

Некоммерческое Акционерное Общество «Казахский Национальный Исследовательский
Технический Университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»



Райбеков Жансултан Досжанулы

«Разработка простого экзоскелета для поддержки движений локтевого сустава»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту**

Специальность 6В07111 – Робототехника и мехатроника

Алматы 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К.И. САТПАЕВА»



Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»

Райбеков Жансултан Досжанулы

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

«Разработка простого экзоскелета для поддержки движений локтевого сустава»

Специальность 6B07111 – Робототехника и мехатроника

Алматы 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Робототехники и технических средств автоматизации

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой РТиТСА
кандидат технических наук,
профессор
Ожикенов К. А.
«10» мая 2025 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Разработка простого экзоскелета для поддержки движений локтевого
сустава»

6B07111 – Робототехника и мехатроника



Выполнил

Рецензент

PhD, ассоциированный профессор

Муратов М. М.

«10» мая 2025 г.

Райбеков Ж. Д.

Научный руководитель
Магистр технических наук,
старший преподаватель

Бигалиева Ж. С.
«10» мая 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К.И. САТБАЕВА»



SATBAYEV
UNIVERSITY

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»

6B07111 – Робототехника и мехатроника

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
РТТТСА кандидат технических наук
Ожигенов К. А.
« 5 » июня 2025 г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы (проекта)

Студенту Райбеков Жансултан Досжанулы

1. Тема: «Разработка простого экзоскелета для поддержки движений локтевого сустава»

Утверждена приказом ректора № 50-П/Р от « 15 » 11 2025 г.

2. Срок сдачи студентом законченной работы « 23 » июня 2025 г.

3. Исходные данные к дипломному проекту (законы, литературные источники, лабораторно-производственные данные)

Теоретические материалы по биомеханике движений локтевого сустава

Лабораторные данные по влиянию различных нагрузок на локтевой сустав

Теоретические материалы по Arduino UNO

4. Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- 1) Изучить актуальность проблемы использования экзоскелета для реабилитации.
- 2) Исследовать биомеханические особенности локтевого сустава и физиологические аспекты его восстановления после нарушений движений.
- 3) Провести анализ существующих реабилитационных экзоскелетов и оценить их эффективность для поддержки движений локтевого сустава.
- 4) Разработать конструкцию простого экзоскелета с одним степенем свободы.
- 5) Осуществить программирование системы управления микроконтроллера.
- 6) Провести экспериментальные испытания разработанного устройства.

5. Перечень графического материала (чертежи, таблицы, диаграммы и т. д.)

Рисунки: 25

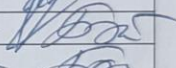
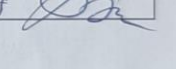
Таблицы: 2

6. Перечень основной рекомендуемой литературы: из 10 наименований 10

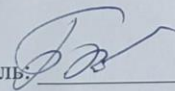
ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

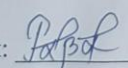
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечания
Исследовательская часть	28.01.2025	
Теоретическая часть	12.02.2025	
Практическая часть	7.03.2025	
Экспериментальная часть	14.05.2025	

Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченный проект с указанием относящихся к ним
разделов проекта

Наименование разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Калимова Е.Т.	05.06.2025	
Основная часть	Бигалиева Ж.С.	11.06.2025	
Расчетная часть	Бигалиева Ж.С.	11.06.2025	
Программная часть	Бигалиева Ж.С.	11.06.2025	

Дата выдачи задания «3» июня 2025 г.

Научный руководитель:  Бигалиева Ж.С.

Задание принял:  Райбеков Ж.Д.

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыс шынтак буынын бүту және жазу қозғалыстарын қолдайтын қарапайым белсенді экзоскелетті жобалауға арналған. Құрылғы жарақаттан немесе операциядан кейінгі оңалтудың бастапқы кезеңінде қолдануға бейімделген. Жобаның мақсаты – жоғарғы аяқ-қолдың қозғалыс функцияларын ішінара қалпына келтіре алатын қолжетімді және техникалық жағынан тиімді құрылғы жасау. Теориялық бөлімде шынтак буынының құрылымы мен биомеханикасы қарастырылып, қолданыстағы оңалту жүйелеріне шолу жасалған. Олардың күрделілігі мен бағасы бағаланды. Практикалық бөлімде қозғалыс кинематикасы есептеліп, толқындық редукторы бар NEMA 17 қадамдық қозғалтқыш негізінде жетек таңдалды. Экзоскелет құрылғыны оңай әрі жеңіл қолдануға кажет етіледі.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа посвящена проектированию простого активного экзоскелета, предназначенного для поддержки сгибательных и разгибательных движений локтевого сустава. Устройство ориентировано на использование в начальной фазе реабилитации после травм, операций или перенесенного инсульта. Целью проекта является создание технически реализуемой и экономически доступной конструкции, способной частично компенсировать утраченные функции верхней конечности. В методах протезирования рассматриваются особенности строения и функционирования локтевого сустава, а также анализируются существующие технические решения в области реабилитации. Выполнена оценка их сложности и стоимости. В практической части проведён расчёт кинематики движения, обоснован выбор привода на основе шагового двигателя NEMA 17 с волновым редуктором. Устройство экзоскелет принадлежит для легкого и простого использования.

ABSTRACT

This thesis presents the development of a simple active exoskeleton designed to assist elbow flexion and extension movements during early rehabilitation after injury or surgery. The main objective is to create an affordable and technically feasible device capable of partially restoring upper limb function. The theoretical section explores the anatomy and biomechanics of the elbow joint, alongside a review of existing rehabilitation technologies and an assessment of their complexity and cost. In the practical part, kinematic analysis is carried out, and a drive system based on a NEMA 17 stepper motor with a strain wave gear is selected. The mechanical structure, electronic control circuit, and Arduino-based software are developed. Device exoskeleton needs for simple and not hard using.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 Исследование методов протезирования	9
1.1 Анатомия и биомеханика локтевого сустава	9
1.2 Биомеханические требования и особенности управления экзоскелетом	11
1.3 Обзор существующих экзоскелетов и методов реабилитации	12
2 Реализация и разработка экзоскелета для локтевого сустава	23
2.1 Общая характеристика экзоскелета и выбор конструкции	23
2.2 Редукторы: классификация и применение в экзоскелетах	23
2.3 Используемые компоненты и обоснование их выбора	28
2.4 Моделирование корпусов для крепления на лучезапястье и предплечье с учетом эргономики человека	32
2.5 Электрическая схема подключения компонентов	34
2.6 Алгоритм работы системы управления экзоскелетом	36
3 Практическая реализация проекта	38
4 Расчет надежности экзоскелета	39
Заключение	40
Список терминов и сокращений	41
Список использованной литературы	42
Приложение А	44

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день актуальной задачей медицинской инженерии и биомеханики является разработка технических средств, способных обеспечить поддержку движений человека в процессе восстановления после травм, операций или неврологических заболеваний. Одним из таких направлений является создание вспомогательных конструкций для верхней конечности, в частности - для локтевого сустава, который играет ключевую роль в большинстве повседневных действий, таких как подъём и удержание предметов, самообслуживание, письмо и т. д.

После повреждений или хирургического вмешательства пациенты часто теряют возможность самостоятельно двигать рукой, что требует длительной и регулярной реабилитации. Однако в реальных условиях (особенно в домашних или маломощных клинических учреждениях) не всегда возможно обеспечить постоянное присутствие инструктора или использовать дорогостоящее оборудование. Поэтому существует потребность в создании простых, компактных и недорогих механических систем, которые могут компенсировать двигательную функцию и способствовать восстановлению нейромышечной активности.

Предлагаемый проект направлен на разработку устройства, выполняющего поддерживающие движения в локтевом суставе с помощью внешнего механизма привода. В отличие от полностью автоматизированных и дорогостоящих роботизированных систем, данное решение ориентировано на простоту, надёжность и возможность тиражирования. Целевая аудитория - пациенты, находящиеся на ранней стадии реабилитации, в том числе после инсульта, переломов, вывихов или оперативных вмешательств на области плеча и предплечья.

В качестве привода используется шаговый двигатель NEMA 17 в сочетании с волновым редуктором, что позволяет добиться плавности, достаточной мощности и компактности. Управляющая система построена на базе микроконтроллера Arduino, что облегчает реализацию алгоритмов движения и упрощает процесс конфигурирования. Такое решение делает проект доступным для внедрения в образовательных, медицинских и домашних условиях.

Ключевой особенностью устройства является его модульная архитектура - все элементы могут быть заменены или усовершенствованы в зависимости от потребностей конкретного пользователя. При необходимости конструкция может быть дополнена датчиками усилия, ограничителями углов или системами дистанционного контроля. В дальнейшем возможно расширение проекта до многосуставных систем или интеграция с биосигналами.

Он может использоваться не только как реабилитационное средство, но и как учебный стенд для изучения основ мехатроники, управления приводами и биомеханики. Таким образом, видение проекта заключается в создании функционального, доступного и адаптируемого средства, способного оказывать физическую поддержку движений локтевого сустава в условиях ограниченных ресурсов. Устройство ориентировано на индивидуальное использование, может быть масштабировано или модифицировано под различные уровни подготовки и нужды пациентов. В долгосрочной перспективе проект может послужить основой для создания серии недорогих технических решений в области персонализированной реабилитации.

1 Исследование методов протезирования

1.1 Анатомия и биомеханика локтевого сустава

Важным элементом технического проектирования стало понимание биомеханических особенностей локтевого сустава. Локтевой сустав имеет сложную анатомическую структуру, объединяя три кости: плечевую, лучевую и локтевую. Несмотря на анатомическую сложность, он обеспечивает одноосное движение — сгибание и разгибание в сагиттальной плоскости, то есть вперёд и назад в пределах одной степени свободы. В норме диапазон движений локтевого сустава составляет от 0° (полное разгибание) до примерно 145° (максимальное сгибание). Это значение может варьироваться в зависимости от физиологических особенностей человека, возраста, а также наличия патологий. При контрактурах или других нарушениях подвижности этот диапазон резко сокращается, что значительно ограничивает функциональность руки, особенно при выполнении бытовых задач. На рисунке 1 схематически показаны предельные положения сустава в норме и при ограничениях подвижности.



Рисунок 1 – Разгибание и сгибания локтевого сустава [1, с. 87]

Движение в суставе обеспечивается работой группы сгибателей: двуглавой мышцы плеча (*biceps brachii*), плечевой (*brachialis*) и плечелучевой (*brachioradialis*) мышц. Основным разгибателем выступает трехглавая мышца плеча (*triceps brachii*). Их согласованная работа позволяет выполнять плавные движения с контролируемым усилием. На рисунке 2 отображены анатомические расположения указанных мышц, принимающих участие в движении предплечья.

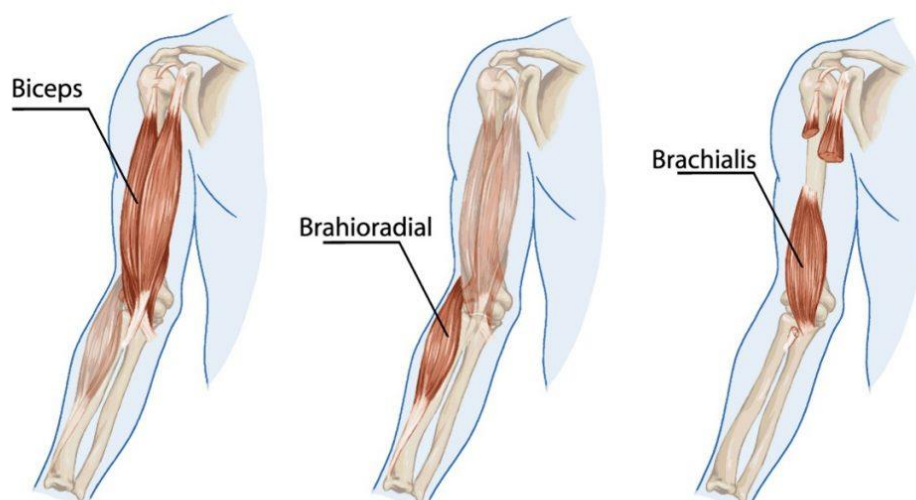


Рисунок 2 – Основные мышцы руки biceps, brahioradialis, brachialis [2]

Длина предплечья у взрослого человека составляет в среднем от 25 до 30 см, и именно эта величина была принята при построении рычага экзоскелета. Она является ключевым параметром при расчётах крутящего момента, необходимого для преодоления инерционных и сопротивляющих усилий, возникающих в мышечно-связочном аппарате во время реабилитации.

Учитывая вышеуказанные анатомические особенности, в ходе работы были сформулированы основные требования к системе управления и приводу устройства. Движение должно быть плавным, равномерным, без рывков и чрезмерного ускорения. Это позволяет избежать травматизации и перегрузки тканей, особенно в условиях посттравматического восстановления. С этой целью был выбран шаговый двигатель с редуктором, обеспечивающий высокую точность позиционирования при низких скоростях, важность шагового моторчика с редуктором заключается в том, что повышается момент силы, при котором он будет подниматься больше, чем шаговый моторчик без редуктора с промежуточными телами качения.

Также важно учитывать, что в процессе реабилитации ключевым аспектом является контролируемость усилия: устройство не должно создавать принудительное движение, а лишь помогать пациенту преодолевать физиологическое сопротивление. Таким образом, проектируемый механизм выступает как ассистирующий инструмент, поддерживающий амплитуду и траекторию движения без полной замены мышечной активности, важно знать при реабилитации надо учитывать эргономику человека.

В рамках данного дипломного исследования была произведена количественная и качественная оценка параметров движения, предложена конструктивная схема с учётом биомеханических ограничений и разработана система, максимально приближённая к реальным условиям эксплуатации, так же были проведены нагрузочные эксперименты. Все расчёты и выборы компонентов выполнены с опорой на анатомические и функциональные особенности локтевого сустава, что делает конструкцию пригодной для использования в реальной клинической практике.

1.2 Биомеханические требования и особенности управления экзоскелетом

При проектировании устройства, предназначенного для поддержки движений локтевого сустава, необходимо учитывать ряд биомеханических и физиологических требований. Одной из ключевых задач является воспроизведение естественной траектории и скорости движения сустава с учётом индивидуальных особенностей пациента. При этом следует избегать резких ускорений, перегрузок тканей и превышения допустимого угла сгибания.

С точки зрения биомеханики, движение локтевого сустава во время реабилитации должно быть управляемым, плавным и безопасным. Сопротивление при движении в этот период обусловлено повышенным мышечным тонусом, ригидностью суставной капсулы и сниженной эластичностью связок. Поэтому система управления экзоскелетом должна обеспечивать медленное, равномерное движение, с возможностью быстрой остановки или адаптации под обратную связь (например, болевую реакцию пациента или уровень мышечного тонуса).

Для этих целей в конструкции был применён шаговый двигатель NEMA 17 с волновым редуктором, обеспечивающий высокую точность позиционирования и достаточный крутящий момент даже при низких скоростях вращения. Волновой редуктор, за счёт своей компактности и передаточного отношения, позволяет добиться плавного и надёжного перемещения звена, повторяющего сгибательно-разгибательные движения руки.

Система управления реализована на базе микроконтроллера Arduino. Она обеспечивает дискретное управление положением звена с возможностью точной настройки количества шагов, скорости и направления движения. Это особенно важно при использовании микрошагового режима, позволяющего добиться высокой плавности хода и минимизации вибраций, что критично при работе с биомеханическими структурами.

Важно также обеспечить возможность калибровки под конкретного пользователя: установка начального положения (нулевого угла), настройка максимального предела сгибания, задание скорости в зависимости от стадии реабилитации. Эти параметры могут быть реализованы через интерфейс настройки или сохранены в энергонезависимой памяти микроконтроллера.

В перспективе систему можно дополнить элементами обратной связи, такими как датчики угла, тока или даже простые тактильные кнопки, позволяющие пациенту самостоятельно запускать и останавливать движение. Это даст возможность адаптивного управления и повысит безопасность.

Таким образом, система управления экзоскелетом должна учитывать анатомические и физиологические ограничения локтевого сустава, включая диапазон безопасных углов, допустимые усилия и особенности мышечного тонуса в условиях реабилитации. По данным современных исследований, плавное и контролируемое движение с возможностью адаптации под конкретного пользователя существенно повышает эффективность восстановления [3, 4].

Также в ряде работ отмечается важность соответствия траектории движения естественной биомеханике конечности [5]. Это позволяет не только избежать перегрузки тканей, но и способствует активизации сохранённой мышечной активности. Разработка конструкций с низким уровнем инерции, возможностью пошагового регулирования и модульной системой управления соответствует современным требованиям к средствам реабилитации [6].

Применение подобного подхода в проекте обусловлено стремлением создать недорогую, безопасную и функциональную конструкцию, пригодную как для клинического, так и для домашнего использования [7].

1.3 Обзор существующих экзоскелетов и методов реабилитации

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к разработке роботизированных систем, предназначенных для восстановления движений конечностей после неврологических и ортопедических нарушений. Особое внимание уделяется экзоскелетным конструкциям, которые могут использоваться как в условиях специализированных медицинских учреждений, так и в домашних условиях. Устройства данного класса обеспечивают дозированную механическую помощь в выполнении двигательных функций, снижая нагрузку на пациента и медицинский персонал.

На сегодняшний день существует множество экзоскелетов, ориентированных на различные отделы опорно-двигательного аппарата. В контексте данной работы рассматриваются устройства, предназначенные исключительно для поддержки движений локтевого сустава.

ArmeoSpring - это пассивный экзоскелет, разработанный швейцарской компанией Носома для восстановления функций руки и кисти у пациентов с неврологическими и ортопедическими нарушениями. Устройство обеспечивает поддержку веса руки с помощью регулируемой пружинной системы, позволяя пациентам выполнять активные движения в трёхмерном пространстве [8].



Рисунок 3 – пассивный экзоскелет ArmeoSpring [8]

На 3 рисунке показаны конструктивные особенности экзоскелета ArmeoSpring. Экзоскелет охватывает всю руку от плеча до кисти, включая модули для плеча, предплечья и кисти. Каждый модуль имеет возможность индивидуальной настройки длины и уровня пружинной поддержки, что позволяет адаптировать устройство под анатомические

особенности пациента. Встроенные датчики фиксируют движения в шести степенях свободы [9]:



Рисунок 4 – реабилитация пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата при помощи экзоскелета ArmeoSpring [9]

Сгибание/разгибание плеча и локтя

Участников размещали перед столом с регулируемой по высоте поверхностью и монитором, при этом они находились в собственных инвалидных колясках на рисунок 4 увидите. Рука испытуемого помещалась в экзоскелет, фиксировалась ремнями и подгонялась по размеру. В ходе первой сессии специалист настраивал систему компенсации веса таким образом, чтобы рука участника находилась в горизонтальном положении с приблизительно 45-градусным сгибанием в плечевом суставе и 25-градусным — в локтевом. Подбирались игры, соответствующие поставленным задачам, это у нас будет сгибание и разгибание плеча, локтя [10].

Сгибание/разгибание запястья

Испытуемые размещались перед столом с регулируемой высотой, на котором был установлен экран компьютера, при этом они находились в своих инвалидных колясках рисунок 4 видно работа пациента. Верхняя конечность участников помещалась в экзоскелет, который фиксировался ремнями и настраивался под индивидуальные параметры. Во время первого занятия терапевт устанавливал уровень поддержки веса таким образом, чтобы рука находилась в горизонтальном положении, при этом плечо было согнуто приблизительно на 45°, а локтевой сустав — на 25°. Выбирались игровые задания, соответствующие целям терапии [10].

Дополнительно, устройство оснащено чувствительной к давлению рукояткой, позволяющей тренировать, хват и отпускание предметов.

Принцип действия

Основной принцип работы ArmeoSpring заключается в компенсации веса руки пациента, что снижает нагрузку на мышцы и суставы, позволяя выполнять движения с меньшими усилиями. Это особенно важно для пациентов с ограниченной мышечной силой

или координацией. Устройство предоставляет возможность активной терапии, при которой пациент самостоятельно инициирует движения, а экзоскелет обеспечивает необходимую поддержку.

Программное обеспечение и обратная связь

Armeo®Spring интегрирован с программным обеспечением ArmeoControl, которое предлагает широкий спектр упражнений в игровой форме с использованием виртуальной реальности. Пациенты выполняют задачи, направленные на развитие моторики, координации и силы, получая немедленную визуальную и аудиальную обратную связь. Программа также фиксирует данные о выполнении упражнений, позволяя оценивать прогресс и адаптировать терапию под индивидуальные потребности [11].

Клиническое применение и эффективность

ArmeoSpring применяется в реабилитации пациентов после инсульта, черепно-мозговых травм, спинальных повреждений, а также при рассеянном склерозе и других неврологических заболеваниях. Исследования показывают, что использование устройства способствует улучшению двигательных функций верхней конечности, увеличению диапазона движений и снижению спастичности. Особенно эффективна терапия на ранних этапах восстановления, когда пациент ещё не способен выполнять полноценные движения самостоятельно.

Преимущества и ограничения

Преимущества:

- Индивидуальная настройка под анатомические особенности пациента
- Возможность активной терапии с поддержкой веса руки
- Интеграция с виртуальной реальностью для мотивации пациента
- Сбор и анализ данных о прогрессе терапии

Ограничения:

- Высокая стоимость устройства и программного обеспечения
- Необходимость обучения персонала для правильного использования
- Ограниченная мобильность из-за стационарной установки
- Изображения и ресурсы

Я ознакомил вас общей концепции этого экзоскелета от швейцарских инженеров и программистов.

ReoGo - это стационарная роботизированная система, разработанная израильской компанией Motorika для реабилитации пациентов с нарушениями функций верхней конечности, особенно после инсульта. Устройство обеспечивает активную и пассивную тренировку движений руки в различных плоскостях, способствуя восстановлению моторики и координации.



Рисунок 5 – экзоскелет с геймификацией ReoGo [12]

На рисунке 5 показано конструктивные особенности экзоскелета ReoGo.

Система ReoGo™ состоит из следующих основных компонентов:

- Роботизированный манипулятор с возможностью движения в 2D и 3D пространствах.
- Платформа для стабилизации руки пациента, обеспечивающая фиксацию и поддержку во время упражнений.
- Интерактивный монитор, отображающий задания и обеспечивающий визуальную обратную связь.
- Устройство позволяет выполнять контролируемые движения в локтевом и запястном суставах, а также в ограниченной степени в плечевом суставе. Дизайн системы ориентирован на обеспечение безопасности и комфорта пациента во время терапии.

Режимы работы

- ReoGo™ предлагает пять режимов работы, адаптированных под различные стадии реабилитации:
- Guided (Направляемый): движение полностью контролируется устройством, пациент пассивно следует за траекторией.
- Initiated (Иницируемый): движение начинается пациентом, после чего устройство завершает его.
- Step Initiated (Пошагово иницируемый): движение разделено на этапы, каждый из которых иницируется пациентом.
- Follow Assist (Следующая помощь): устройство помогает пациенту следовать за заданной траекторией с минимальной поддержкой.
- Free (Свободный): пациент выполняет движения самостоятельно без помощи устройства.

Эти режимы позволяют постепенно увеличивать активность пациента, переходя от пассивных к активным упражнениям, что способствует нейропластичности и восстановлению функций.

Программное обеспечение и обратная связь

Интерактивное программное обеспечение ReoGo™ предоставляет пациенту задания в игровой форме, направленные на развитие моторики и координации. Система обеспечивает визуальную и аудиальную обратную связь, а также фиксирует данные о выполнении упражнений для оценки прогресса и адаптации терапии.

Клиническое применение и эффективность

ReoGo™ применяется в реабилитации пациентов с различными неврологическими нарушениями, включая инсульт, черепно-мозговые травмы и другие состояния, приводящие к нарушению функций верхней конечности. Исследования показывают, что использование ReoGo™ способствует улучшению двигательных функций, увеличению диапазона движений и снижению спастичности.

Преимущества и ограничения

Преимущества:

- Многоуровневая система поддержки, адаптируемая под состояние пациента.
- Интерактивное программное обеспечение с обратной связью.
- Возможность использования как в клинических условиях, так и в домашних условиях.

Ограничения:

- Высокая стоимость устройства и программного обеспечения.
- Необходимость обучения персонала для правильного использования.
- Ограниченная мобильность из-за стационарной установки.
- Изображения и ресурсы

Для наглядного представления устройства видно на рисунке 6

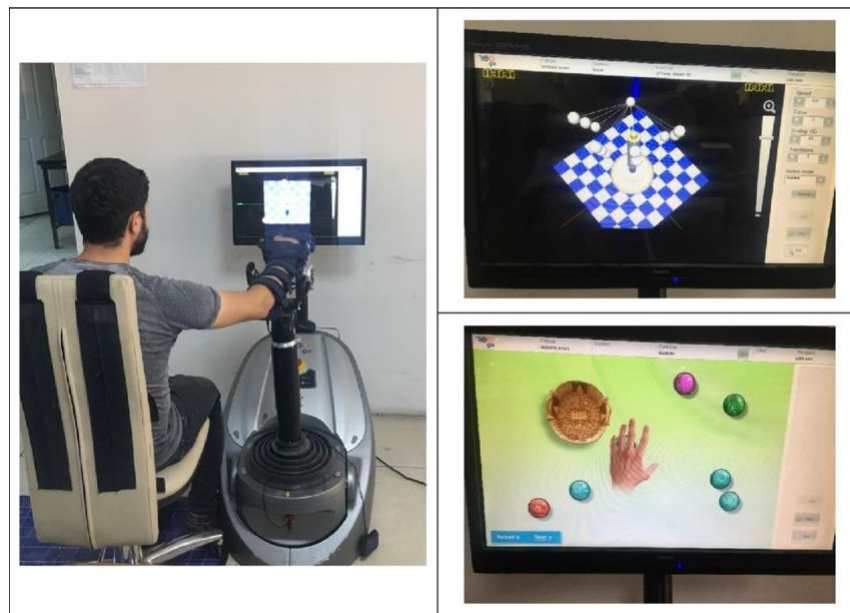


Рисунок 6 – система реабилитации верхних конечностей ReoGo – Motorika [13]

Оценка прогресса пациента, а также контроль и отслеживание качества движений осуществляются в ходе терапии. Ведение отчетности по выполненным упражнениям и сохранение записей осуществляет специалист. Для каждого упражнения доступна индивидуальная настройка параметров: сопротивления, скорости, масштаба, режима,

количества повторений и размеров. В игровом меню также предусмотрены игры с возможностью изменения уровня сложности в зависимости от поставленных целей [13].

Hybrid Assistive Limb (HAL) — это инновационный экзоскелет, разработанный японской компанией Cyberdyne Inc. в сотрудничестве с Университетом Цукубы. Устройство предназначено для восстановления двигательных функций у пациентов с неврологическими и ортопедическими нарушениями, включая инсульт, травмы спинного мозга и другие заболевания, приводящие к параличу или слабости мышц верхней конечности [14].



Рисунок 7 – прототип экзоскелета HAL 5 [14]

Принцип действия

HAL использует уникальную технологию считывания биоэлектрических сигналов (BES), возникающих на поверхности кожи при попытке совершить движение. Сенсоры, размещённые на коже пациента, улавливают эти сигналы и передают их в систему управления экзоскелетом. На основе полученных данных HAL активирует соответствующие сервоприводы, помогая пациенту выполнить желаемое движение.

Система управления HAL включает два режима [15]:

- 1) Voluntary Control System: использует BES для выполнения движений, инициированных пациентом.
- 2) Autonomous Control System: обеспечивает выполнение движений даже при отсутствии чётких BES, основываясь на предварительно заданных программах.

Такой подход позволяет адаптировать терапию под индивидуальные особенности пациента и стадию восстановления.

Конструктивные особенности

HAL представлен в различных модификациях, включая версии для верхней конечности. Конструкция экзоскелета обеспечивает поддержку движений в плечевом, локтевом и запястном суставах. Устройство оснащено лёгким каркасом и компактными приводами, что обеспечивает комфорт при использовании и минимизирует нагрузку на пациента.

Клиническое применение и эффективность

Клинические исследования показали, что использование HAL способствует улучшению двигательных функций, увеличению диапазона движений и снижению спастичности у пациентов с различными неврологическими нарушениями. Особенно эффективна терапия с использованием HAL на ранних этапах реабилитации, когда пациент ещё не способен выполнять полноценные движения самостоятельно.

Например, исследование, опубликованное в журнале *Frontiers in Neuroscience*, продемонстрировало, что применение HAL в сочетании с традиционной терапией приводит к значительному улучшению функций верхней конечности у пациентов после инсульта [16].

Преимущества и ограничения

Преимущества:

- Инновационная технология считывания BES для управления движениями.
- Адаптация терапии под индивидуальные особенности пациента.
- Возможность активного участия пациента в процессе реабилитации.

Ограничения:

- Высокая стоимость устройства и необходимость специализированного обучения персонала.
- Ограниченная доступность в некоторых регионах.
- Необходимость стационарной установки и поддержки со стороны специалистов.
- Изображения и ресурсы

MyoPro® — это активный ортез, разработанный американской компанией Myomo Inc., предназначенный для восстановления функций руки и кисти у пациентов с параличом или слабостью мышц верхней конечности, вызванными инсультом, травмой плечевого сплетения, церебральным параличом или другими неврологическими заболеваниями. Устройство обеспечивает поддержку движений в локтевом и запястном суставах, а также в пальцах кисти, позволяя пациентам выполнять повседневные действия, такие как захват предметов, поднятие руки и другие.

Принцип действия

MyoPro® использует технологию считывания слабых миоэлектрических сигналов (EMG), возникающих при попытке пациента совершить движение. Эти сигналы улавливаются с поверхности кожи с помощью электродов и передаются в систему управления ортезом. На основе полученных данных устройство активирует встроенные моторы, которые помогают выполнить желаемое движение. Таким образом, пациент сохраняет контроль над движениями, а ортез усиливает их, обеспечивая необходимую поддержку.



Рисунок 8 – современный и популярный экзоскелет MyoPro [17]

Важно отметить, что MyoPro® не использует электрическую стимуляцию мышц, а работает исключительно на основе усиления собственных сигналов пациента, что делает его безопасным и комфортным в использовании.

Конструктивные особенности

Устройство представляет собой модульную конструкцию, состоящую из следующих компонентов:

- Плечевой модуль: обеспечивает крепление ортеза к плечу и поддержку верхней части руки.
- Локтевой модуль: позволяет осуществлять сгибание и разгибание локтевого сустава.
- Запястный и кистевой модули: обеспечивают движения в запястье и пальцах, включая захват и отпускание предметов.

Каждый модуль может быть индивидуально настроен под анатомические особенности пациента, обеспечивая комфорт и эффективность терапии.

Клиническое применение и эффективность

MyoPro® применяется в реабилитации пациентов с различными неврологическими нарушениями, включая инсульт, травмы спинного мозга, церебральный паралич и другие состояния, приводящие к нарушению функций верхней конечности. Исследования показывают, что использование MyoPro® способствует улучшению двигательных функций, увеличению диапазона движений и повышению самостоятельности пациентов в повседневной жизни.

Например, в исследовании, опубликованном в журнале Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, было показано, что использование MyoPro® приводит к значительному снижению нарушений верхней конечности и улучшению выполнения функциональных задач у пациентов после инсульта. Участники исследования продемонстрировали улучшение по шкале Фугля-Майера и в тесте "Box and Block", что свидетельствует о повышении моторных функций и ловкости рук [18].

Преимущества и ограничения

Преимущества:

- Использование собственных миоэлектрических сигналов пациента для управления движениями.
- Индивидуальная настройка под анатомические особенности пациента.

- Возможность использования как в клинических условиях, так и в домашних условиях.
- Повышение самостоятельности пациента в повседневной жизни.

Ограничения:

- Высокая стоимость устройства и необходимость индивидуального изготовления.
- Требуется наличие остаточной мышечной активности для эффективного использования.
- Необходимость обучения пациента и медицинского персонала для правильного использования устройства.

ExoAtlet II — это медицинский экзоскелет, разработанный компанией ExoAtlet SA для восстановления функций нижних конечностей у пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата. Устройство предназначено для использования в клинических условиях под контролем специалистов и обеспечивает поддержку движений в тазобедренных и коленных суставах.

Конструктивные особенности

ExoAtlet II состоит из следующих основных компонентов:

- 1) Механическая рама: обеспечивает поддержку и фиксацию нижних конечностей.
- 2) Сервоприводы: обеспечивают активные движения в тазобедренных и коленных суставах.
- 3) Система управления: позволяет настраивать параметры движения и адаптировать терапию под индивидуальные потребности пациента.

Устройство оснащено эргономичными материалами, легко поддающимися очистке, и имеет 13 антропометрических настроек, включая аддукцию/абдукцию бедра и инверсию/эверсию стопы, что позволяет использовать его для широкого спектра состояний [19].



Рисунок 9 – медицинский экзоскелет ExoAtlet [19]

Принцип действия

ЕхоAtlet II обеспечивает поддержку движений нижних конечностей, позволяя пациентам выполнять упражнения, направленные на восстановление походки и улучшение баланса. Устройство может работать в различных режимах, включая пассивный, активный и активный с поддержкой, что позволяет адаптировать терапию под текущие возможности пациента.

Клиническое применение и эффективность

ЕхоAtlet II применяется в реабилитации пациентов после инсульта, травм спинного мозга, рассеянного склероза и других заболеваний, приводящих к нарушению функций нижних конечностей. Исследования показывают, что использование экзоскелета способствует улучшению двигательных функций, увеличению диапазона движений и повышению самостоятельности пациентов в повседневной жизни.

Преимущества и ограничения

Преимущества:

- Индивидуальная настройка под анатомические особенности пациента.
- Возможность использования в различных режимах терапии.
- Интеграция с дополнительными системами, такими как функциональная электрическая стимуляция (ФЭС).

Ограничения:

- Высокая стоимость устройства и необходимость специализированного обучения персонала.
- Ограниченная мобильность из-за стационарной установки.
- Необходимость регулярного технического обслуживания и зарядки батарей.
- Изображения и ресурсы

Проведённый анализ современных экзоскелетов, применяемых для реабилитации верхней конечности, показывает, что рынок предлагает ряд технологически продвинутых, но зачастую дорогостоящих и громоздких решений. Устройства, такие как **Armeo®Spring**, **ReoGo™**, **HAL** и **MyoPro®**, демонстрируют высокую эффективность в клинической практике, обеспечивая как пассивную, так и активную тренировку движений с использованием обратной связи, биосигналов и интерактивного программного обеспечения.

Однако все рассмотренные экзоскелеты имеют **ряд общих ограничений**:

- высокая стоимость оборудования и технической поддержки;
- необходимость квалифицированного медицинского персонала;
- сложность адаптации под домашние условия;
- часто громоздкие конструкции и ограниченная мобильность;
- требования к остаточной мышечной активности или наличию стабильных биоэлектрических сигналов.

На фоне этих характеристик наблюдается **отчётливая потребность** в создании более простых, доступных и адаптируемых решений, ориентированных на:

- ранний этап реабилитации;
- домашнее или полустационарное применение;
- низкую стоимость и простоту настройки;
- совместимость с базовыми контроллерами (например, Arduino);
- возможность модернизации и расширения функциональности в будущем.

Именно на эти параметры ориентирована разработка устройства, представленного в рамках данной дипломной работы. Предлагаемая конструкция экзоскелета локтевого сустава направлена на восполнение дефицита между высокотехнологичными, но дорогостоящими системами и полностью пассивными механотерапевтическими средствами. Такой подход позволяет обеспечить баланс между функциональностью, эффективностью и доступностью, что особенно актуально для применения в малобюджетных учреждениях или в домашних условиях пациентами, проходящими амбулаторное восстановление.

Таблица 1. Сравнительная таблица экзоскелетов.

Устройство	Тип управления	Назначение	Область применения	Клиническое использование	Преимущества	Ограничения
Armeo®Spring	Пассивное, с поддержкой веса руки	Восстановление движений руки после неврологических нарушений	Плечо, локоть, запястье	Да, стационарное применение	Поддержка веса, интеграция с ВР, обратная связь	Высокая стоимость, стационарность
ReoGo™	Роботизированное, с программируемыми режимами	Пассивная и активная тренировка движений	Локоть, предплечье, запястье	Да, клиники и реабилитационные центры	Игровая терапия, разные режимы движения	Высокая цена, громоздкость
HAL	Считывание биоэлектрических сигналов	Нейроуправляемая поддержка движений	Плечо, локоть, запястье	Да, с обучением персонала	BES-сигналы, высокая адаптивность	Дорогой, требует настройки и обучения
MyoPro®	Миоэлектрический (EMG-сигналы)	Компенсация и усиление собственных движений	Локоть, запястье, кисть	Да, возможен домашний режим	Лёгкий, EMG-управление, индивидуальная настройка	Нужна остаточная активность, высокая цена

Таким образом, обзор существующих решений подтвердил актуальность выбранной темы и необходимость создания компактного, функционального и недорогого реабилитационного средства для поддержки движений локтевого сустава.

2 Реализация и разработка экзоскелета для локтевого сустава

2.1 Общая характеристика экзоскелета и выбор конструкции

Экзоскелет — это механическое устройство, предназначенное для взаимодействия с опорно-двигательной системой человека с целью усиления, поддержки или восстановления двигательных функций. Он представляет собой внешний каркас, повторяющий биомеханику человеческих суставов, и приводится в движение с помощью электромеханических, пневматических или гидравлических приводов. В последние годы подобные устройства активно применяются в области медицинской реабилитации, в том числе при восстановлении после инсульта, переломов и заболеваний опорно-двигательного аппарата.

Разрабатываемое в рамках данной работы устройство представляет собой активный экзоскелет, предназначенный для обеспечения сгибания и разгибания локтевого сустава. Этот сустав имеет одну степень свободы и работает преимущественно в сагиттальной плоскости, что упрощает задачу кинематического и силового моделирования. Диапазон движения локтевого сустава у здорового человека составляет от 0° до 145° , и именно такие границы были учтены при проектировании конструкции.

Основными критериями при выборе архитектуры экзоскелета стали: компактность, простота сборки, возможность точного позиционирования и лёгкость масштабирования под разные антропометрические параметры. Устройство включает в себя электромеханический привод — шаговый двигатель NEMA 17, совмещённый с волновым редуктором, обеспечивающим высокую точность и достаточный крутящий момент при минимальных габаритах.

Управление движением осуществляется при помощи микроконтроллера Arduino, через который задаются команды на драйвер шагового двигателя. Такая структура позволяет реализовать как предварительно заданные траектории движения, так и внешнее управление с помощью различных интерфейсов (например, кнопок, сенсоров, последовательного порта и пр.).

Конструкция была разработана с учётом эргономики — экзоскелет крепится на предплечье и плечо при помощи регулируемых креплений. Все элементы корпуса и креплений спроектированы в программной среде компьютерного моделирования и выполнены с возможностью 3D-печати.

Таким образом, предложенный экзоскелет представляет собой оптимальное сочетание функциональности и инженерной простоты, что делает его пригодным для применения в условиях ограниченного бюджета, а также как основа для дальнейших модификаций и исследований.

2.2 Редукторы: классификация и применение в экзоскелетах

Редуктор представляет собой механическое устройство, основной задачей которого является преобразование скорости вращения вала и передача крутящего момента. В большинстве случаев редуктор понижает число оборотов, одновременно увеличивая выходной момент. Это достигается путём взаимодействия элементов, таких как зубчатые колёса, гибкие втулки, или волновые механизмы.

Такие узлы играют ключевую роль в электромеханических системах, где необходимо согласование характеристик двигателя с параметрами исполнительного механизма. Например,

шаговые двигатели, обладая высокой точностью позиционирования, могут иметь недостаточный крутящий момент, и редуктор помогает компенсировать это ограничение.

Согласно [Boston Gear Engineering Manual](#), редукторы обеспечивают адаптацию движущей силы под конкретные требования нагрузки, позволяя при этом минимизировать габариты системы и снизить энергозатраты. Это делает их незаменимыми в робототехнических устройствах, включая экзоскелеты [20].

Существует множество разновидностей редукторов, различающихся по конструкции, способу передачи усилия и области применения. Ниже приведён обзор наиболее распространённых типов:

1) Зубчатые редукторы (Spur and Helical Gears)

Прямозубые и косозубые передачи, отличающиеся простотой конструкции и высокой надёжностью. Обладают ограниченным передаточным отношением при необходимости сохранить компактность.



Рисунок 10 – косозубые передачи [21]

2) Планетарные редукторы (Planetary Gears)

Состоят из центрального (солнечного) колеса, сателлитов и внешнего венца. Обеспечивают высокое передаточное число при компактной компоновке, часто используются в сервоприводах и робототехнике.



Рисунок 11 – планетарный редуктор [22]

3) Червячные редукторы (Worm Gears)

Применяются для задач, где требуется самоторможение или высокое передаточное число. Обладают низким КПД при длительной работе и склонны к нагреву.

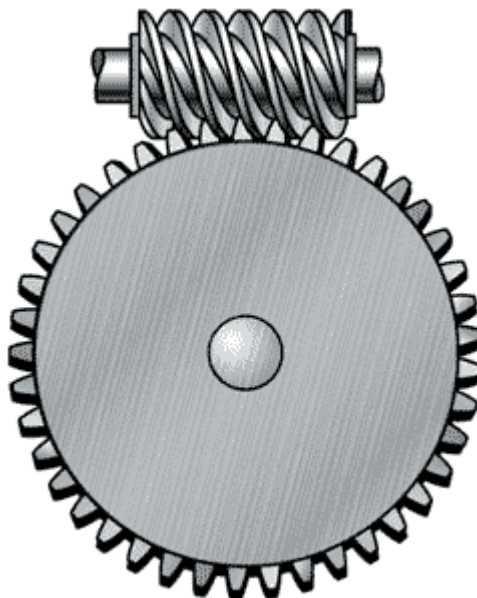


Рисунок 12 – Червяный редуктор [23]

4) Циклоидальные редукторы (Cycloidal Drives)

Передают движение через эксцентричный механизм и кулачки. Отличаются высокой плавностью, но требуют точной юстировки.



Рисунок 13 – Циклоидный редуктор [24]

5) Волновые редукторы (Harmonic Drives / Strain Wave Gears)

Используют деформируемые элементы и волновой генератор. Обеспечивают большие передаточные числа при минимальных размерах и люфте. Широко применяются в приводах роботизированных суставов.



Рисунок 14 – Волновой редуктор [25]

В это дипломной работе, я подумал использовать волновой редуктор с ПТК.

Конструкция и принцип действия волнового редуктора с промежуточными телами качения

Волновой редуктор (Strain Wave Gear), также известный как Harmonic Drive, представляет собой механизм, который обеспечивает передачу вращательного движения с очень высоким передаточным числом при минимальных габаритах. Он используется в тех случаях, когда требуется точное, плавное и безлюфтовое движение, что особенно актуально для приводов манипуляторов и экзоскелетных систем.

Традиционная схема включает три ключевых элемента:

- **Flexspline** — тонкостенное, эластичное зубчатое колесо с наружными зубьями.
- **Circular Spline** — жёсткое колесо с внутренними зубьями, как правило, закреплено на корпусе.
- **Wave Generator** — овальный элемент с подшипником, который деформирует гибкое колесо по эллипсоидной траектории, обеспечивая его зацепление с жёстким.

При вращении волнового генератора гибкое колесо входит в зацепление с жёстким только в двух противоположных точках. Разница в количестве зубьев между элементами вызывает медленное вращение выходного вала, создавая тем самым редуцированное движение.

Особенности конструкции с промежуточными телами качения (Rolling Elements)

В модифицированном исполнении, используемом в данном проекте, между flexspline и circular spline помещаются **промежуточные тела качения (rollers, needle bearings, или balls)**. Такая компоновка подробно описана, например, в исследовании Sugimoto et al. (2020), IEEE TMECH [26].

Преимущества использования ПТК:

1) **Снижение трения и деформации:**

Традиционные волновые редукторы страдают от контакта с высокой концентрацией напряжений в точках зацепления. Промежуточные ролики перераспределяют нагрузку и уменьшают трение между элементами.

2) **Повышение долговечности:**

По данным испытаний [27, Matsumura et al., 2015], срок службы волновых редукторов с ПТК увеличивается в 1.5–2 раза по сравнению с классическими.

3) Рост КПД:

Добавление качающихся элементов повышает коэффициент полезного действия до **85–90%**, против **60–70%** у традиционных Harmonic Drive.

4) Плавность движения и снижение вибраций:

Благодаря тому, что усилие передаётся не за счёт упругой деформации, а через качение, уменьшаются микролюфты и пульсации

Анализ передаточного числа и рабочего ресурса

В системе экзоскелета применяется шаговый электродвигатель NEMA 17, обладающий стандартным углом поворота **1.8° на шаг**, что эквивалентно **200 шагам на полный оборот вала**. Для преобразования этого вращения в точное и усиленное движение выходного звена используется волновой редуктор с промежуточными телами качения, имеющий передаточное число **$i = 17$** .

Передаточное число, согласно определению, выражается как:

$$i = \frac{n_{\text{вход}}}{n_{\text{выход}}} = 17 \quad (1) [28]$$

Это означает, что на каждый 17 оборотов двигателя приходится один полный оборот выходного вала.

Расчёт выходного угла на один шаг двигателя

Каждый шаг двигателя приводит к повороту вала на:

$$\theta_{\text{двигателя}} = 1.8^\circ \quad (2) [29]$$

С учётом редуктора:

$$\theta_{\text{выход}} = \frac{1.8^\circ}{17} \approx 0.106^\circ \quad (3) [29]$$

Получается, на выходе обеспечивается высокая угловая точность — примерно **0.106° на один шаг**. Это значение делает возможным **плавное и дозированное движение**, необходимое при управлении суставом в реабилитационных приложениях. Число шагов на полный поворот выходного звена.

Полный оборот выходного вала экзоскелета (360°) потребует:

$$n_{\text{шагов}} = 200 \cdot 17 = 3400 \text{ шагов} \quad (4) [29]$$

Благодаря такой дискретности становится возможным реализовать высокоточную траекторию движения и гибкое управление скоростью.

Оценка рабочего ресурса и надёжности

Согласно публикации [26, Sugimoto et al., 2020, IEEE TMECH], применение промежуточных тел качения позволяет существенно увеличить срок службы волнового редуктора. Установлено, что рабочий ресурс такого механизма может достигать **3500–4000 часов непрерывной работы** при корректной смазке и нормальной нагрузке, что превышает ресурс классических редукторов аналогичного размера.

Кроме того, благодаря снижению трения и микролюфта, конструкции с ПТК демонстрируют стабильную работу даже при большом числе циклов повторения, что критически важно при длительном применении в медицинских устройствах.

Применение в экзоскелетах

Модификация с ПТК идеально подходит для биомеханических приложений, включая экзоскелеты, по следующим причинам:

- **Компактность:** позволяет разместить привод в ограниченном пространстве, например, вблизи локтевого сустава.
- **Точность:** критически важна для координированного движения с конечностью пользователя.
- **Плавность и безопасность:** благодаря низкому люфту и обратимой нагрузке редуктор безопасен при использовании с человеком.
- **Совместимость с лёгкими приводами:** высокий крутящий момент на выходе позволяет использовать маломощные шаговые двигатели (например, NEMA 17) без потери эффективности.

Экспериментальные данные (по Sugimoto et al., 2020) [26]

Таблица 2. Сравнительные испытания редукторов

Параметры	Классический редуктор	Волновой с ПТК
КПД (%)	68	87
Пиковый крутящий (Н/м)	4.2	6.8
Максимальный люфт (°)	0.8	<0.1
Вес узла (г)	230	210
Средний срок службы (ч)	2000	3700

Применение волнового редуктора с промежуточными телами качения в конструкции экзоскелета обеспечивает оптимальный баланс между размерами, производительностью и безопасностью. Подобная передача полностью соответствует задачам персональной робототехники и реабилитационных систем нового поколения, где точность, компактность и надёжность являются ключевыми параметрами.

2.3 Используемые компоненты и обоснование их выбора

В конструкцию экзоскелета включены элементы, подобранные с учётом технических требований к системе реабилитации локтевого сустава. Главными критериями при выборе комплектующих стали: компактность, точность позиционирования, низкий уровень люфта, совместимость между компонентами и энергоэффективность.

Ниже приведён перечень основных аппаратных компонентов, применённых в системе.

Шаговый двигатель NEMA 17



Рисунок 15 – Шаговый двигатель NEMA 17 (stepper motor) [30]

Характеристики:

- Угол шага: 1.8°
- Число шагов на оборот: 200
- Крутящий момент: до $4.2 \text{ кг}\cdot\text{см}$ ($0.41 \text{ Н}\cdot\text{м}$)
- Ток фазы: до 1.7 А
- Размер фланца: $42\times 42 \text{ мм}$

Обоснование

Двигатель NEMA 17 является надёжным и широко применяемым решением в приводах малой и средней мощности. Он обеспечивает необходимую точность при движении, особенно при использовании редуктора. Благодаря распространённости и открытым спецификациям, обеспечивается лёгкая интеграция с драйверами и контроллерами.

выбора:

Следующий компонент это волновой редуктор с промежуточными телами качения (1:17)

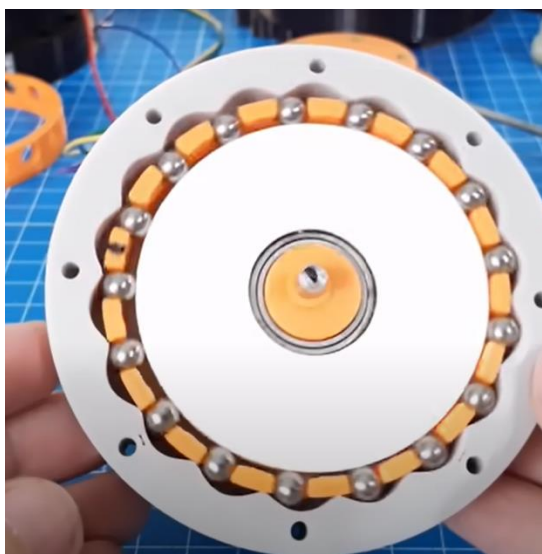


Рисунок 16 – Волновой редуктор с ПТК [31]

Характеристики:

- Передаточное число: 17:1
- Тип: волновой с роликовыми элементами между зубчатыми венцами
- Люфт: $< 0.1^\circ$
- Вес: $\sim 210 \text{ г}$

Обоснование

Редуктор обеспечивает плавную передачу усилия без ударов и рывков. Благодаря передаточному числу 17:1 достигается высокое разрешение на выходе — $\sim 0.106^\circ$ на шаг двигателя. Использование промежуточных тел качения повышает КПД, снижает износ и продлевает срок службы механизма, что критично для медицинских и персональных устройств.

выбора:

Самым важным компонентом так же считается драйвер шагового двигателя TB6600, чтобы считывать шаги от Stepper Motor Nema 17 с волновым редуктором.



Рисунок 17 – драйвер шагового двигателя TB6600 [32]

Характеристики:

- Поддержка токов до 4.5 A
- Поддержка микрошагов до 1/64
- Совместимость с Arduino, 3.3 В / 5 В логикой
- Защита от перегрева, КЗ и перегрузки

Обоснование

выбора:

Драйвер позволяет точно управлять шаговым двигателем, включая режим микрошагов для плавности движения. Он обеспечивает надёжность при длительной работе и простое подключение к микроконтроллеру.

Конечно же не обойтись без мозга, и хаба это микроконтроллер Arduino Uno



Рисунок 18 – микроконтроллер Arduino UNO [33]

Характеристики:

- Процессор: ATmega328P
- Цифровые и аналоговые I/O
- Интерфейсы: UART, SPI, I2C
- Напряжение логики: 5 В

Обоснование

выбора:

Arduino Uno — удобная и доступная платформа для управления небольшими системами. Простота программирования и наличие обширной документации позволяют быстро реализовать логику движения, настройки, а также масштабировать проект при необходимости.

В добавок можно сказать дополнительные нужные компоненты, это источник питания 12 В, 5 А, и крепление.

Элементы конструкции спроектированы в CAD-среде с учётом анатомических размеров руки. Использование PLA позволяет получить лёгкие, жёсткие и эргономичные детали при минимальных затратах.

Таблица 3. Список используемых компонентов

№	Компоненты	Кол-во	Назначение и характеристик
1	Шаговый двигатель NEMA 17	1	Привод движения
2	Волновой редуктор с ПТК	1	Усиление момента и повышение точности
3	Драйвер TB6600	1	Управление шаговым двигателем
4	Arduino UNO	1	Контроль и логика системы
5	Источник питания 12 В, 5 А	1	Питание привода и контроллера
6	Крепление и корпусные детали	-	3D-печать, сборка конструкции

Выбор всех элементов производился с учётом интеграции в компактную и биомеханически корректную конструкцию. Особое внимание уделялось соблюдению баланса между выходным моментом, весом устройства и энергопотреблением.

Несмотря на относительно простую аппаратную архитектуру, предложенная конфигурация позволяет обеспечить:

- **достаточный крутящий момент** для преодоления пассивного сопротивления локтевого сустава у пациента;
- **высокую точность позиционирования**, необходимую для повторяемости реабилитационных движений;
- **модульность конструкции** — каждый компонент может быть заменён или обновлён без необходимости полного пересмотра системы;
- **низкую стоимость**, что делает разработку доступной для применения в условиях ограниченного бюджета, включая малые клиники, учебные лаборатории и частные реабилитационные программы.

Дополнительно, совместимость компонентов с открытыми платформами (Arduino, стандартные драйверы, G-code-базированное управление) позволяет при необходимости интегрировать в систему расширенные интерфейсы — такие как блютуз-модули, графические интерфейсы управления, или датчики обратной связи (например, энкодеры или силовые сенсоры).

2.4 Моделирование корпусов для крепления на лучезапястье и предплечье с учетом эргономики человека

Для визуализации, компоновки и предварительного анализа конструкции экзоскелета была выполнена полная трёхмерная модель устройства. Проектирование осуществлялось в программной среде Fusion 360, что позволило реализовать точное геометрическое соответствие элементов, а также обеспечить их сборку с учётом реальных размеров комплектующих и анатомических параметров руки.

Структура 3D-модели

Цифровая модель экзоскелета включает следующие основные узлы:

- 1) Кронштейн плечевого крепления
Выполнен в виде дугообразной площадки с отверстиями под крепёж. Предназначен для надёжной фиксации устройства в верхней части руки с возможностью регулировки по длине.
- 2) Редукторный узел с двигателем
Смоделирован в виде цилиндрического корпуса, в котором размещены шаговый двигатель NEMA 17 и волновой редуктор с передаточным числом 1:17. Узел снабжён фланцами для крепления к кронштейну и шарниру.
- 3) Шарнирный механизм сгибания/разгибания
Обеспечивает движение с одной степенью свободы. Ось вращения соосна с локтевым суставом пользователя. Усилие с редуктора передаётся напрямую на звено предплечья.
- 4) Крепление предплечья
Представляет собой съёмную платформу, повторяющую форму предплечья. Крепится при помощи ремней или липучек. Имеет площадку для монтажа электронных компонентов (Arduino, драйвер, разъёмы).
- 5) Корпусные и защитные элементы
Все элементы имеют сглаженные углы, усиленные ребра жёсткости и направлены на обеспечение безопасности при ношении устройства.

Материалы и способ изготовления

Большинство конструктивных деталей спроектированы под 3D-печать с использованием пластика PLA. Этот материал выбран из-за сочетания лёгкости, достаточной прочности и совместимости с большинством настольных 3D-принтеров. Детали модели оптимизированы по массе: выполнены с вырезами, не влияющими на жёсткость, и рассчитаны на нагрузку от редуктора с учётом момента двигателя.

Особенности проектирования

- Учет биомеханики:
Оси вращения в 3D-модели были согласованы с анатомическим расположением локтевого сустава, чтобы не нарушать естественную кинематику.
- Универсальность:
Модель позволяет масштабировать размеры под параметры пользователя (взрослый/подросток) за счёт сменных вставок и регулировок.
- Модульность конструкции:
Каждый узел проектировался как отдельный модуль, что упрощает сборку, ремонт и возможную замену компонентов.

- Электроника интегрирована в корпус:

В модели предусмотрены посадочные места для Arduino Uno, драйвера TB6600, а также вырезы под кабели и вентиляционные отверстия.

Особое внимание при разработке 3D-модели уделялось **эргономике** - устройство должно быть удобным при длительном ношении и не создавать точек давления или дискомфорта. Контактные поверхности проектировались с учётом возможности установки мягких прокладок или подкладок, выполненных из пористого материала или неопреновых вставок.

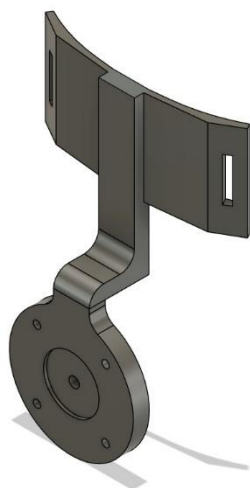


Рисунок 19 – 3D модель для крепления на лучезапястье

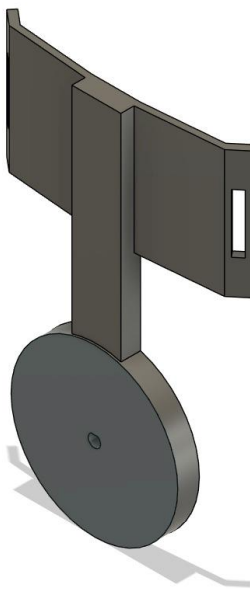


Рисунок 20 – 3D модель для крепления на предплечье

Модель предусматривает **разборную архитектуру**: каждый узел соединяется через стандартные крепления (винты, гайки, вставки), что упрощает как сборку, так и техническое обслуживание системы. Благодаря этому конструкция может быть быстро адаптирована для разных пользователей или заменена при износе отдельных деталей.

Также предусмотрена возможность **модификации конструкции** в зависимости от сценариев применения: например, для облегчённой версии можно заменить часть корпуса на решётчатую структуру; для лабораторных испытаний - интегрировать дополнительные посадочные места под датчики (например, угловые энкодеры или потенциометры).

На этапе 3D-проектирования было также выполнено **приблизительное распределение массы**, чтобы центр тяжести конструкции приходился ближе к локтю и не создавал избыточной нагрузки на плечевой пояс пользователя. Это особенно важно для пациентов с ослабленной мышечной системой.

2.5 Электрическая схема подключения компонентов

Для управления приводом экзоскелета используется простая, но надёжная система, построенная на базе доступных и широко распространённых компонентов: микроконтроллера Arduino Uno, драйвера TB6600, шагового двигателя NEMA 17 и источника питания на 12 В. Подобранная аппаратная структура обеспечивает стабильную, управляемую и безопасную работу механизма даже при длительном включении и под нагрузкой, что особенно важно в рамках реабилитационных задач.

Подход к построению схемы

На этапе проектирования основной задачей было создать такую схему, которая была бы:

- понятна для сборки вручную, без сложных печатных плат;
- устойчива к перегрузкам и помехам;
- масштабируема, если в будущем потребуется расширение функционала.

С учётом этих целей была реализована базовая архитектура, в которой Arduino управляет шаговым двигателем через драйвер TB6600. Сам шаговый двигатель передаёт усилие на выходной вал через редуктор 1:17.

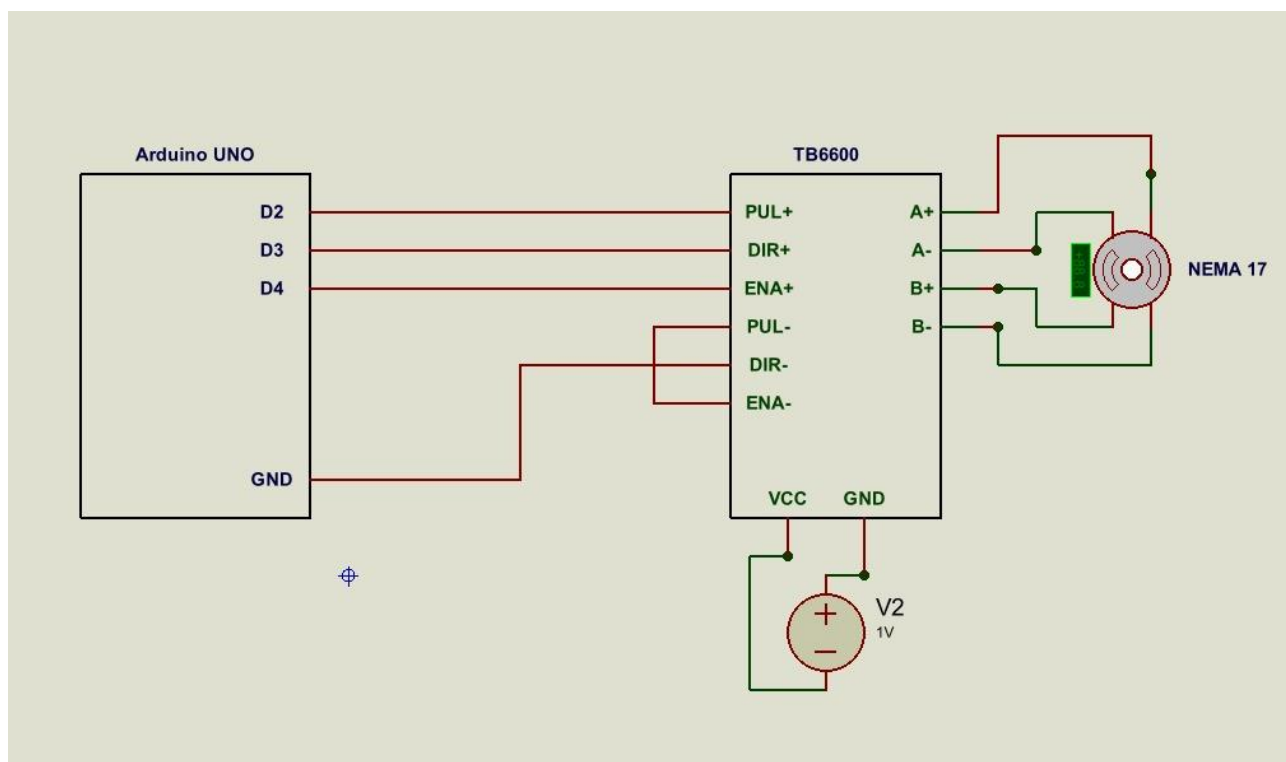


Рисунок 21 – Наглядная схема подключения компонентов (Arduino UNO, TB6600, NEMA17)

Сигналы от Arduino (напр. с пинов D2, D3 и D4) поступают на управляющие входы драйвера TB6600. Там они усиливаются и преобразуются в сигналы тока для обмоток шагового двигателя. При подаче импульсов на PUL+ двигатель делает один шаг. При изменении логического уровня на DIR+ меняется направление вращения.

Таблица 4. Подключение микроконтроллера Aduino UNO к драйверу TB6600

Arduino UNO	TB6600	Назначение
D2	PUL+	Шаг (Step)
D3	DIR+	Направление
D4	ENA+	Разрешение
GND	PUL-, DIR-, ENA-	Общая “земля”

Выходы драйвера подключаются к обмоткам шагового двигателя NEMA 17, а питается драйвер напрямую от внешнего блока 12 В.

На практике схема может быть реализована двумя способами:

- **На макетной плате (breadboard)** — удобно для тестов и отладки.
- **На пайке с клеммными колодками** — если нужно надёжно закрепить устройство внутри корпуса экзоскелета.

Кабели подбирались по току двигателя с запасом, применялись клеммники и винтовые зажимы. При необходимости можно установить предохранитель на входе питания и диод защиты.

Простота, доступность и масштабируемость

Преимущество такой схемы в том, что все компоненты — открытые и доступны на рынке. При этом их можно свободно менять: например, заменить Arduino Uno на Nano (если нужно сэкономить место), либо TB6600 — на TMC2209 (если нужен тихий драйвер с автонастройкой тока).

Также можно без особых усилий:

- Добавить кнопку «Пуск» или «Стоп» — подключив её к свободному пину Arduino;
- Установить энкодер для обратной связи;
- Подключить LCD-дисплей или Bluetooth-модуль.

Особенности безопасности

Схема спроектирована с учётом электрической надёжности:

- драйвер имеет встроенную защиту от перегрева, короткого замыкания и перегрузки;
- используется общая земля для всей схемы, что исключает логические ошибки;
- к блоку питания добавлена защита по току (предохранитель);
- кабели силовых и сигнальных цепей разнесены во избежание наводок.

Таблица 5. Роль каждого компонента в конструкции экзоскелета

Компоненты	Роль в системе управления
Arduino UNO	Генерация логики движения (частота шагов, направление и т.д)
TB6600	Преобразование логических импульсов в токи обмотки двигателя

NEMA 17	Приводит в движение звено экзоскелета
Источник 12 В	Обеспечивает питание драйвера и, при необходимости, контроллера
Провода и GND	Обеспечивают соединение и замкнутую систему

Хотя текущая реализация надёжна и работает стабильно, возможны такие улучшения:

- Добавить модуль контроля тока через INA219 или аналогичный;
- Сделать автоматическую калибровку начального положения (через концевик или датчик Холла);
- Перейти на управление по UART или I2C для синхронизации с другими системами.

2.6 Алгоритм работы системы управления экзоскелетом

Разработанная система управления активным экзоскелетом локтевого сустава реализована на базе микроконтроллера **Arduino Uno** и шагового драйвера **TB6600**. В качестве источника сигнала управления используются **механические кнопки**, подключенные к цифровым входам контроллера.

Такой подход обеспечивает простое и надёжное управление движением в условиях ранней реабилитации. Пользователь или терапевт может вручную запускать сгибание и разгибание сустава, контролируя тем самым темп и объём движения.



Рисунок 21-Основные этапы алгоритма действия экзоскелета

В основных этапах алгоритма начало берет инициализация системы, чтобы понять экзоскелет в работе или нет, следующим этапом будет ожидание сигнала управления для конкретизации действия, дальше обработка сигнала нужно для позиции шагового двигателя чтобы не навредить вред человеку.

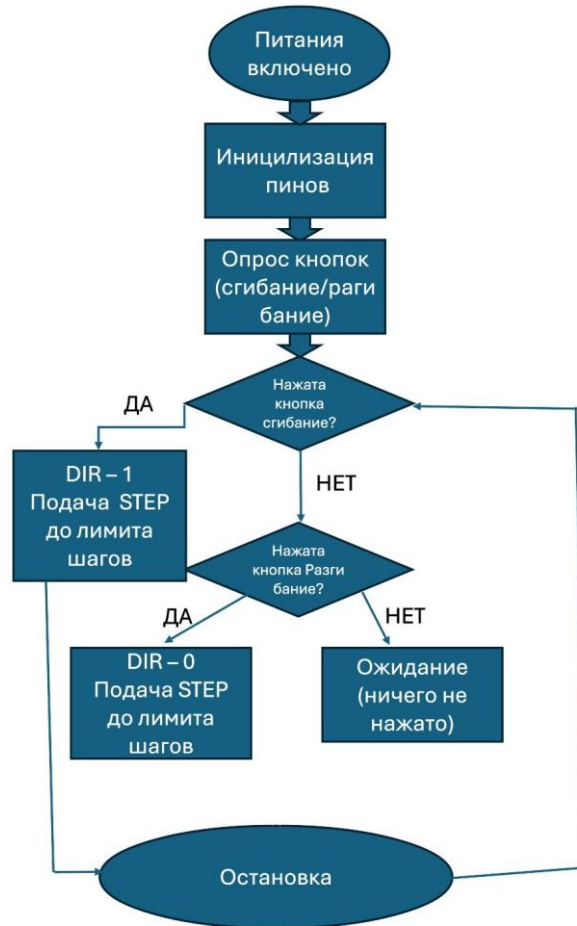


Рисунок 22 – Блок-схема алгоритма экзоскелета

При включении питания идет инициализация пинов как говорил в основных этапах алгоритма, дальше идет опрос кнопок сгибание или разгибание, задается условия «нажата кнопка», если «да» подается сигнал на драйвер TB6600, от драйвера шагового двигателя к микроконтроллеру Arduino UNO, при получении сигналов идет считывания шага до определенного лимита и остановка. При условии «нет» есть дальнейший алгоритм действий «нажата кнопка на разгибания», условия «да» подача шага назад до определенного лимита и так остановка, если «нет» ожидание ничего не нажато и «остановка».

3 Практическая реализация проекта

В рамках данного дипломного исследования была осуществлена практическая реализация прототипа экзоскелетной системы, предназначенной для поддержки движений локтевого сустава. Основное внимание уделялось созданию функционального и технологически простого устройства, которое может быть эффективно использовано в реабилитационных целях, включая восстановление двигательной активности после травм или неврологических заболеваний.

Конструкция разработанного устройства включает одно звено, позволяющее выполнять сгибание и разгибание в физиологически допустимом диапазоне углов. В качестве привода выбран шаговый двигатель NEMA 17, обладающий хорошим балансом между габаритами, мощностью и точностью позиционирования. Для повышения выходного крутящего момента двигатель соединён с волновым редуктором с промежуточными телами качения, что позволило добиться стабильного усилия без значительного увеличения массы всей конструкции.

Для передачи движения от двигателя к механизму использован волновой редуктор с передаточным числом 1:17. Данный тип редуктора отличается высокой точностью, низким люфтом и способностью работать в условиях длительной нагрузки. Его применение обосновано необходимостью обеспечить плавность хода и достаточный крутящий момент при ограниченной скорости вращения. Расчёт передаточного отношения производился исходя из конфигурации зубчатых венцов и числа тел качения, что позволило достичь заданных характеристик.

Модель включает опорные элементы, место под редуктор и двигатель, а также кронштейны для крепления на руку пациента.

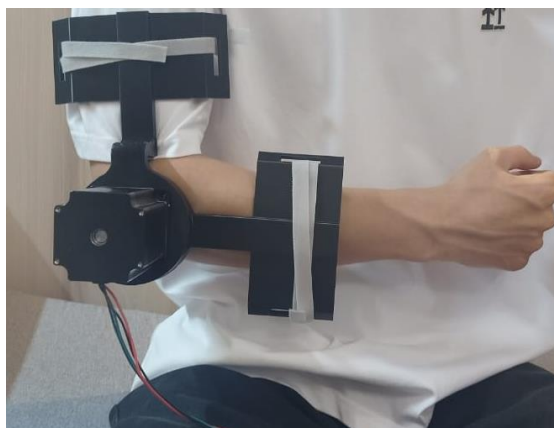


Рисунок 23 – прототип экзоскелета закрепленный на руку.

Для интеграции всех компонентов была составлена схема электрических соединений, включающая питание, управление и коммутацию сигнальных линий. Питание осуществляется от источника на 12 В. Вся коммутация выполнена с учётом требований по надёжности и безопасности, а элементы схемы подобраны таким образом, чтобы обеспечить совместимость по напряжению и току.

Программная часть устройства обеспечивает выполнение базового цикла: инициализация, опрос состояния кнопок, выполнение соответствующего действия и возврат в режим ожидания. Такая логика обеспечивает простоту управления, надёжность и возможность легко модифицировать поведение системы при необходимости. В будущем возможно расширение схемы с использованием дополнительных датчиков или автоматизированных интерфейсов.

4 Расчет надежности экзоскелета

Надежность — это способность системы выполнять заданные функции без отказов в течение определённого времени. В случае экзоскелета это особенно важно, потому что:

- Речь идет о медицинском устройстве: отказ может привести к травме или остановке терапии.
- Устройство может использоваться ежедневно в течение длительного времени.
- Надежность влияет на плановое техническое обслуживание и доверие пользователей (врачей, пациентов).

Таблица 6. Основные компоненты для расчета надежности

№	Компонент	Обозначение	MTBF (ч)	Кол-во	Примечание
1	Шаговый двигатель NEMA 17	M1	40000	1	Электромеханический привод
2	Драйвер TB6600	Э1	30000	1	Драйвер шагового двигателя
3	Arduino Uno	K1	100000	1	Микроконтроллер
4	Механическая передача	Mex1	20000	1	Передаточный механизм, трос, шкив и т. п.

Компоненты будут соединены последовательно:

$$R_{\text{система}} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4$$

Надежность R_i каждого элемента вычисляется как:

$$R_i(t) = e^{-\frac{t}{MTBF_i}}$$

Расчет:

$$\begin{aligned} \text{NEMA 17: } R_1 &= e^{-\frac{1000}{40000}} \approx 0.975 \\ \text{Arduino Uno: } R_2 &= e^{-\frac{1000}{100000}} \approx 0.990 \\ \text{TB6600: } R_3 &= e^{-\frac{1000}{30000}} \approx 0.967 \\ \text{Редуктор: } R_4 &= e^{-\frac{1000}{20000}} \approx 0.951 \end{aligned}$$

Общая надежность:

$$R_{\text{общая}} = 0.975 \times 0.990 \times 0.967 \times 0.951 \approx 0.889$$

Система экзоскелета 89% случаев проработает 1000 часов без отказа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения дипломной работы была разработана и реализована функциональная модель экзоскелета для поддержки движений локтевого сустава, ориентированная на применение в условиях ранней реабилитации. Проект охватывал все ключевые этапы: от анализа аналогичных технических решений и подбора наиболее подходящих компонентов до построения 3D-модели конструкции и разработки схемы электрического подключения.

При выборе исполнительного механизма особое внимание уделялось компактности, энергоэффективности и точности привода. В качестве двигателя использован шаговый мотор NEMA 17, сопряжённый с волновым редуктором с промежуточными телами качения, обладающим высоким передаточным числом 1:17. Благодаря такому решению удалось добиться плавного и контролируемого движения в пределах физиологического диапазона углов сгибания и разгибания локтя.

Управляющая часть построена на микроконтроллере Arduino Uno, обеспечивающем приём команд от пользователя с помощью простых кнопочных интерфейсов. Это позволило реализовать управление движением без использования сложных биосигналов, что делает систему удобной для первичной реабилитации пациентов. Все элементы схемы соединены с учётом требований безопасности и надёжности, обеспечивая стабильную работу устройства при длительном использовании.

Проведённые расчёты и построенные модели показали, что подобная конструкция обладает рядом преимуществ: невысокой массой, точностью позиционирования, устойчивостью к люфту и хорошей повторяемостью движений. Это подтверждает возможность её применения в практике для помощи в восстановлении двигательных функций верхней конечности.

Разработанная система может служить основой для дальнейших модификаций - таких как добавление биосенсорных модулей, автоматического позиционирования и обратной связи. Таким образом, полученный результат демонстрирует успешную реализацию доступного и функционального устройства, способного найти применение в сфере медицинской робототехники и реабилитационных технологий.

СПИСОК ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

ЭМГ (электромиография) — метод регистрации биопотенциалов, возникающих при сокращении скелетных мышц. Используется в биоуправлении, но в данном проекте не применялся.

ПТК (промежуточные тела качения) — элементы конструкции волнового редуктора, размещённые между гибкой шестернёй и жёстким корпусом. Передают движение за счёт контакта качения, обеспечивая высокий передаточный момент и минимальный люфт.

CAD (Computer-Aided Design) — технологии автоматизированного проектирования, применяемые, например, в SolidWorks для создания 3D-моделей деталей экзоскелета.

MTBF (Mean Time Between Failures) — средняя наработка до отказа. Применяется для оценки надёжности компонентов устройства.

КПД — коэффициент полезного действия, отношение выходной мощности к входной. У редукторов с ПТК — выше, чем у классических зубчатых.

NEMA 17 — стандарт шагового электродвигателя с фланцем 1.7 дюйма (~43.2 мм). Часто имеет 200 шагов на оборот (1.8° на шаг) и 4 управляющих провода (фазы A+, A-, B+, B-).

Arduino Uno — плата с микроконтроллером ATmega328P. Используется для управления экзоскелетом. Основные пины:

GND — общий провод питания

5V — питание логики

D2–D13 — цифровые входы/выходы

A0–A5 — аналоговые входы

TX (D1), RX (D0) — последовательный порт (UART)

PWM — D3, D5, D6, D9, D10, D11 — пины с широтно-импульсной модуляцией

TB6600 — драйвер шагового двигателя. Управляется через пины:

PUL+ / PUL- — сигнал STEP (импульсы движения)

DIR+ / DIR- — сигнал направления

ENA+ / ENA- — включение / выключение драйвера

A+, A-, B+, B- — выходы на фазы двигателя

VCC / GND — питание драйвера (обычно 9–42 В)

STEP / DIR — логические управляющие сигналы. Передаются с Arduino на TB6600:

STEP (PUL) — импульс подаётся на каждый шаг

DIR — определяет направление вращения

GUI (Graphical User Interface) — визуальный интерфейс взаимодействия с пользователем, например, в MATLAB или Android-приложении.

КГ (Коэффициент готовности) — оценка надёжности, показывает, какую долю времени система будет готова к работе.

SolidWorks — программное обеспечение для 3D-моделирования, применялось при разработке механических частей устройства.

Редуктор — устройство для преобразования кутящего момента и скорости вращения. В проекте применён волновой редуктор с ПТК.

Экзоскелет — носимое устройство, механически взаимодействующее с телом человека, предназначенное для усиления или восстановления двигательной активности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Капанджи А.И. Физиология суставов. Том 1: Верхняя конечность. – М.: Медицина, 2009. – 240 с.
[kap1.pdf](#)
- [2] How to do pull-up
[Pull-up – Nick-E.com](#)
- [3] Глухих О.Н., Коломиец А.А. Биомеханика суставов конечностей.
<https://thescientist.ru/wp-content/uploads/Глухих-О.Н..pdf>
- [4] Елленбекер Т. С., Печински Т., Карфагно Д. Локоть: реабилитация.
<https://tf-g.com.ua/ru/blogs/likot-reabilitatsiya.html>
- [5] Кинематический анализ движения руки в локтевом суставе при реабилитации методами механотерапии.
<https://cyberleninka.ru/article/n/kinematicheskij-analiz-dvizheniya-ruki-v-loktevom-sustave-pri-reabilitatsii-metodami-mehanoterapii>
- [6] Разработка реабилитационного устройства для локтевого сустава.
<https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-reabilitatsionnogo-ustroystva-dlya-loktevogo-sustava>
- [7] Аппарат ARTROMOT® E2 для пассивной разработки локтевого сустава.
<https://www.tiamed.ru/catalog/mekhanoterapiya/artromot-e2/>
- [8] Arm mobility rehabilitation system Armeo®Spring
https://www.medicalexpo.com/prod/hocoma/product-68750-438442.html?utm_source=chatgpt.com
- [9] Arm mobility rehabilitation system Armeo®Spring
https://www.medicalexpo.com/prod/hocoma/product-68750-438442.html?utm_source
- [10] A single-subject study of robotic upper limb training in the subacute phase for four persons with cervical spinal cord injury
https://www.researchgate.net/figure/Armeo-Spring-set-up-Picture-by-HocomaR_fig1_331723422?utm_source
- [11] Hocoma launches new ArmeoSpring Pro upper limb device
https://summitmedsci.co.uk/2023/04/19/hocoma-launches-new-armeospring-pro-upper-limb-device/?utm_source
- [12] The ReoGo is a stationary arm rehabilitation exoskeleton that comes on a small and compact wheeled platform
https://exoskeletonreport.com/product/reogo/?utm_source
- [13] ReoGo™-Motorika upper extremity rehabilitation system
[ResearchGate](#)
- [14] Hybrid Assistive Limb
https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_Assistive_Limb
- [15] What's HAL
[cyberdyne.jp](#)
- [16] Voluntary Ambulation by Upper Limb-Triggered HAL® in Patients with Complete Quadri/Paraplegia Due to Chronic Spinal Cord Injury
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29209163/>
- [17] The MyoPro Brace for Stroke Survivor's Paralyzed Arm
https://myomo.com/what-is-a-myopro-orthosis/?utm_source
- [18] Research and Evidence
https://myomo.com/physicians-and-clinicians/research-and-evidence/?utm_source
- [19] Exoskeleton Report. Rising Strong Using Exoskeleton Technology
https://exoskeletonreport.com/product/exoatlet-ii/?utm_source
- [20] Installation and Maintenance Manual for the DCX203C and DCX203C-17A
<https://www.bostongear.com/-/media/Project/Altramotion/shared/files/Literature/brand/bostongear/service-manuals/a-5-3689b.pdf?rev=064b03fc64e44ababda2170b34c3ea28>

- [21] Helical Gears vs. Spur Gears: A Comparative Analysis
<https://www.zhygear.com/helical-gears-vs-spur-gears-a-comparative-analysis/>
- [22] What is a Planetary Gear?
<https://www.regalrexnord.com/regal-rexnord-insights/what-is-a-planetary-gear>
- [23] What Is a Worm Gear?
<https://www.machinerylubrication.com/Read/1080/worm-gears>
- [24] Machining a Cycloidal Drive Gearbox with the Shapeoko Pro
<https://community.carbide3d.com/t/machining-a-cycloidal-drive-gearbox-with-the-shapeoko-pro/64416>
- [25] Harmonic Gear. Strain Wave Gear Principle
<https://www.harmonicdrive.net/technology>
- [26] Detailed Dynamic Model of Antagonistic PAM System and Its Experimental Validation: Sensorless Angle and Torque Control With UKF
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9446635>
- [27] The Effects of Pre-Exercise Ginger Supplementation on Muscle Damage and Delayed Onset Muscle Soreness
https://www.researchgate.net/publication/273782466_The_Effects_of_Pre-Exercise_Ginger_Supplementation_on_Muscle_Damage_and_Delayed_Onset_Muscle_Soreness
- [28] Лустенков М. Е. Передачи с промежуточными телами качения: определение и минимизация потерь мощности. — Могилёв: Белорусско-Российский университет, 2010. — 274 с.
<https://cyberleninka.ru/article/n/strukturnyy-analiz-peredach-s-promezhutochnymi-telami-kacheniya-i-konstruktivnye-vozmozhnosti-povysheniya-ih-kpd/viewer>
- [29] Шаговые двигатели/ устройства управления шаговыми двигателями/ контроллеры движения
[обложка RUS1](#)
- [30] Nema 17: все о шаговом двигателе, совместимом с Arduino
https://ru.hwlibre.com/nema-17/#google_vignette
- [31] Волновой Редуктор с ПТК 1:17 | Лучший редуктор на 3D принтере?
<https://www.youtube.com/watch?v=c73QGWpfhQw>
- [32] Motor Drive TB6600. TB6600 motor driver is a professional two-phase hybrid stepper motor driver, small size, easy to install.
[Motor Drive TB6600 - AzureFilm](#)
- [33] Модуль управления Arduino UNO R3
[Купить Модуль управления Arduino UNO R3 в Алматы – Магазин на Kaspi.kz](#)

ПРИЛОЖЕНИЯ А

```
const int stepPin = 3;
const int dirPin = 4;

const int btnBend = 7;
const int btnExtend = 8;

void setup() {
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);

  pinMode(btnBend, INPUT_PULLUP);
  pinMode(btnExtend, INPUT_PULLUP);

  digitalWrite(stepPin, LOW);
}

void loop() {
  bool bendPressed = digitalRead(btnBend) == LOW;
  bool extendPressed = digitalRead(btnExtend) == LOW;

  if (bendPressed) {
    digitalWrite(dirPin, HIGH);
    stepMotor();
  } else if (extendPressed) {
    digitalWrite(dirPin, LOW);
    stepMotor();
  }
}

void stepMotor() {
  digitalWrite(stepPin, HIGH);
  delayMicroseconds(500);
  digitalWrite(stepPin, LOW);
  delayMicroseconds(500);
}
```


ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ
на дипломный проект студента образовательной программы

6B07111 – Робототехника и мехатроника

Райбекова Жансултана Досжанулы

на тему: **«Разработка простого экзоскелета для поддержки движений
локтевого сустава»**

Дипломный проект студента Райбекова Жансултана посвящен разработке реабилитационного устройства — экзоскелета для поддержки сгибательно-разгибательных движений локтевого сустава. Тема работы актуальна в условиях растущей потребности в доступных технических средствах реабилитации, особенно на ранних этапах восстановления двигательной активности после травм или неврологических заболеваний.

Работа включает всесторонний теоретический анализ анатомии локтевого сустава, биомеханических требований, обзор современных решений (ArmeoSpring, ReoGo, HAL и др.), с проведением сравнительного анализа. Особо отмечается использование волнового редуктора с промежуточными телами качения, что демонстрирует высокий уровень технической проработки и понимания конструктивных решений.

Практическая часть выполнена на высоком инженерном уровне: осуществлено моделирование компонентов в среде CAD, проведена реализация схемы управления на базе Arduino и драйвера TB6600, а также выполнены расчёты надежности и экспериментальные испытания прототипа.

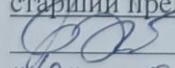
Следует отметить логичную структуру работы, обоснованность технических решений, а также хорошую графическую и иллюстративную поддержку материала. Студент показал высокий уровень самостоятельности, инженерной культуры и практической подготовки, умело сочетая теоретические знания и прикладные навыки.

Дипломный проект соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам бакалавров, и заслуживает оценки «отлично».

Научный руководитель:

Магистр технических наук,

старший преподаватель кафедры РТиТСА

 Ж.С. Бигалиева

«10» 06 2025 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект (работу)
Райбеков Жансултан

6B07111 - " Робототехника и мехатроника»

На тему: Разработка простого экзоскелета для поддержки движений локтевого сустава

Выполнено:

а) графическая часть на 29 листах
б) пояснительная записка на 34 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Дипломная работа посвящена актуальной и социально значимой теме разработки простого активного экзоскелета для поддержки движений локтевого сустава. Актуальность проекта обусловлена потребностью в доступных средствах реабилитации для пациентов, перенёсших инсульт или травмы верхних конечностей, особенно в условиях ограниченного доступа к дорогостоящему медицинскому оборудованию.

В теоретической части грамотно раскрыта биомеханика локтевого сустава, его функциональные особенности, а также представлены существующие решения в области реабилитационной робототехники. Студентом выполнен подробный анализ современных экзоскелетных систем, обоснован выбор одностепенного привода для выполнения базовых реабилитационных движений, а также рассмотрены конструктивные и функциональные преимущества волнового редуктора с промежуточными телами качения.

Практическая часть работы выполнена на высоком уровне. Автором проведена разработка 3D-модели устройства, произведён подбор компонентов и реализована система управления на основе Arduino Uno. Подробно описаны электрическая схема, алгоритм работы устройства и реализована схема подключения.

Проект завершён изготовлением рабочего макета, подтверждающего работоспособность и функциональность заявленной конструкции. Работа демонстрирует значимость предложенного технического решения и его потенциал для использования в доступных реабилитационных устройствах.

Работа выполнена грамотно, в полной мере отражает поставленные цели, а также демонстрирует способность студента применять инженерные знания для решения прикладных задач. Исправить блок-схему и показать схему подключения кнопки.

Оценка работы

В целом, дипломная работа выполнена на высоком уровне, обладает научной новизной, практической значимостью и демонстрирует высокий уровень подготовки выпускника.

Работа оценивается на 90 баллов.

Рецензент:

PhD, ассоциированный профессор,
директор Национальной нанотехнологической
лаборатории открытого типа,
НАО КазНУ им. аль-Фараби



Муратов М.М.

« 3 » июль 2025 г.



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Разработка простого экзоскелета для поддержки движений локтевого сустава

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Райбеков Жансултан ДосжанулыЖанар Бигалиева

Подразделение

ИАиИТ

Объем найденных подобиий

КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание!Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

25

Длина фразы для коэффициента подобия 2



КП2

8575

Количество слов



КЦ

70815

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв	Б	0
Интервалы	A→	0
Микропробелы	·	4
Белые знаки	Б	0
Парафразы (SmartMarks)	a	0

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://official.satbayev.university/download/document/33814/Computer%20Science%20B06102%202023-2024%20%D1%80%D1%83.pdf	12 0.14 %
2	https://official.satbayev.university/download/document/33814/Computer%20Science%20B06102%202023-2024%20%D1%80%D1%83.pdf	6 0.07 %

3	Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами 5/12/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	5 0.06 %
из базы данных RefBooks (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
из домашней базы данных (0.06 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	Разработка и проектирование волоконно-оптических гироскопов для дистанционного управления транспортными средствами 5/12/2025 Satbayev University (ИАиИТ)	5 (1) 0.06 %
из программы обмена базами данных (0.00 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
из интернета (0.21 %)		
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
1	https://official.satbayev.university/download/document/33814/Computer%20Science%206B06102%202023-2024%D1%80%D1%83.pdf	18 (2) 0.21 %

Список принятых фрагментов

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
	https://official.satbayev.university/download/do... ☒	18 (0.21%)
	Разработка и проектирование волоконно-оптических... ☒	5 (0.06%)