулис, трех пальцев, ползуна, - на самом деле она состоит из 23 компонентов, поскольку многие корпуса были разделены на две или три части для правильной механической конструкции. Это разделение обусловлено двумя различными причинами: во-первых, оно позволяет улучшить управление материалами в процессе производства 3D-печати за счет уменьшения количества отходов; тогда это облегчает печать на петлях. На рис. 3.5 показана окончательная сборка САПР механической конструкции.

3.4 ПРОТОТИП И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Опытный образец был построен с использованием производства 3D-печати, чтобы проверить осуществимость строительства. Захват оборудован редукторным двигателем RB350018-2AH22R в качестве исполнительного механизма [3-6] и устанавливается на серийный роботизированный манипулятор UR5 компанией Universal Robots [3-6]. Разработанный захват был построен на 3D-принтере Stratasys Dimension Elite [3-6]. Принтер Dimension Elite способен печатать объекты размером до 200x200 × 300 мм с толщиной слоя, равной 0,254 мм. Материал, использованный принтером, - пластик ABSþ. Даже если с помощью этой технологии можно распечатать собранные петли, для ограничения ошибок и возможности замены опечатанных или поврежденных компонентов без замены всей конструкции была выбрана отдельная печать и последующая сборка компонентов. Соответствующие детали были изготовлены из пенополиуретановой резины с использованием слоя толщиной 10 мм. Напечатанный прототип показан на рис. 3.6.

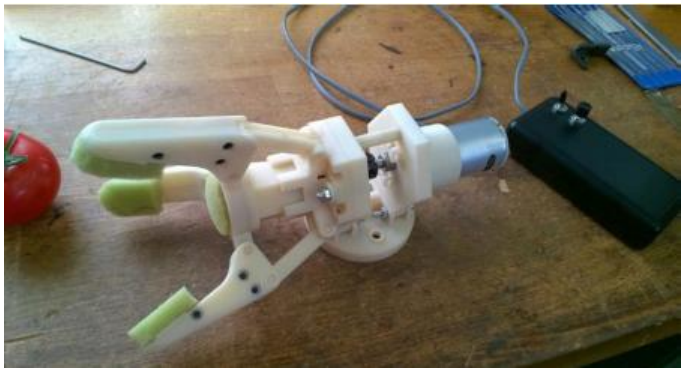


Рисунок 3.6 – Прототип захвата, построенный с использованием 3D-печати.

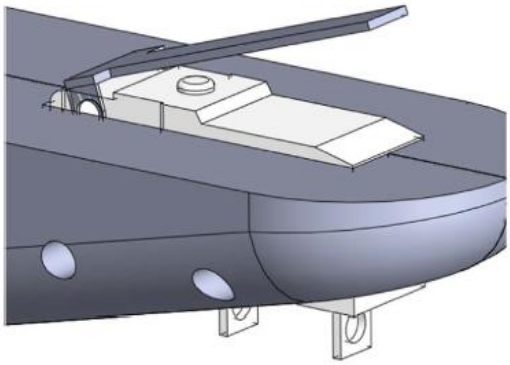
Электрические переключатели используются для обеспечения максимально простого управления: они посылают сигнал, когда триггер находится ниже критического положения. Три разных переключателя используются для отправки следующих сигналов:

– концевой выключатель установлен, чтобы остановить двигатель в режиме захвата. Он заключен в ползунки, как показано на рис. 6а и б, под соответствующей частью кончика губки. Он срабатывает только над определенной деформацией компонента.

–Для остановки захвата необходим защитный выключатель, если подана команда на закрытие захвата, когда между губками нет предметов. Защитный выключатель срабатывает для любой конфигурации, в которой кончики губок находятся близко друг к другу. Без этого триггера двигатель мог бы включиться, и между губками могли бы возникнуть столкновения. Эти столкновения могут повредить захват и / или приводной винт.

–Для остановки двигателя после команды открытия захвата необходим выключатель на базе полок. Переключатель срабатывает для критического взаимного положения кулис и фингера, как показано на рис. 3.7(b).

Управление работой осуществлялось через пользовательский интерфейс робота UR5 [19], который позволяет планировать движение робота, задавая путевые точки и предопределенные команды, запускаемые входными сигналами.



a)



b)

Рисунок 3.7 – Переключатель зажима, встроенный в ручную конструкцию: (a) CAD-модель; (b) прототип установки

Таблица 3.8 – Элементарный анализ действий [14] для выборочного задания лабораторных испытаний

Перекладная задача	T	M	A	P
Манипулятор перемещается в захватывающее положение		x		
Продукт схвачен			x	
Манипулятор поднимает объект	x			
Манипулятор перемещается в точку выпуска	x			

Продолжение таблицы 3.8

Манипулятор опускается в первое положение выпуска	x			
Объект освобожден			x	

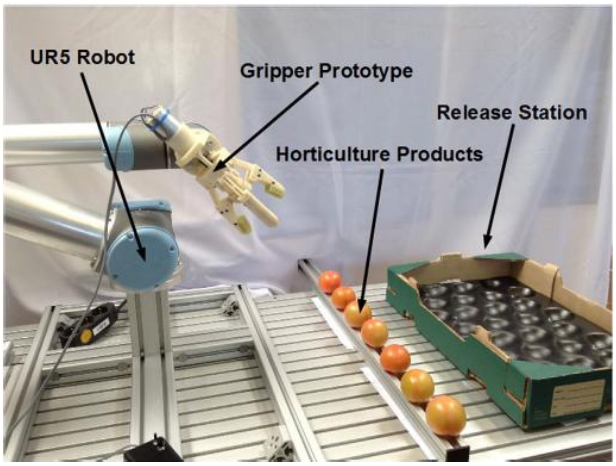


Рисунок 3.8 – Лабораторная схема испытательной среды

Прототип захвата был испытан в нескольких различных операциях сбора и размещения различных продуктов (спелые помидоры, незрелые помидоры, персики, яблоки). Каждый тест состоит из трех-десяти основных заданий по выбору и размещению. Протестированная задача «выбрать и разместить» для отдельного продукта описана в таблице 3.8 с использованием элементарной декомпозиции действий для планирования операций. Элементарное действие определяется как наименьшая манипулятивная сущность, которая может быть выполнена посредством простейшего действия приведения в действие в роботизированной системе с помощью одной инструкции программирования. Элементарные действия обнаруживаются и классифицируются как перемещение (T), движение (M), активная пауза (A) и пассивная пауза (P) [14]. После того, как все элементарные действия были определены, они могут быть организованы для подходящей и эффективной последовательности манипуляций. Кроме того, они позволяют легко идентифицировать инструкции по программированию. Компоновка тестовой среды показана на рис.3.8.

В ходе испытаний каждый продукт был поднят из исходного положения, транспортирован в гнездо конечной упаковки и выпущен в нее. Кроме того, другой тест проверил стабильность захвата: робот захватывает помидор и перемещает его по заданному пути с максимальной скоростью (1,0 м / с), чтобы проверить, надежно ли удерживается захват.

Во время испытаний ни один из продуктов садоводства не был поврежден манипуляциями, показанными на рис. 3.9, так как при визуальном осмотре манипулируемого объекта не было обнаружено ни следа давления, ни трещин. Захват твердости не позволяет относительное движение между продуктами садоводства и пальцами. Время полного цикла для одной задачи «выбрать и разместить» составляет 2,0 секунды для максимальной длины пути 1,0 м, а максимальный момент срабатывания захвата равен 0,098 Нм.

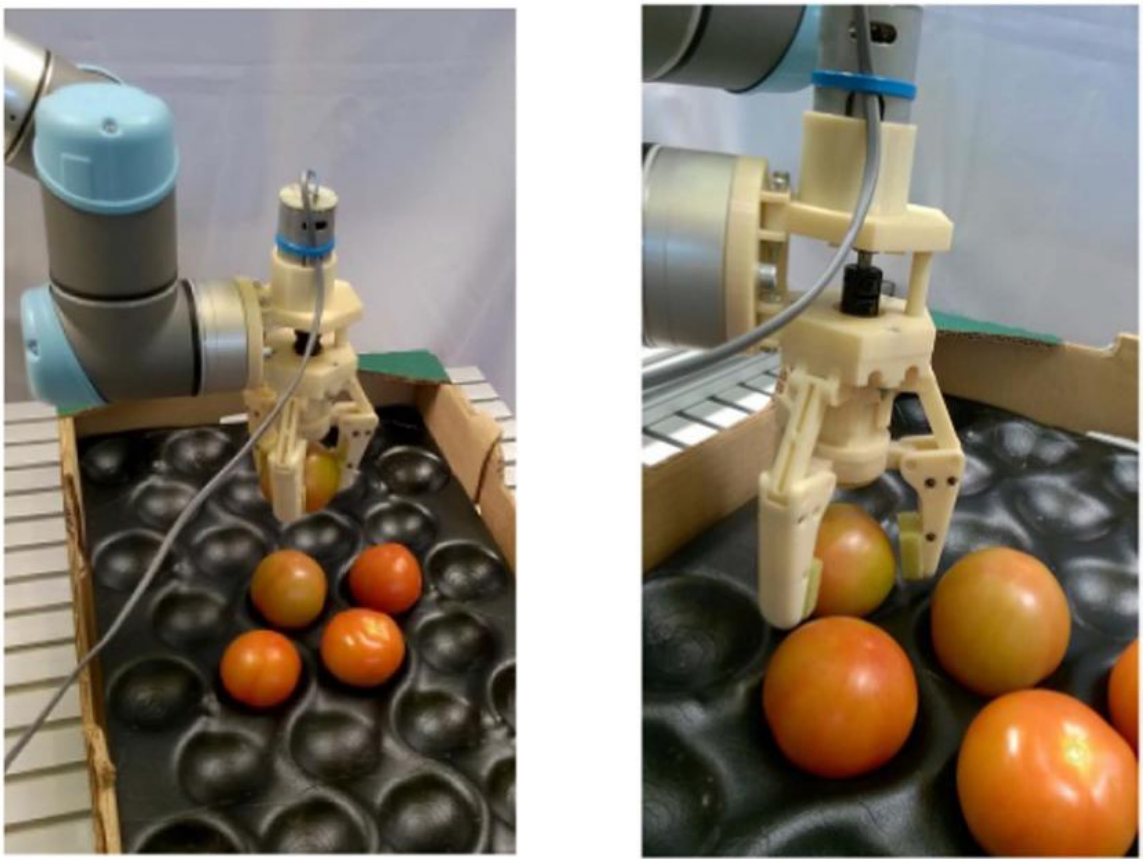
Чтобы измерить силу захвата, были проведены другие испытания с

использованием трех резисторов, чувствительных к силе (FSR), которые возвращают напряжение, которое связано с силой, действующей на их чувствительную поверхность. Датчики были размещены между жесткой и податливой частью плавников. Схема на рис 3.10 показывает настройку системы сбора данных. Система состоит из трех датчиков FSR [3-6], которые подключены к Arduino Nano, и трех сопротивлений понижающего напряжения 10 кОм. Для измерения мощности, потребляемой двигателем, модуль питания ACS 712 был последовательно подключен к источнику питания 6 В.

В лаборатории было проведено несколько испытаний, в которых захват захватил три разных предмета: теннисный мяч, показанный на рис. 3.9(a) и используемый в качестве эталона, незрелый томат и спелый томат, как на рис.3.9(b). Для каждого объекта испытания статического захвата и испытания с движением робота повторялись 24 раза. Захватывающие тесты с роботизированными движениями характеризуются как статические, так как в экспериментальных тестах было замечено, что для максимальной тестовой скорости (2 м/с) нет существенных различий между статическими и динамическими результатами, которые регистрируются датчиками FSR. на губках.

Рисунок 3.10 показаны результаты проверенных захватов для вышеупомянутых объектов с четырьмя различными графиками: три представляют изменение во времени силы захвата, измеряемой каждым датчиком, в то время как четвертый показывает потребление энергии, полученное путем умножения измеренного тока напряжением 6 В источника питания. Время было взято с внутренних часов Arduino Nano и измеряется в миллисекундах.

Результаты теста на захват теннисного мяча, показанного на рисунке. 3.10(a-b), показаны на рис. 3.11 и 3.12. Как показано на рис. 3.11, форма функции, представляющей измеренную силу, приблизительно равна квадратной волне, так как сила возрастает до своего максимума в течение 0,1 с от удара объекта о плавник и уменьшается до 0 Н в аналогичное время во время релизной акции. Таким образом, значение силы является приблизительно постоянным во время захвата, а его среднее значение равно 3,12 Н (рис. 11). Потребление энергии характеризуется тремя пиками, как показано на рис. 3.12: первый, когда захват начинает закрываться, второй в конце захватывающего действия, когда срабатывает стоп-переключатель, и последний, когда захват отпускает объект. Максимальная потребляемая мощность составляет 12,1 Вт.



a) b)

Рисунок 3.9 – Основные элементарные действия в Таблице 4.6 для лабораторного теста с помидором a) Транспорт (T); b) Действие выпуска (A).

На рис. 3.13 показано изменение силы захвата во время теста на незрелый томат. Форма функции снова приближается к прямоугольной волне со средней силой при захвате, равной 1,42 Н. Эволюция энергопотребления показана на рис 3.14 и аналогична той, что на рис. 3.12, с максимальным энергопотреблением. равный 9,8 Вт в пике высвобождения.

Результаты теста со спелым помидором сопоставимы с другими, и применяются те же замечания. Средняя сила при захвате, как на рис 3.15, равна 0,88 Н, в то время как максимальная потребляемая мощность, показанная на рис. 16, снова находится в действии расцепителя, и она равна 9,8 Вт.

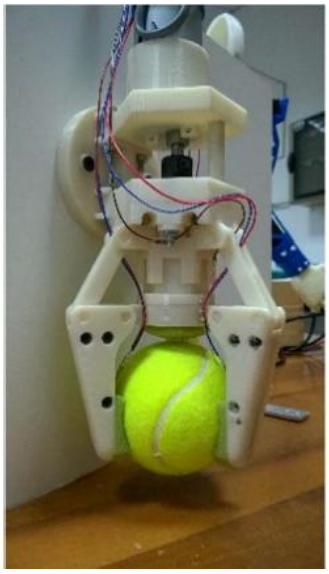
Временная динамика как силы захвата, так и энергопотребления одинакова во всех проведенных тестах. Потребность в энергии одинакова для трех объектов.

Следовательно, оно зависит от вида движения и лишь незначительно зависит от приложенной силы захвата. Контакт не характеризуется пиковым усилием, поскольку он происходит в жестких захватах, так как кончики губок успешно смягчают удар. Разница между значениями, которые измеряются тремя датчиками в каждом тесте, может быть обнаружена. Эта разница вызвана несколькими факторами, которые могут быть определены в основном в:

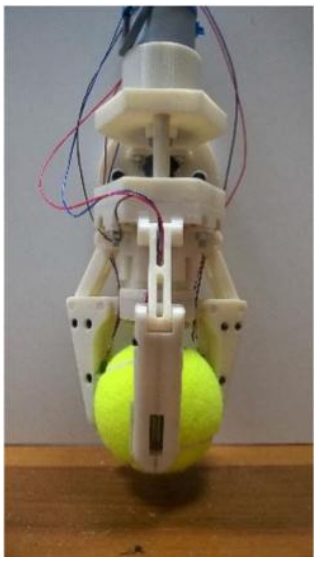
– Неровности в форме захваченных предметов
– Неточное позиционирование захвата для захвата продукта;

– Наличие шума в приобретаемых сигналах;
– Низкая точность и фиксированное положение датчиков FSR.

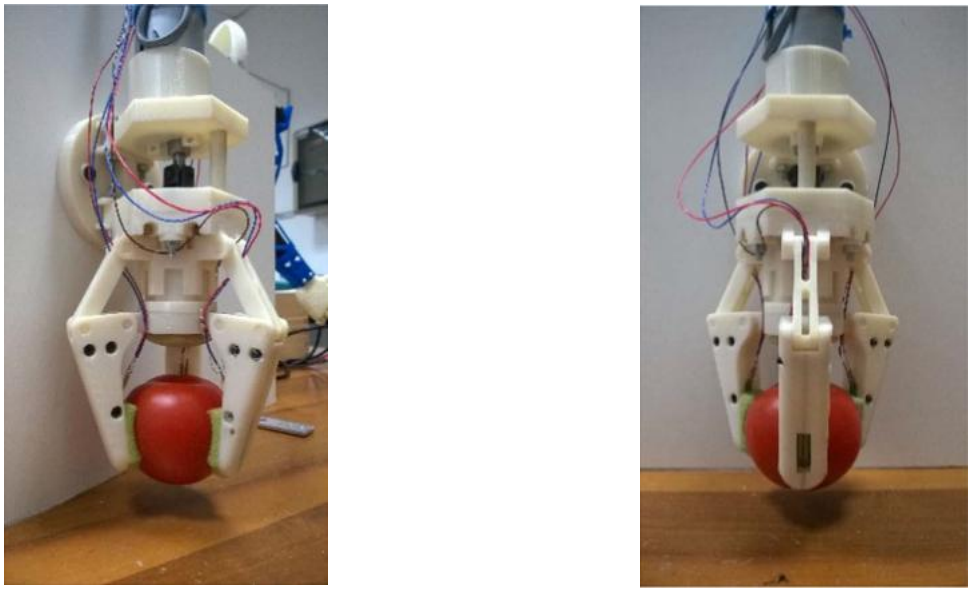
Кроме того, может быть обнаружена разница в значениях силы захвата между тремя продуктами. Это различие может быть рассмотрено из-за многих аспектов (размер, спелость, состояние поверхности и т. д.), Но проведенные испытания подчеркивали влияние соответствия захваченного объекта, поскольку для более высокой совместимости продукта сила захвата имеет был измерен как ниже. Возможных причин такого поведения две, а именно емкость датчика и состояние продукта. Первый связан с природой FSR, которая в результате дает силу, а не давление. Следовательно, поскольку для наиболее подходящих объектов давление распространяется на большую поверхность, и оно может достигать геометрических пределов FSR, измеренная сила может оказаться ниже, чем она есть на самом деле. Вторая причина связана с деформацией продукта и кончика пальца, поскольку измеренная сила зависит от деформации кончика пальца, а не от деформации захваченного предмета. Таким образом, измеренная сила в захвате теннисного мяча или спелого / незрелого помидора различна, даже когда размер одинаков, потому что помидор способен хранить больше энергии деформации, чем теннисный мяч.



a)



b)



c) d)

Рисунок 3.10 – Испытательная конфигурация для измерения статической силы захвата: a) теннисный мяч, вид сбоку; b) теннисный мяч, вид спереди; c) помидор спелый, вид сбоку; d) Спелый помидор, вид спереди.

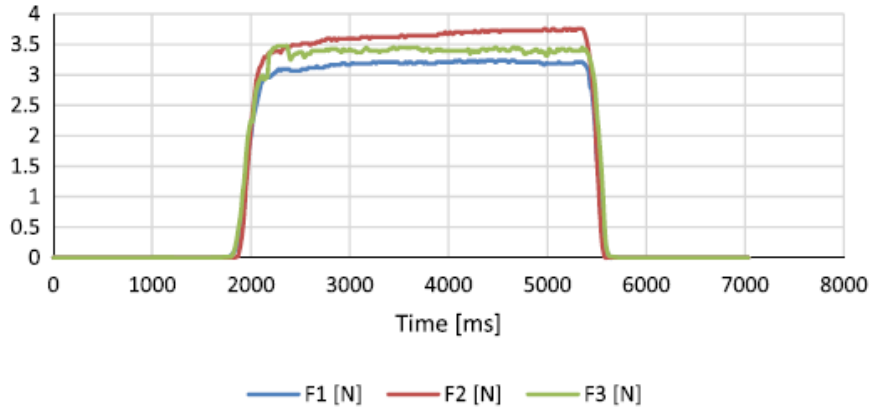


Рис. 3.11– Результаты испытаний на силу захвата, измеренную датчиками FSR для теннисного мяча

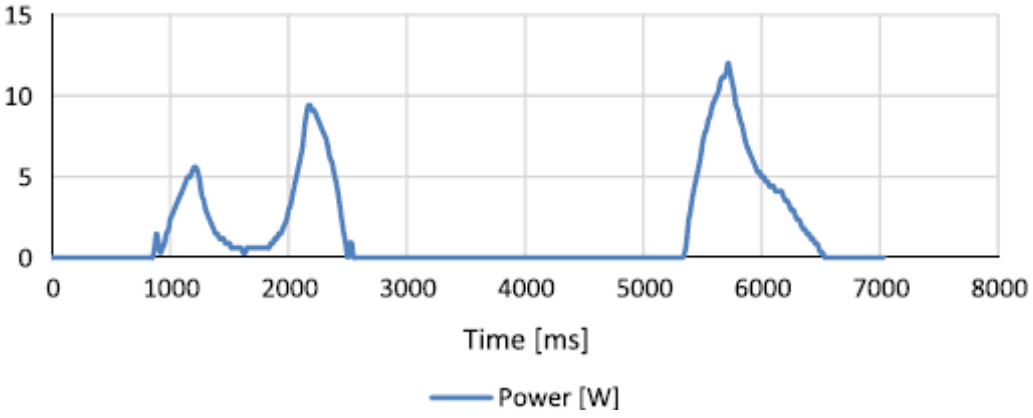


Рисунок 3.12– Результаты испытаний на потребляемую мощность [Вт] для теннисного мяча

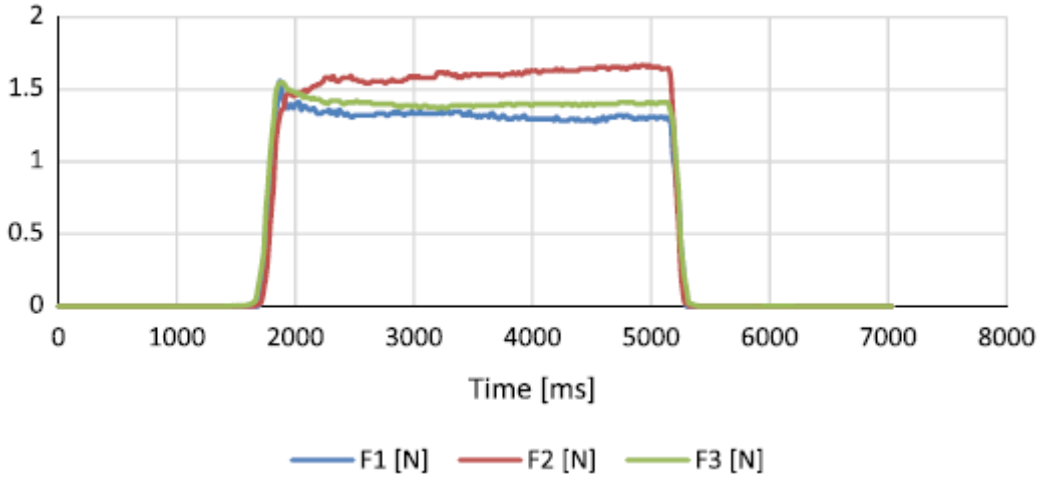


Рисунок 3.13– Результаты теста на силу захвата, измеренную датчиками FSR для незрелого помидора.

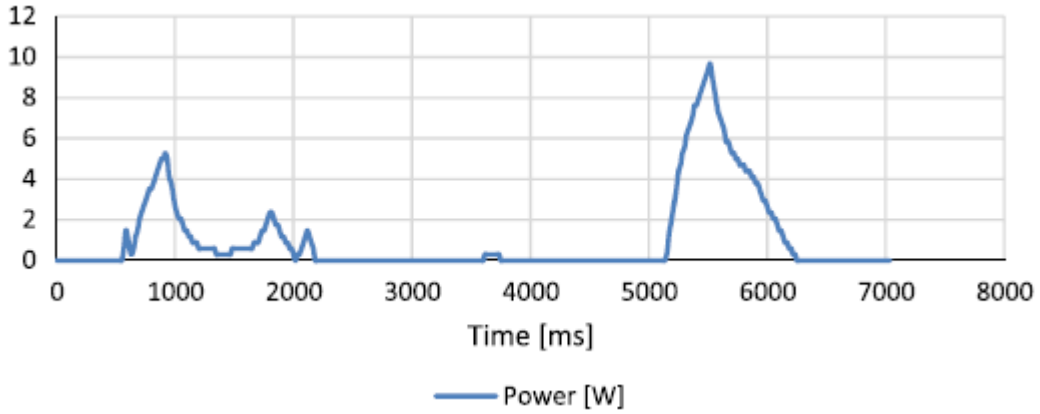


Рисунок 3.14– Результаты испытаний на потребляемую мощность [Вт] для незрелого помидора

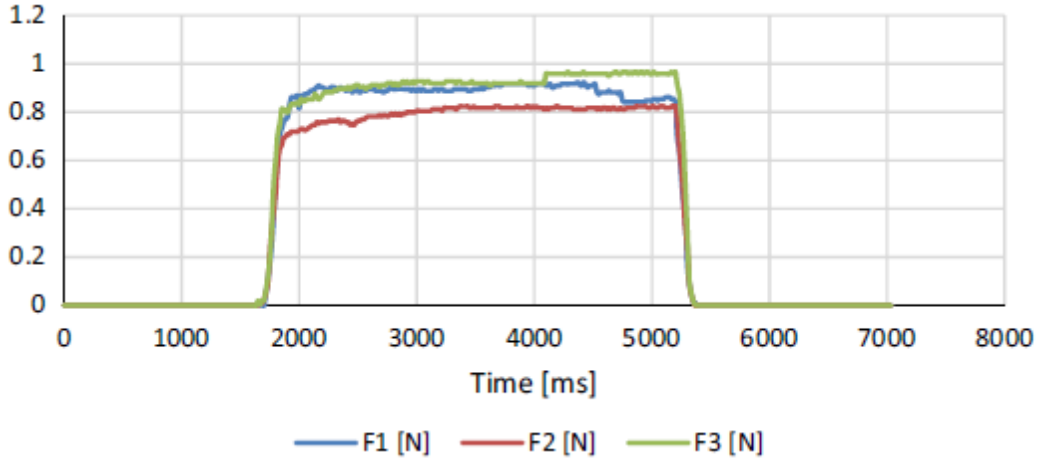


Рисунок 3.15– Результаты теста на силу захвата, измеренную датчиками FSR для спелого помидора.

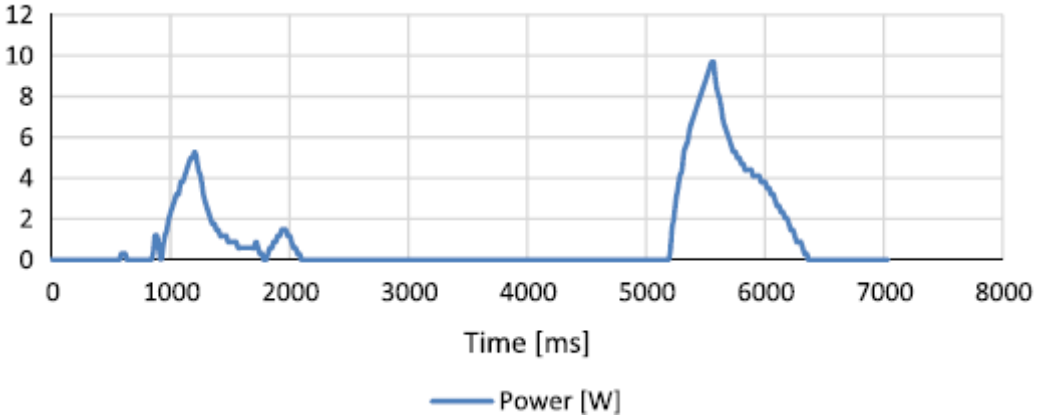


Рисунок 3.16– Результаты испытаний на потребляемую мощность [Вт] для спелого помидора

Полученные экспериментальные данные были уточнены нахождением оптимального коэффициента Калмана [2, 23, 25, 27, 28, 29].

Полученные результаты представлены на рис.3.17 и рис.3.18 и таблицах 3.9-3.10.

По статистическим экспериментальным данным, полученными при исследовании операции прижатия каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага схвата к поверхности верхнего участка ТВЭЛ-а, проведенных в лабораторных условиях, получена следующая экспериментальная зависимость между силой P и величиной длины каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага схвата:

$$P(X)= 3{,}35X+ 0{,}05 \qquad (3.23)$$

где X – расстояние между точкой условной оси шарнира O, расположенного между каждыми двумя смежными фалангами, и точкой контакта внутренней поверхности каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага схвата с ограничивающей поверхностью верхнего участка захваченного объекта, мм.

График зависимости для условного примера между силой P и расстоянием X между осью шарнира O и точкой контакта внутренней поверхности каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага-схвата с ограничивающей поверхностью верхнего участка объекта схвата приведен на рисунке 3.17.

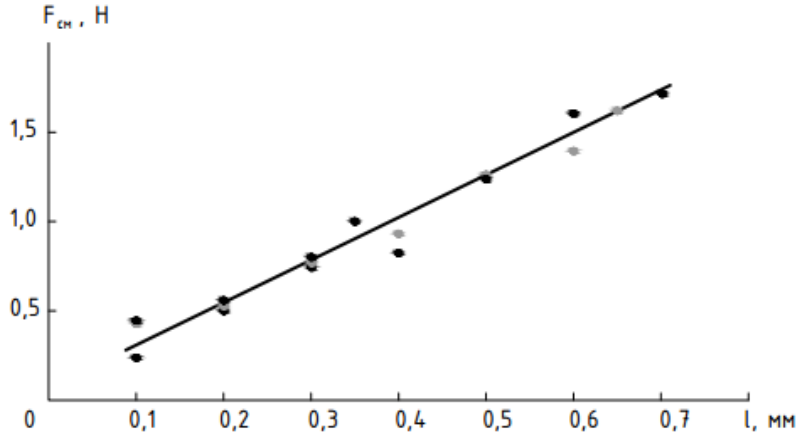


Рисунок 3.17– График зависимости для условного примера между силой Р и расстоянием Х между точкой условной оси шарнира О и точкой контакта внутренней поверхности каждой фаланги с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага-схвата с ограничивающей поверхностью верхнего участка захваченного объекта.

Таблица 3.9 – Результаты зависимости значений функции случайного процесса изменения силы Р трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при осуществлении стохастических процессов перегрузки МО-а из промежуточного контейнера в основной контейнер, полученными в лабораторных условиях для условного примера.

Показатели	Расстояние от условной оси шарнира О соединения смежнорасположенных фаланг с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями рычага схвата до точки контакта внутренней поверхности всех контактирующих фаланг с прикрепленными к каждой из них удерживающими зубьями каждого рычага-схвата с поверхностью верхнего участка МО, X, мм				
	X_1=25	X_2=30	X_3=35	X_4=40	X_5=45
Значения функции случайного процесса изменения силы Р	$5\cdot10^{-2}$	$3{,}9\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-2}$	$0{,}5\cdot10^{-2}$	$0{,}09\cdot10^{-2}$

Результаты зависимости функции корреляции случайного процесса изменения силы Р от параметров трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при осуществлении стохастических процессов его взаимодействия с ТВЭЛ-ом, перегружаемого из промежуточного контейнера в основной контейнер, приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты зависимости функции корреляции случайного процесса изменения силы Р от параметров трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР при осуществлении стохастических процессов его взаимодействия с МО, перегружаемого из промежуточного контейнера в основной контейнер.

Показатели	Продолжительность периода времени измерения силы Р трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР , τ ,с				
	τ_1=0	τ_2=5	τ_3=10	τ_4=15	τ_5=20
Функция корреляции B(τ), в заданный период времени взаимодействия трехфалангового адаптивного схвата манипулятора ПР с верхним участком МО, τ, с	2,82	2,2	,04	0,3	0,05

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ:

- разработан и построен перспективный облик физического прототипа робота с адаптивным схватом и его функционально-структурная оценка, сведенная к решению многокритериальной задачи, основывающейся на одном из следующих методических принципов: сверстка системы частных критериев в обобщенный критерий требующегося эффекта(эффективности); назначение главного критерия и ограничений по остальным показателям;

- приведены результаты расчета параметров функционально-экономической модели перспективного облика машин на примере робота в течение заданного периода времени, выполненные для условного примера;

- представлен новый двухфаланговый схват для продукции садоводства на основе специальной процедуры проектирования с учетом требований особенностей технических характеристик садоводства;

- проведен кинематический анализ и механизм исполнительного схвата был оптимизирован с помощью результатов численного моделирования;

- конструкция исполнительного механизма схвата была смоделирована для создания прототипов;

- прототип был протестирован с использованием робота-манипулятора UR5 в нескольких операциях захвата и размещения, чтобы продемонстрировать, что предлагаемый схват выполнить все требования для этой задачи, экспериментальные исследования показали, что созданный схват захватывает твердые продукты садоволдства среднего размера, не повреждая их;

- результаты полученные при экспериментальном исследовании, были уточнены на основе предложенного соискателем, метода выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата, с учетом стохастической среды функционирования, дистанционно управляемая мобильным роботом для перегрузки ТВЭЛ-а

4 ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА С АДАПТИВНЫМ СХВАТОМ ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ РАЗМЕРЫ»

В данном разделе описывается использованные компоненты робота, а также описывается принцип его работы и взаимосвязь составляющих компонентов, представлены схемы взаимодействия компонентов.

Центральным блоком управления (далее ЦБУ) робота является микроконтроллер серии ATMega 328P на базе платформы Arduino nano которая имеет следующие технические характеристики (рис 4.1) :

– Выходное напряжение 5В;
– Входное напряжение для питания 7-12В;
– Количество цифровых пинов – 14, из них 6 могут использоваться в качестве выходов ШИМ;
– 8 аналоговых входов;
– Максимальный ток цифрового выхода 40 мА;
– Флэш- память 32 Кб;
– ОЗУ 2 Кб;
– EEPROM 1 Кб;
– Частота 16 МГц;
– Габариты 19 х 42 мм;
– Вес 7 г.

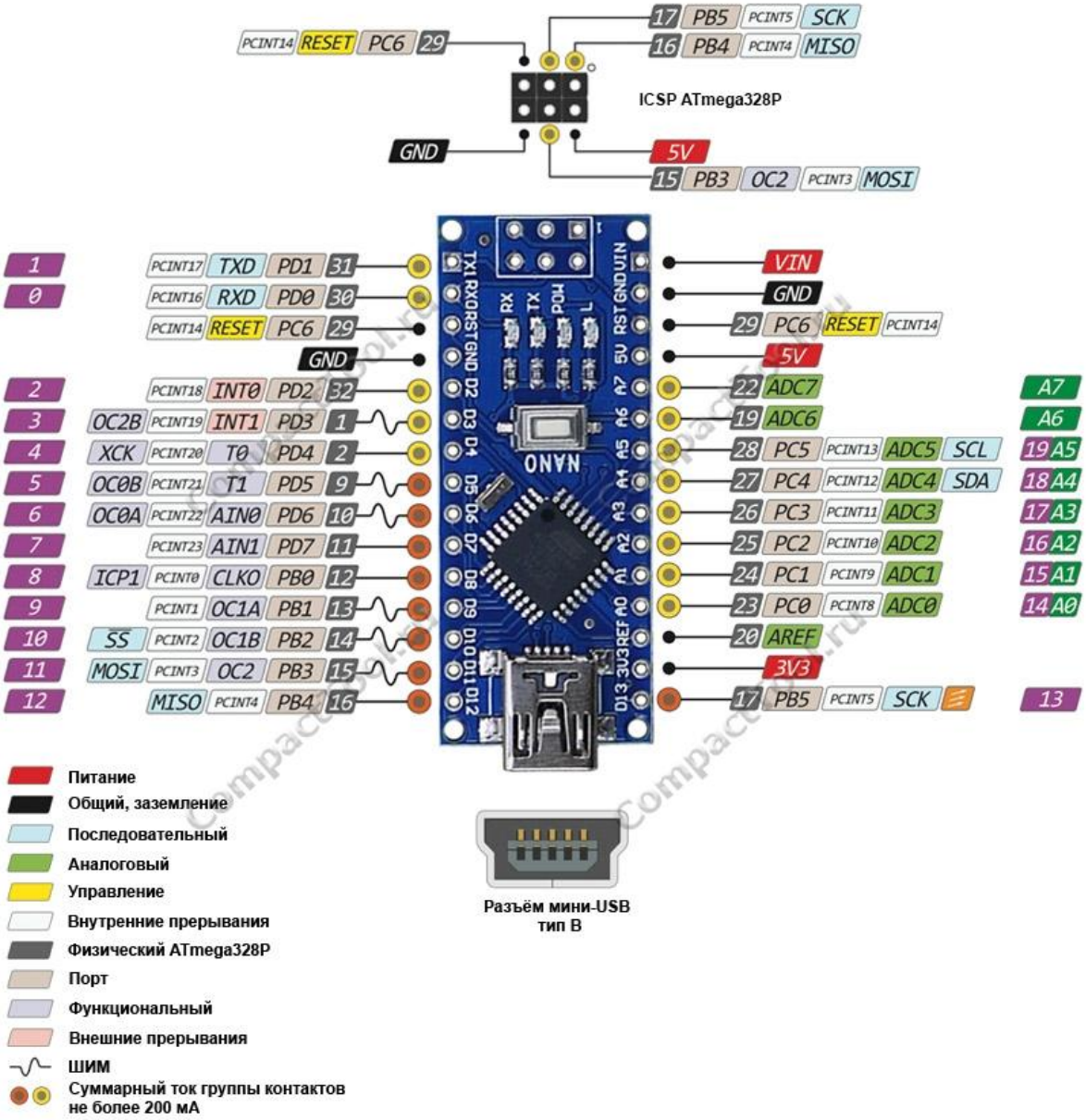


Рисунок 4.1 – Технические характеристики микроконтроллера серии ATMega 328P

ЦБУ потребляет электричество от двух последовательно установленных литиевых аккумуляторов с выходным напряжением на 7.4 вольт. На участке цепи «ЦБУ – Источник Питания» (рис. 4.2) была размещена тактовая кнопка с фиксацией в двух положениях смыкания и размыкания что позволяет нам управлять подачей питания от источника питания на ЦБУ.

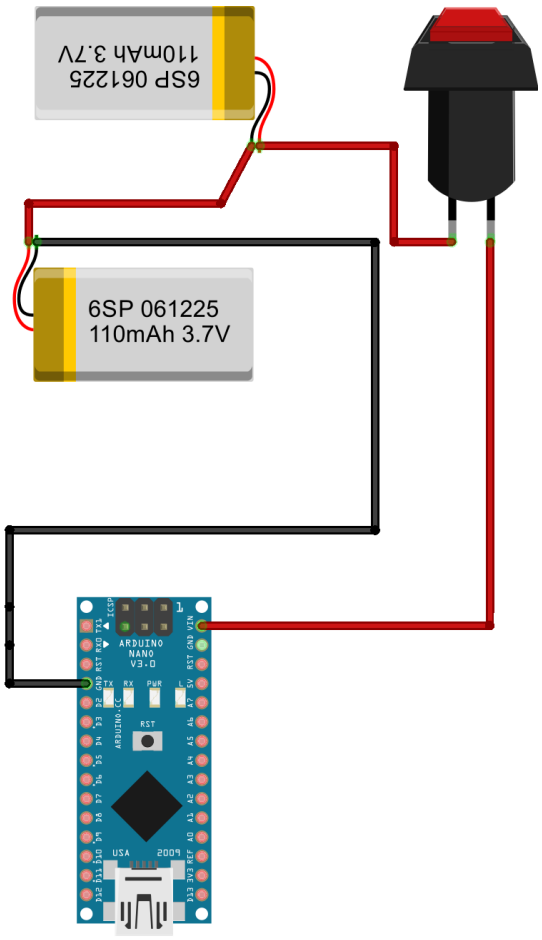


Рисунок 4.2 – ЦБУ – Источник Питания

Согласно цели диссертационной работы необходимо было создать дистанционно управляемого робота, в связи с чем в проекте был использован модуль Bluetooth HC-05, благодаря которому устанавливается коммуникация между смартфоном и роботом (рис.4.3) . Связь между ЦУБ и модулем Bluetooth устанавливается по протоколу УАПП (Универсальный асинхронный приёмопередатчик).

Bluetooth модуль имеет следующие технические характеристики:

- Чип Bluetooth: HC-05(BC417143)
- Диапазон частот радиосвязи: 2,4–2,48 ГГц
- Мощность передачи: 0,25–2,5 мВт
- Чувствительность: –80 dBм
- Напряжение питания: 3,3–5 В
- Потребляемый ток: 50 мА
- Радиус действия: до 10 метров
- Интерфейс: последовательный порт
- Режимы: master, slave
- Температура хранения: –40…85 °C
- Рабочий диапазон температур: –25…75 °C
- Габариты: 27 x 13 x 2,2 мм

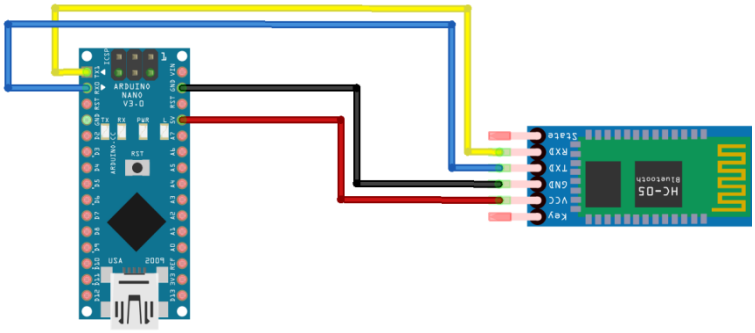


Рисунок 4.3– Коммуникация между смартфоном и роботом

Для реализации функции перемещения робота было использовано 4 электромотора с редуктором. Редукторные электромоторы имеют следующие технические характеристики:

- Номинальное напряжение: 6VDC
- Номинальный ток: <240mA
- Скорость вращения: 230/min
- Крутящий момент: 0.8 kgf.cm

Для управления скоростью вращения моторов используется драйвер серии L298N состоящая из двух H-мост (H-Bridge), один для выхода A, второй для выхода B. H-мост широко используется в электронике и служит для изменения вращения двигателем, схема H-моста содержит четыре транзистора (ключа) с двигателем в центре, образуя H-подобную компоновку. Для управления скоростью двигателя постоянного тока используется метод PWM (Широко-импульсной модуляции).

Для обеспечения максимально эффективной работы робота на модуль драйвера управления моторами подается отдельный источник питания от трех последовательно установленных литиевых аккумуляторов объемом 18650 миллиампер , напряжением на 3,7 вольт , что суммарно составляет 11,1 вольт на выход после последовательного подключения. На участке цепи «Драйвер L298N – Источник Питания» (рис. 4.2) был размещен тумблер с фиксацией в двух положениях смыкания и размыкания что позволяет нам управлять подачей питания от источника питания на драйвер L298N (рис.4.4).

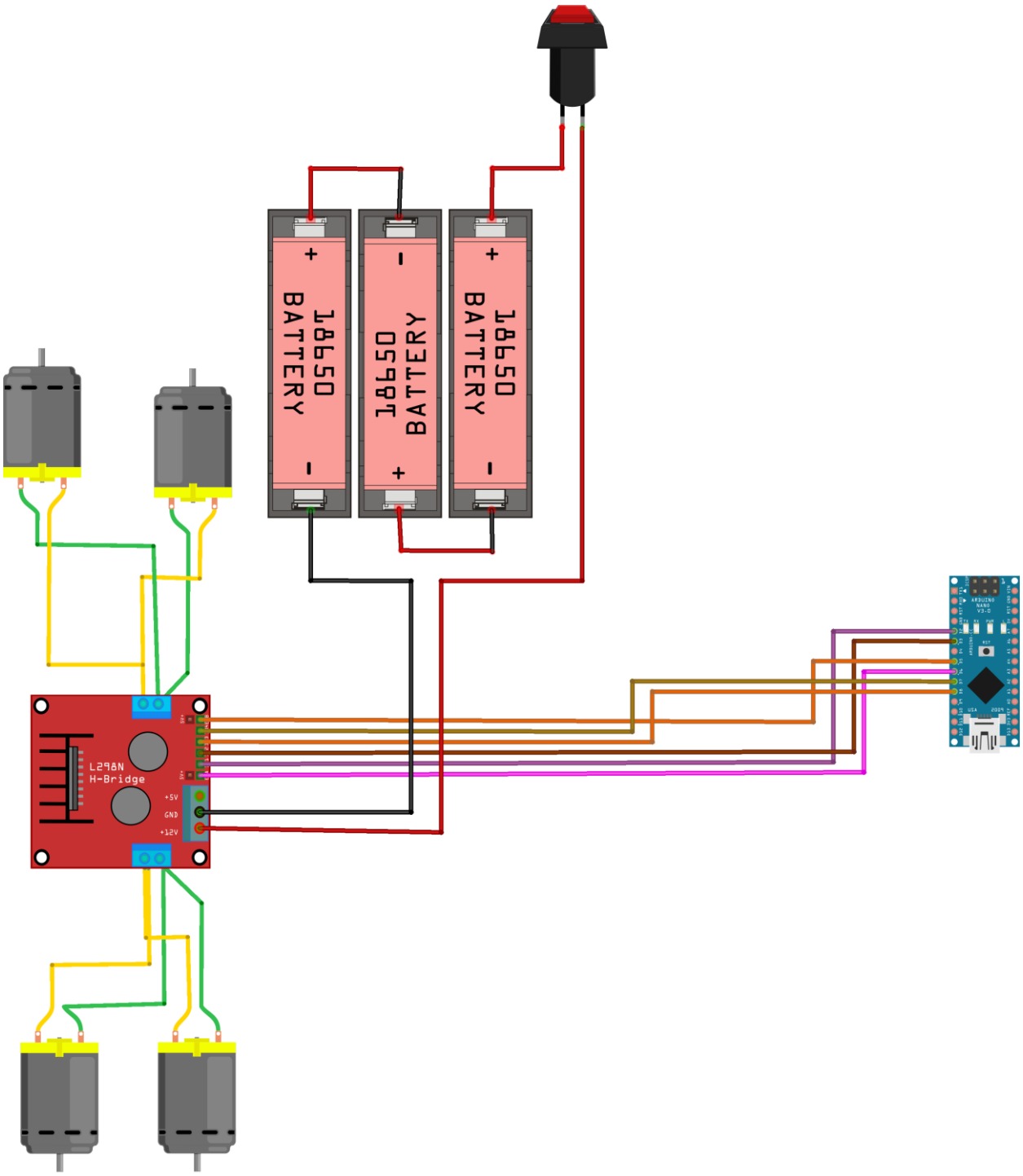


Рисунок 4.4 – Схема управления подачей питания от источника на драйвер L298N

Для реализации функции схватывания и манипуляции объектов было использование 3 сервопривода с металлическим редуктором которая имеет следующие технические характеристики:

- Масса: 55 грамм;
- Размеры: примерно 40.7 x 19.7 x 42.9;
- Крутящий момент: 8.5 кг x см (при 4.8 В питания), 10 кг x см (при 6 В);
- Скорость: 0.2 с/60º (при 4.8 В), 0.16 с/60º (при 6 В);

– Рабочее питание: 4.8 - 7.2 В;
– Ширина мертвой зоны: 5 мкс;
– Диапазон рабочих температур: 0 ºС – 55 ºС.

Сервоприводы также постреляют питание от внешнего источника питания 11В, но, так как рабочим напряжением для сервопривода является напряжение от 4,8 воль до 7,2вольт. , напряжение преобразуется от 11 вольт до 7 вольт с помощью преобразователя L7805CD2T-TR. (рис.4.5)

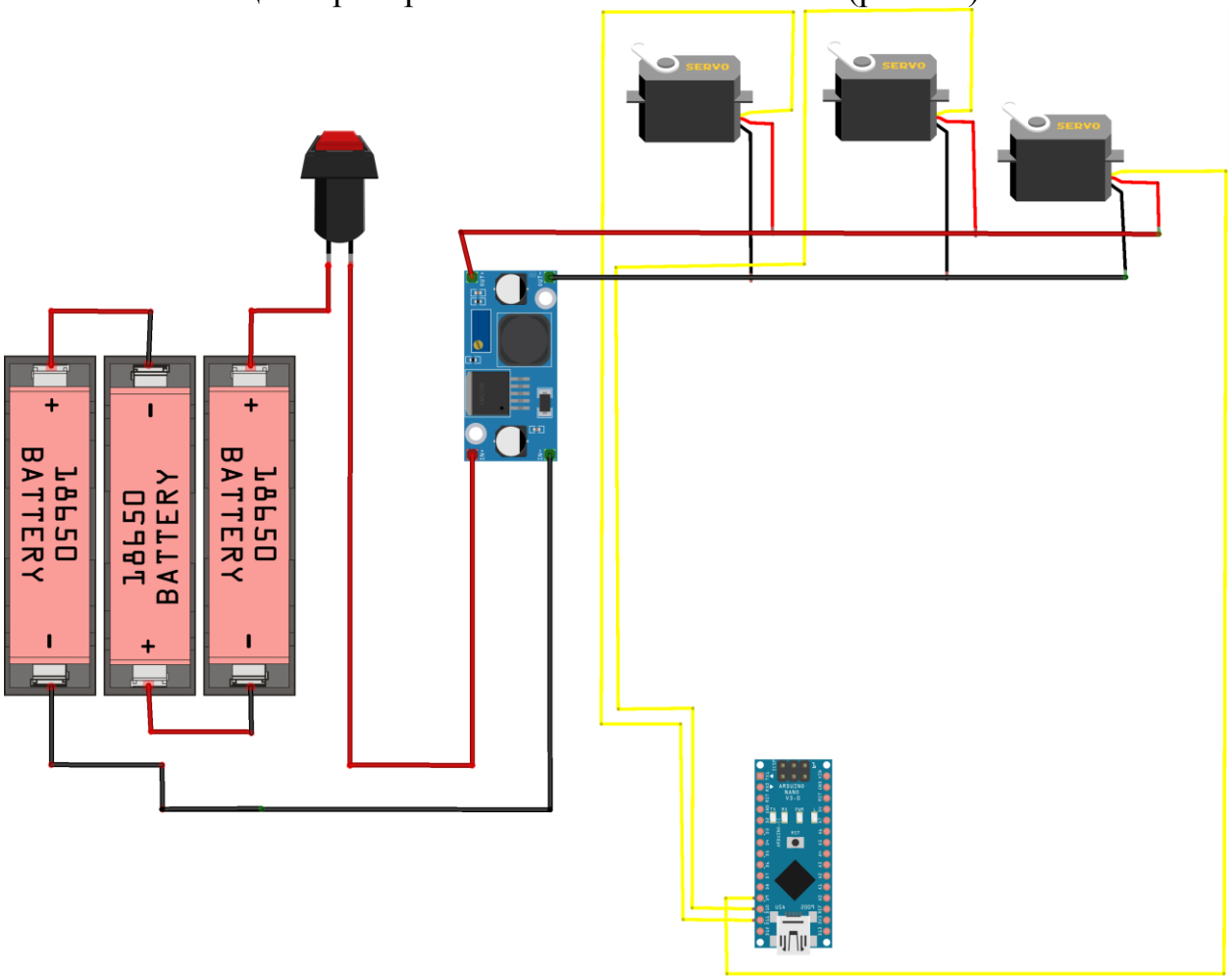


Рисунок 4.5 – Схема преобразователя L7805CD2T-TR

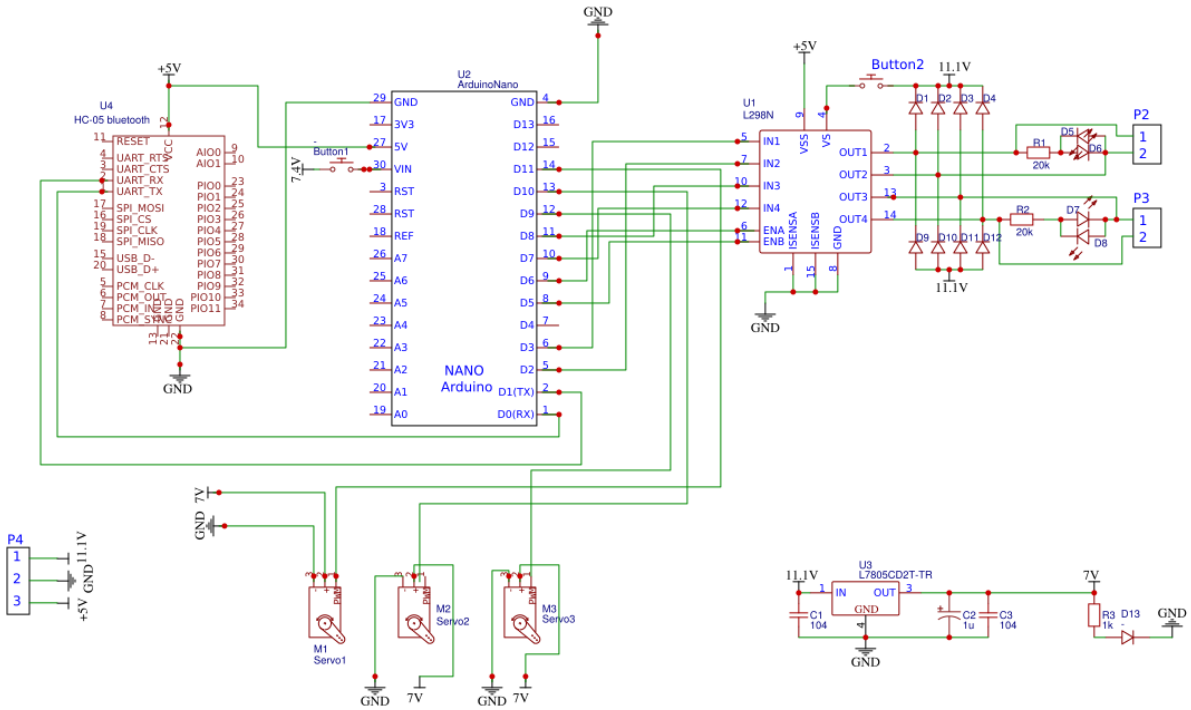


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема

где :

Gnd – Земля

11.1V – напряжение в 11.1В для двигателей и преобразователя

7.4V - напряжение в 7.4В для питания Arduino

7V – напряжение в 7В для питания сервопривода

+5V – напряжение в 5В

U - обозначении компонента

HC-05 bluetooth – блютуз модуль на базе HC-05

P2 – Левый канал для двигателя

P3 – правый канал для двигателя

P4 - канал для питания драйвера моторов

L298N - двух канальный Драйвер мотора

Motor1,Servo1 – Серво машинка 1

Motor2,Servo2 – Серво машинка 2

Motor2,Servo2 – Серво машинка 3

L7805CD2T-TR – Микросхема понижения напряжения

D - диод

R1 – резистор (на 20кОМ)

R2 – резистор (на20кОМ)

R3 – резистор (на 1кОм)

C1 – 0.1(мкФ)

C3 – 0.1(мкФ)

C – конденсатор (мкФ)

Arduino nano – микроконтроллер

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

– Разработана дистанционно управляемая конструкция мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки цилиндрических объектов различного диаметра;

– Определена архитектура основных конструктивных элементов и подсистем конструкции прототипа мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки цилиндрических объектов различного диаметра;

– разработана принципиальная схема основных подсистем мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки цилиндрических объектов различного диаметра;

– разработана программное обеспечение системой управления подачей питания от источника на драйвер L298N;

– разработан принцип работы робота с адаптивным схватом для перегрузки цилиндрических объектов различного диаметра и принципиальная схема его основных подсистем и конструктивных элементов;

– разработана инструкция для использования разработанным прототипом мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки цилиндрических объектов различного диаметра.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты и выводы диссертационного исследования заключаются в следующем:

– установлены основные требования к конструкции адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а;.

– разработаны конструкции двухфалангового и трехфалангового схватов робота для перегрузки ТВЭЛ-ов;

– разработаны математические и компьютерные модели конструкции двухфалангового и трехфалангового адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а для исследования параметров прочности и жесткости их основных конструктивных элементов;

– разработан математический метод выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а с учетом стохастических условий его функционирования;

– разработан и построен перспективный облик физического прототипа робота с адаптивным схватом и его функционально-экономическая модель;

– разработан и создан двухфаланговый схват для перегрузки продукции садоводства с учетом требований и особенностей технических характеристик продукции садоводства;

– разработана математическая и компьютерная модели трехфалангового схвата ПР для перегрузки продукции садоводства;

– созданный прототип адаптивного схвата ПР был протестирован в лабораторно-производственных условиях;

- результаты, полученные при экспериментальном исследовании, были уточнены на основе разработанного соискателем метода выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата с учетом условий стохастической среды его функционирования дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки объектов, имеющих цилиндрическую и сферическую формы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа является самостоятельно написанным научно-квалификационным трудом, в котором содержатся новые научно обоснованные теоретические результаты по созданию адаптивного схвата дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера.

Основные результаты и выводы диссертационного исследования заключаются в следующем:

– установлены основные требования, предъявляемые к конструкции адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а;

– разработаны конструкции двухфалангового и трехфалангового схватов робота для перегрузки ТВЭЛ-а;

– разработаны математические и компьютерные модели конструкции двухфалангового и трехфалангового адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а для исследования параметров прочности и жесткости их основных конструктивных элементов, были построены их трехмерные 3D модели;

– разработан математический метод обоснования выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата робота для перегрузки ТВЭЛ-а с учетом стохастических условий среды его функционирования для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера в основной контейнер;

– разработан математический метод построения перспективного облика дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера в основной контейнер;

– разработан и создан трехфаланговый схват для перегрузки продукции садоводства с учетом требований и особенностей технических характеристик продукции садоводства;

– разработана математическая и компьютерная модель трехфалангового адаптивного схвата для перегрузки продукции садоводства;

– разработанный и созданный соискателем прототип адаптивного схвата был протестирован в лабораторно-производственных условиях в международном научном центре в г.Кассино (Италия), где полученные им эмпирические результаты были им уточнены на основе разработанного им метода выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата с учетом стохастических условий его функционирования;

– разработан и создан прототип дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а;

– разработано программное обеспечение для имитационного моделирования функционирования дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а.

Оценка полноты решений поставленных задач. В диссертационном исследовании соискателем были решены в полном объеме следующие взаимосвязанные задачи:

- выбраны и обоснованы геометрические, структурно-кинематические и динамические параметры адаптирующегося схвата дистанционно управляемого мобильного робота для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера, изготовленного из блока крепкой горной породы;

- разработаны математические методы и компьютерные модели выбора и обоснования геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата;

- выбраны и обоснованы геометрические, структурно-кинематические и динамические параметры исполнительного механизма адаптивного схвата робота с учетом условий стохастической среды его функционирования;

- выбрана и обоснована архитектура дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а;

- разработан и создан физический прототип дистанционно управляемого мобильного робота с адаптивным схватом для перегрузки ТВЭЛ-а из промежуточного контейнера с ТВРАО в полость (полости) основного контейнера, изготовленного из блока крепкой горной породы и его программная реализация.

Рекомендации по конкретному использованию полученных результатов. Полученные в работе результаты и сама концепция построения перспективного облика управляемого мобильного робота с адаптивным схватом и разработка математических методов повышения точности оценки геометрических, структурно-кинематических и динамических параметров адаптивного схвата с учетом стохастической среды его функционирования являются новыми, представляют научный и практический интерес и могут быть непосредственно применены в инжинирии не только в Республике Казахстан, но и в других странах мира.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении случшими достижениями в данной области. Диссертация выполнена с использованием современных методов механики и математики, современных математических и компьютерных методов моделирования, расчета и анализа деформируемых систем и современных цифровых технологий для выбора и обоснования основных конструктивных параметров адаптивного схвата мобильного робота для обеспечения надежного захватывания ТВЭЛ-а свидетельствует о высоком уровне выполнения диссертационной работы, в которой получены новые научные конкурентоспособные результаты. Полученные теоретические результаты были подтверждены широкими экспериментальными исследованиями, которые соискателем были проведены в Университете Кассино (г.Кассино, Италия), являющимся одним из ведущих научных учреждений в мире в области робототехники и инженерии, свидетельствуют о высоком международном научном уровне проведенного научного исследования, вносящие существенный научный вклад в исследование в области робототехники и инжинирии не только Казахстана, но и других ведущих стран мира.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС: Учебное пособие для вузов. /-М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с.

2. Каимов С.Т., Қайым Т.Т., Грибанов В.Ф.,., Каимов Аб.Т., Каимов А.Т., Каимова Г.Т., Павленко П.Н. Метод определения параметров инновационного схвата манипулятора робота при перегрузке им высокорадиоактивного тепловыделяющего элемента из одного контейнера в другой. //Всемирный Конгресс инженеров и ученых. «Энергия будущего инновационные сценарии и методы их реализации» WSEK-2017. 19-20 июня 2017 Астана. 2-й Том материалы Конгресса. с. 218-225.

3. Ceccarelli M. Fundamentals of Mechanics of Robotic Manipulation. / Kluwer/Springer,Dordrecht, 2004.(ISBN 1-4020-1810-X).

4. Bautista Paz E., Bernardos Rodriguez R., Ceccarelli M., et al Breve historia ilustrada de las maquinas. / ETSII, Madrid, 2007. (ISBN 978-84-7484-200-5).

5. Lopez-Cajùn C.S., Ceccarelli M. Mecanismos: Fundamentos cinematicos para el diseno y la optimizacion de la maquinaria. / Trillas, Ciudad de Mexico, 2008 (ISBN 978-968-24-8181-9); 2nd Edition 2013.

6. Bautista Paz E., Ceccarelli M.,Echavarri Otero J., Munoz Sanz, J.J. A brief illustrated history of machines and mechanisms, Science and Engineering, /Book series on History of Machines and Machine Science, Vol.10, Springer, Dordrecht, 2010. DOI 10.1007/978- 90-481-2512-8. ISBN: 978-90-481-2511-1.

7. Трубин И.А. Анализ процессов захватывания и отпускания деталей схватом манипулятора. /Тр. ЛПИ. –Л.: 1982, № 382. с. 88-94.

8. Колпашников С.Н., Челпанов И.Б. Задачи инженерного расчета схватов роботов. / Актуальные вопросы применения промышленных роботов для автоматизации производства. – Владимир. ВДНТИ. 1980. с.10 – 12.

9. Захватные устройства промышленных роботов. Методические рекомендации. – М.: ВНИМС. 1982. – 55 с.

10. Челпанов И.Б., Колпашников С.Н. Схваты промышленных роботов. – Л.: Машиностроение. 1989. – 287 с.

11. Механика промышленных роботов: Учебное пособие для ВТУЗОВ: В 3 книгах. / Под ред. К.В.Фролова, Е.И.Воробьева. – М.: Высш.шк. 1988. – 304 с.

12. Системы очувствления и адаптивные промышленные роботы. /Под ред. Е.П.Попова, В.В.Клюева. –М.: Машиностроение. – 1985. – 256 с.

13. Динамика управления роботами. / В.В.Козлов, В.П.Макарычев, А.В.Тимофеев и др. –М.:Наука. 1984. – 336 с.

14. Манипуляционные системы роботов. /Под ред.А.М. Корендясева. – М.:1989. – 472 с.

15. Задачи и методы адаптивного управления при захватывании и удержании объектов схватами роботов. /Тр.6-й Всесоюзный конференции по управлению в механических системах. – Львов. 1988.

16. Дворников Л.Ф., Спасенкова Ю.С. Двухуровневый манипулятор с

замкнутой кинематической цепью. Описание изобретения к патенту № 2532751, RU. МПК B25J 9/02, F16H 21/14. 10.09.2014. Бюл. №25.- 5с.

17. Кушманов Е.А., Кушманова Л.Е., Гонухов В.П., Сажко В.А., Итович Е.П. Манипулятор. Описание изобретения к авторскому свидетельству № 1355485. SU. МПК 4B25 J 18/00. 30.11.1987. Бюл.№44. – 5с.

18. Смирнов А.Б., Крушинский И.А., Борисевич А.В. Пьезоэлектрический схват. Описание изобретения к патенту №2529126. RU. МПК B25J 15/08, B25J 7/00. 27.09.2014. Бюл.№27. -9с.

19. Kashioka et al. An approach to the integrated intelligent robot with multiple sensory. Visual recognition techniques. 7th Symp on Ind. Robots. –Tokyo. 1977.

20. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой.: Пер. с франц. – М.: Мир. 1985. – 285 с.

21. Т.Т. Қайым. Адаптирующиеся многоцелевые рабочие органы строительных и дорожных машин. /Монография. – Алматы. 1998. - 148 с.

22. Т.Т.Қайым, С.М.Сейтбаталов, Е.И. Шокаев Механизация перегрузочных работе на транспорте. /Монография. – Алматы. 2002. - 323 с.

23. Каимов Сулеймен Т.,Кайым Т., Темирбеков Е. The modeling of the theoretical and mathematical system and specifically the stochastic processes of the dynamical system an innovative mechanism for grasping of the robot for overloading the highly radioactive firm waste of fuel element from the secondary container into the main container // Известия НАН РК, серия геологии технических наук №2(422), 2017. С.157-164

24. Каимов С. A gripper mechanism to automate overload process for fuel elements, Международная научная конференция «Slovak international Conference», Словакия, Братислава 2018г

25. Каимов С.Т. Механическая рука. Приоритет № 2019/0648.1 от 07.09.2019.

26. Мохаммед А.Х. Задачи механики адаптивных схватов промышленных роботов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. С.-Петербург, 1993 г., 171 с.

27. Каимов С., Кайым Т., Темирбеков Е. The modeling of the theoretical and mathematical system and specifically the stochastic processes of the dynamical system an innovative mechanism for grasping of the robot for overloading the highly radioactive firm waste of fuel element from the secondary container into the main container // Известия НАН РК, серия геологии технических наук №2(422), 2017. С.157-164.

28. Kaimov S.,Temirbekov E. Grasps of robot manipulator when overloading solid high-radioactive elements and their calculation «2nd International Conference of IFToMM Italy, Springer, IFIT 2018», Кассино, Италия, 2018 г.

29. Kaimov S.,Temirbekov E. «A Gripper Mechanism to Automate Overload Process for Fuel Elements», Springer, 4th IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics, Udine, Italy, 2018 .

30. Каимов С. «Математическая модель определения параметров инновационного схвата манипулятора робота при перегрузке

высокорадиоактивного тепловыделяющего элемента из одного контейнера в другой»,V международные Фарабиевские чтения Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ АЛЕМІ», Алматы , 2017 г.

31. Каимов С. «Метод определения параметров инновационного схвата манипулятора робота при перегрузке им высокорадиоактивного тепловыделяющегося элемента из одного контейнера в другой», Международная конференция «Зеленый Мост — платформа партнерства для передовых практик инноваций», ЭКСПО-2017, Астана, 2017 г.

32. Каимов С., Каимов А., Грибанов В. «Математическая модель стохастических процессов высокоэффективного надежного разрушения грунта (россыпи, торф) инновационным отвалом бульдозера со съемным режущим ножом», Машиноведение, сборник научных трудов. Республика Кыргызстан, г. Бишкек, Кыргызстан, 2016, с. 4-9.

33. Каимов С., Каимов А. Математическая модель повышения достоверности оценки эмпирических данных при разрушении грунта инновационным отвалом бульдозера со съемным режущим ножом, Журнал «Поиск»,№3(1)/2016, Республика Казахстан, г. Алматы

34. Каимов С., Каимов А. Обоснование параметров инновационного исполнительного механизма рабочего органа отвала бульдозера со съемным горизонтально расположенным режущим ножом для разработки грунта (россыпи, торф), Журнал «Поиск»,№3(1)/2016, Республика Казахстан, г. Алматы

35. Каимов С.Т., Абылай Т.Каимов и др. Математическая модель стохастических процессов высокоэффективного разрушения грунта (россыпи, торф) инновационным отвалом бульдозера. Международный журнал //Поиск. Международный научный журнал-приложение Республики Казахстан. – Алматы. 2016. с. 253 - 259

36. Каимов С., Каимов А. Математическая модель построения перспективного облика землестройно-строительных машин на примере бульдозера при разработке грунта (россыпи, торф), Журнал «Поиск»,№3(1)/2016, Республика Казахстан, г. Алматы.

37. Справочник по промышленной робототехнике: В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. Ш.Нофа; Пер. с англ. – М: Машиностроение, 1989. – 480 с.

38. Андрюшенков Д.Н., Хазин М.Л. Выбор рациональных параметров челюстного захватного устройства камнеуборочной машины. //Известия вузов. Горный журнал. №6. 2015. С.59-65

39. Каимов С.Т. и др. Бульдозерный отвал. Инновационный патент РК №94197 от

40. Каимов С., Каимов А. Методика математического моделирования расчета параметров инновационного исполнительного механизма рабочего органа отвала бульдозера со съемным ножом в зависимости от физико-механических характеристик разрабатываемого грунта (россыпи, торф), Журнал «Поиск»,№3(1)/2016, Республика Казахстан, г. Алматы

41. Козлов В.Ф. Справочник по радиоационной безопасности. /-М.: Энергоатомиздат. 1991. -352 с.

42. Каимов С.Т. и др. Математическая модель повышения достоверности оценки эмпирических данных при разрушении грунта инновационным отвалом бульдозера со съемным режущим ножом. //Поиск. Международный научный журнал-приложение Республики Казахстан. – Алматы. 2016. с. 240 – 247.

43. Каимов С.Т., Қайым Т.Т., Грибанов В.Ф., Темирбеков Е.С., Аб. Т. Каимов, Каимов А.Т. Теоретическое и математическое моделирование динамической системы стохастических процессов работы инновационного схвата манипулятора робота при перегрузке твердых высокорадиоактивных отходов тепловыделяющего элемента из промежуточного контейнера в основной контейнер, Известия, серия геологии и технических наук, 2 (422), Республика Казахстан, г. Алматы, с.157-164

44. Қайым Т.Т., Грибанов В.Ф., Темирбеков Е.С., Каимов С.Т., Каимов Аб.Т. Метод определения параметров инновационного схвата манипулятора робота при перегрузке им высокорадиоактивного тепловыделяющегося элемента из одного контейнера в другой Научно-практический журнал «ВЕСТНИК КаздорНИИ», № 1-2 (53-54) 2017, Республика Казахстан, г. Алматы

45. Ала Хамза Мохаммед А. Задача механики адапивных схватов промышленных роботов канд.техн.наук: 05.02.05: защищена 1993г: утв., 1993. 1- 25 с.

46. Бейктал, Дж. Конструируем роботов на Arduino. Первые шаги / Дж. Бейктал. - М.: Лаборатория знаний, 2016. - 320 с.

48. Бербюк, В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем / В.Е. Бербюк. - М.: Наукова думка, 2014. - 192 с.

49. Мобильные роботы. Робот-колесо и робот-шар: моногр.- Москва: Гостехиздат, 2013. - 532 с

50. Форд, Мартин Роботы наступают. Развитие технологий и будущее без работы: моногр. / Мартин Форд. - М.: Альпина нон-фикшн, 2016. - 430 с.

51. Тывес, Л. И. Механизмы робототехники. Концепция развязок в кинематике, динамике и планировании движений / Л.И. Тывес. - М.: Ленанд, 2014. - 208 с.

52. Бабич, А. В. Промышленная робототехника / А.В. Бабич. - М.: Книга по Требованию, 2012. - 263 с.

53. Иванов, А. А. Основы робототехники / А.А. Иванов. - М.: Форум, 2012. - 224 с.

54. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. - М.: Машиностроение, 2010. - 272 с.

55. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: справочник / Ю. Г. Козырев. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 392 с.

56.Каимов С., Каимова Г., Каимов Аб. Диспетчеризация транспортных средств на труднодоступных участках с применением спутниковых технологий.

Научный журнал «Вестник ЕНУ им. Л.Н.Гумилева» №4 (89) 2012, РК, Астана с. 196-199.

57. Kayim T., Golubeva T., Kaimov S., Mathematical and computer modeling of movement of the executive mechanism of the adaptive multipurpose operating part of Earth-moving and construction Machine. Proceedings of The IRES 10th International conference Prague, Czech Republic, c. Praga 2015, page 42-45

58. Кайым Т., Грибанов В., Абилдабекова Д.Д., Каимов А., Каимов С. Математическая модель стохастических процессов высокоэффективного надежного разрушения грунта (россыпи, торф) инновационным отвалом бульдозера со съемным режущим ножом. «ВЕСТНИК КазНИТУ», № 1 (119) 2017, Республика Казахстан, г. Алматы, с. 412-417.

59. Каимов С., Джомартов А.,Кайым Т., Павеленко П., Темирбеков Е., Каимов А., Грибанов В. Каимова Г., Абилдабекова Д. Математическая модель инновационного схвата манипулятора робота для высокорадиоактивных тепловыделяющих элементов. Proceedings of International Symposium of Mechanism and Machine Science,2017 AzC IFToMM -Azerbaijan Technical University 11-14- September 2017, Baku, Azerbaijan, с.129-136.

60. Каимов С., Темирбеков Е., Кайым Т., Бостанов Б., Карасаев Б. Схваты манипуляторов робота при перегрузке твердых высокорадиоактивных элементов и их расчет. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники. Цифровые технологии в машиностроении», 4-5 октября 2018 г.,Алматы , с.139-140.

61. Каимов С., Каимов А. Математическая модель определения параметров инновационного схвата манипулятора робота при перегрузке высокорадиоактивного тепловыделяющего элемента из одного контейнера в другой. V международные Фарабиевские чтения РК, Алматы, 3-13 апреля 2018.

62. Каимов С., Темирбеков Е. Автоматизация процесса перегрузки ТВЭЛ-ов с применением захватных механизмов. Материалы VI Международного конгресса молодых ученых в рамках Года Молодежи «Молодежь и глобальные вызовы современности», Алматы 2019, с.47-49

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Изобретения

FG2A Инновационные патенты

(13) A4 (11) 31475
(51) ***A23L 1/317*** (2006.01)
(21) 2014/1056.1
(22) 04.08.2014
(76) Утебекова Галия Алтынбековна (KZ)
(74) Жаркынбаева Шолпан Сабыровна
(54) **СПОСОБ ПРОИЗВОДСТВА МЯСНЫХ, КУРИНЫХ, РЫБНЫХ, КРЕВЕТОЧНЫХ ШАРИКОВ**

(13) A4 (11) 31476
(51) ***E02F 3/76*** (2006.01)
(21) 2015/0047.1
(22) 14.01.2015
(72) Қайым Талғат Тотыұлы; Джолдасбеков Скандарбек Умирбекович; Суйменбаев Багдат Темиргалиевич; Джуматаев Мурат Садырбекович; Грибанов Виталий Федорович; Таиров Жумагул Лесович; Каимова Гульназия Татышевна; Жексенбай Парасат Турдакынбайұлы; Садыков Азамат Жагфарович; Каимов Айдархан Талгатович; Каимов Сулеймен Талгатович; Каимов Абылай Талгатович; Суйменбаева Жанна Багдатовна; Таирова Фазила Лесовна; Мерентлиев Ермек Мутанович
(73) Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева" Министерства образования и науки Республики Казахстан (KZ)
(54) **БУЛЬДОЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

(13) A4 (11) 31477
(51) ***E21B 43/28*** (2006.01)
(21) 2015/0538.1
(22) 13.04.2015
(76) Мутанов Галимкаир Мутанович (KZ); Цой Самен (KZ); Жусупбеков Сарсенбек Сейбекович (KZ); Казанский Игорь Александрович (KZ)
(54) **СПОСОБ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ПО СИСТЕМЕ «ОДИН БЛОК И ОДНА ПОРШНЕВАЯ СКВАЖИНА»**

(13) A4 (11) 31478
(51) ***F42D 3/04*** (2006.01)
(21) 2014/1138.1
(22) 29.08.2014
(72) Ракишев Баян Ракишевич; Ракишева Зауре Баяновна; Ауэзова Алма Мухамбетжановна
(73) Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева" Министерства образования и науки Республики Казахстан (KZ)
(54) **СПОСОБ ВЗРЫВАНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД СКВАЖИННЫМИ ЗАРЯДАМИ**

(13) A4 (11) 31479
(51) ***G01N 27/30*** (2006.01)
(21) 2015/0501.1
(22) 07.04.2015
(72) Бурахта Вера Алексеевна; Сатаева Сапура Саниевна
(73) Частное высшее профессиональное образовательное учреждение «Западно-Казахстанский инновационно-технологический университет» (KZ)
(54) **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СПОСОБ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

(13) A4 (11) 31480
(51) ***H01F 30/10*** (2006.01)
H01F 27/28 (2006.01)
(21) 2015/0147.1
(22) 04.02.2015
(72) Хадеев Навиль Тагирович (KZ); Хадеев Камиль Навилевич (RU)
(73) Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева" Министерства образования и науки Республики Казахстан (KZ)
(54) **ТРАНСФОРМАТОР С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ**

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

УДОСТОВЕРЕНИЕ АВТОРА

№ 94197

Настоящим удостоверяется, что **Каимов Сулеймен Талгатович (KZ)**

и **Қайым Талғат Тотышұлы (KZ); Джолдасбеков Скандарбек Умирбекович (KZ); Суйменбаев Багдат Темиргалиевич (KZ); Джуматаев Мурат Садырбекович (KZ); Грибанов Виталий Федорович (KZ); Таиров Жумагул Лесович (KZ); Каимова Гульназия Татышевна (KZ); Жексенбай Парасат Турдакынбайұлы (KZ); Садыков Азамат Жагфарович (KZ); Каимов Айдархан Талгатович (KZ); Каимов Абылай Талгатович (KZ); Суйменбаева Жанна Багдатовна (KZ); Таирова Фазила Лесовна (KZ); Меренгалиев Ермек Мутанович (KZ)**

является(ются) автором(ами) изобретения

(11) 31476

(54) Бульдозерное оборудование

(73) ***Патентообладатель:*** **Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения "Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева" Министерства образования и науки Республики Казахстан (KZ)**

(21) 2015/0047.1
(22) 14.01.2015

Заместитель министра юстиции Республики Казахстан **Э. Азимова**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Исходный код блока управления

```
#include <Servo.h>//библиотека для серво привода
Servo servo1;//название переменной (Серво1)
Servo servo2;//назание переменной (Серво2)
Servo servo3;//название переменной (Серво3)
int IN1 = 8;// название переменной (DIR1)
int IN2 = 7;// название переменной (DIR2)
int IN3 = 2;// название переменной (DIR3)
int IN4 = 3;// название переменной (DIR4)
int PWM1 = 6;// название переменной (ШИМ)
int PWM2 = 5;// название переменной (ШИМ)
int angle1 = 150;//переменная для первоначального расположения Серво1
int angle2 = 140;//переменная для первоначального расположения Серво2
int angle3 = 80;//переменная для первоначального расположения Серво3
bool move1 = false;
bool move2 = false;
bool move3 = false;
//int 100 = 100;// скорость
void setup()
{
  pinMode(IN1,OUTPUT);//режим пина выход
  pinMode(IN2,OUTPUT);//режим пина выход
  pinMode(IN3,OUTPUT);//режим пина выход
  pinMode(IN4,OUTPUT);//режим пина выход
  pinMode(PWM1,OUTPUT);//режим пина выход
  pinMode(PWM2,OUTPUT);//режим пина выход
  servo1.attach(9);//объявление пина на серво1
  servo2.attach(10);//объявление пина на серво2
  servo3.attach(11);//объявление пина на серво3
  servo1.write(angle1);//команда для вращения сервопривода на определенный градус
  servo2.write(angle2);//команда для вращения сервопривода на определенный градус
  servo3.write(angle3);//команда для вращения сервопривода на определенный градус
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  if (Serial.available())
  {
    char c = Serial.read();//считывания переменной 'c'
    if (c == '1')
      servo1.write(angle1+=5);
    if (c == '2')
      servo1.write(angle1-=5);
    if (c == '3')
      servo2.write(angle2+=5);
    if (c == '4')
      servo2.write(angle2-=5);
    if (c == '5')
      servo3.write(angle3+=5);
    if (c == '6')
      servo3.write(angle3-=5);
    if(c == 'W'){// направления шасси вперед
      digitalWrite(IN1,HIGH);
```

```
    digitalWrite(IN2,LOW);
    analogWrite(PWM1,100);
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    analogWrite(PWM2,100);
    }
    if(c == 'S'){ // направления шасси вперед
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,HIGH);
    analogWrite(PWM1,100);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
    analogWrite(PWM2,100);
      }
    if(c == 'D'){// направления шасси вперед
    digitalWrite(IN1,HIGH);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    analogWrite(PWM1,150);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
    analogWrite(PWM2,150);
      }
    if(c == 'A'){// направления шасси вперед
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,HIGH);
    analogWrite(PWM1,150);
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    analogWrite(PWM2,150);
      }
    if(c == 'X'){//остановка шасси
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    analogWrite(PWM1,0);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    analogWrite(PWM2,0);
      }
   if (angle1 > 150)////////////////////////////////////////
    angle1 = 150;  //                                     //
   if (angle1 < 110)//                                    //
    angle1 = 110;  //                                     //
   if (angle2 > 160)//                                    //
    angle2 = 160;  //Блок ограничения градуса сервопривода //
   if (angle2 < 40) //                                    //
    angle2 = 40;   //                                    //
   if (angle3 > 120)//                                    //
    angle3 = 120;  //                                     //
   if (angle3 < 80) //                                    //
    angle3 = 80;   ////////////////////////////////////////
  }
  delay(50);
}
```