

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) - отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Система управления приводами суставов экзоскелета

УДК 004.896:62-8:616.728-089.843

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Веретехин Артем Валерьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Фадеев Александр Сергеевич	К.Т.Н, доцент		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Суханов Алексей Викторович	К.Х.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Концепция стартап-проекта»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Громова Татьяна Викторовна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Винокурова Галина Федоровна	К.Т.Н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Громаков Евгений Иванович	К.Т.Н., доцент		
Руководитель ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	К.Т.Н., доцент		

Томск – 2019 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

по направлению 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Обладать естественнонаучными и математическими знаниями для решения инженерных задач в области разработки, производства и эксплуатации систем управления техническими объектами и средств автоматизации.
P2	Обладать знаниями о передовом отечественном и зарубежном опыте в области управления техническими объектами с использованием вычислительной техники
P3	Применять полученные знания (P1 и P2) для формулирования и решения инженерных задач при проектировании, производстве и эксплуатации современных систем управления техническими объектами и их составляющих с использованием передовых научно-технических знаний, достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие методы анализа и синтеза систем управления, методы расчета средств автоматизации, уметь выбирать и использовать подходящее программное обеспечение, техническое оборудование, приборы и оснащение для автоматизации и управления техническими объектами.
P5	Уметь находить электронные и литературные источники информации для решения задач по управлению техническими объектами.
P6	Уметь планировать и проводить эксперименты, обрабатывать данные и проводить моделирование с использованием вычислительной техники, использовать их результаты для ведения инновационной инженерной деятельности в области

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
	управления техническими объектами.
P7	Демонстрировать компетенции, связанные с инженерной деятельностью в области научно-исследовательских работ, проектирования и эксплуатации систем управления и средств автоматизации на предприятиях и организациях – потенциальных работодателях, а также готовность следовать их корпоративной культуре
Универсальные компетенции	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации и управления техническими объектами, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам.
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Уровень образования Бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) - отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	<i>Основная часть</i>	75
	<i>Финансовый менеджмент</i>	15
	<i>Социальная ответственность</i>	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Фадеев Александр Сергеевич	К.Т.Н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Громаков Евгений Иванович	К.Т.Н., доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ) - отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Громаков Е. И.
 (Подпись) (дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Веретехин Артем Валерьевич

Тема работы:

Система управления приводами суставов экзоскелета
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования и проектирования является система управления поворотом исполнительных устройств (приводов), которая является частью экзоскелетного устройства для нижних конечностей. Время бесперебойной работы узла – не более 4 часов. Диапазон поворота устройства должен удовлетворять естественному движению коленного сустава человека. Одним из основных требований к устройству является его низкая себестоимость.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Исследованию подлежит техническая информация об известных аналогах среди реабилитационных экзоскелетов нижних конечностей, а также теоретические материалы, связанные с конструированием и принципами работы экзоскелетных устройств и систем управления рабочими органами, которые в них используются.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Функциональная схема разрабатываемой системы, схемы снятия мышечного сигнала, результаты математического моделирования в MATLAB, блок-схема алгоритма.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, и ресурсосбережение	Громова Татьяна Викторовна
Социальная ответственность	Винокурова Галина Федоровна
Нормоконтроль	Суханов Алексей Викторович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ ИШИТР	Фадеев Александр Сергеевич	К.Т.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Веретехин Артем Валерьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Веретехин Артем Валерьевич

Инженерная школа	Информационных технологий и робототехники	Направление	15.03.04. Автоматизация технологических процессов и производств
Уровень образования	Бакалавриат		

Перечень вопросов, подлежащих разработке:	
<i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)</i>	Устройство, позволяющее ребенку, который болен спинальной мышечной атрофией, тренировать ноги для частичного восполнения функций опорно-двигательного аппарата. Устройство также предназначено для реабилитации и терапии больных с нарушением работы опорно-двигательного аппарата.
<i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>	Патентное право
<i>Объем и емкость рынка</i>	Суммарный объем мирового рынка реабилитационных и абилитационных товаров по состоянию на 2016 год оценивается в 108,5 миллиардов долларов. Из них вспомогательные средства для инвалидов и лиц с нарушениями мобильности составляет 40,87 миллиардов долларов. Общий объем российского рынка вспомогательных средств реабилитации и абилитации составляет от 29,4 до 35 миллиардов рублей (0,5-1 % от мирового рынка). Прогнозируемый рост мирового рынка реабилитационных и абилитационных товаров в среднем по сегментам составляет 3,12 % в год. Таким образом, к 2020 году объем мирового рынка таких товаров можно оценить в 126,5 миллиардов долларов.
<i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>	Разработка устройств двунаправленного взаимодействия человека с роботизированными устройствами (управление с помощью биоэлектрических сигналов, в частности) является одним из перспективных направлений восстановительной медицины.
<i>Себестоимость продукта</i>	Себестоимость одной единицы продукта при реализации 12 устройств в год составит 166 тысяч рублей.

<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>	Конкурентоспособность системы определяется подходом к решению задачи (использования мышечных сигналов). Большинство существующих на рынке экзоскелетов используют либо другие технологии управления движением, либо имеют другие области применения.
<i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>	Обеспечена более низкая цена по сравнению с аналогами. Данный фактор можно считать как преимуществом, так и недостатком - снижение цены достигается за счет снижения функционала. Недостаток функционала может быть нивелирован методикой управления устройством.
<i>Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта</i>	Целевым сегментом потребителей являются частные лица, государственные и частные медицинские учреждения, поставщики медицинской техники.
<i>Бизнес-модель проекта</i>	Матрица Остервальдера
<i>Производственный план</i>	На данный момент для выхода проекта на рынок необходимо завершение следующих этапов: Доработка разработанных решений Сборка прототипа Испытание прототипа Организация производства для выпуска устройства
<i>План продаж</i>	В ближайший период после выхода проекта на рынок (около 1 года) планируется реализация устройства в количестве 1 экземпляра в месяц. Данное ограничение связано с ограниченностью рабочей силы и финансов на начальном этапе. По мере развития проекта данный показатель планируется постепенно увеличивать
Перечень графического материала:	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы (например, бизнес-модель)</i>	Матрица Остервальдера

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта» (со-руководитель ВКР):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ШИП	Громова Татьяна Викторовна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Веретехин Артем Валерьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т5Б	Веретехин Артем Валерьевич

Инженерная школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

Система управления приводами суставов экзоскелета

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является система, позволяющая на основании биоэлектрических мышечных сигналов управлять положением сервопривода. Применение системы возможно в таких областях как протезирование, разработка мехатронных и экзоскелетных систем.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования. – ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам. – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – ГОСТ 21889-76. Система «человек-машина». Кресло человека-оператора.
--	--

	Общие эргономические требования. – ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Отклонение показателей микроклимата – Превышение уровня шума – Недостаток освещенности – Физические и нервно-психические перегрузки – Возможность поражения электрическим током
3. Экологическая безопасность:	– Воздействия на гидросферу не происходит – Воздействие на атмосферу происходит вследствие выделения веществ в процессе пайки – Воздействие на литосферу происходит вследствие утилизации расходных материалов и отработанного оборудования
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Выброс химически и биологически-опасных веществ; – обрушение зданий; – пожар; – землетрясение; – ураган. Наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Винокурова Галина Федоровна	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т5Б	Веретехин Артем Валерьевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа выполнена на 84 с., содержит 57 рисунков, 12 таблиц, 31 источник, 1 приложение.

Ключевые слова: экзоскелет нижних конечностей, система управления приводами экзоскелета, сервопривод, фильтрация, электромиография.

Объектом исследования является система управления поворотом исполнительных устройств (приводов), которая является частью экзоскелетного устройства для нижних конечностей.

Цель работы – создание системы управления приводами суставов экзоскелета-тренажера, который позволяет обеспечивать движение нижних конечностей пациента в лежачем состоянии.

В процессе исследования проводились: снятие электрических мышечных сигналов, настройка связи между микроконтроллером и пакетом MATLAB, проводилась фильтрация сигнала (разработка, подбор параметров и калибровка фильтров) в пакете MATLAB, разработка программного обеспечения для управления исполнительным устройством.

В результате исследования разработана система, обеспечивающая поворот рабочего органа (конечности) экзоскелета на основании электрических сигналов человеческих мышц.

Область применения: реабилитационная медицина.

Разработанная система в перспективе может обеспечить снижение цены разрабатываемых экзоскелетных комплексов и повысить их доступность для населения.

В будущем планируется усовершенствование разработанной системы и использующихся в ней алгоритмов обработки сигнала и управления исполнительными устройствами.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

спинальная мышечная атрофия: Заболевание опорно-двигательного аппарата, протекающее с поражением двигательных нейронов передних рогов спинного мозга.

экзоскелет: Устройство, предназначенное для восполнения утраченных функций и/или увеличения силы мышц человека.

электромиография: Метод исследования и регистрации электрической активности мышц.

микроконтроллер: Программируемая микросхема, предназначенная для обработки информации, а также управления другими устройствами.

сервопривод: Механический привод с автоматической коррекцией состояния через внутреннюю отрицательную обратную связь, в соответствии с заданными параметрами.

фильтрация: Процесс удаления помех и выделения из сигнала полезной составляющей.

фильтр нижних частот: Фильтр, пропускающий частотный спектр сигнала ниже частоты среза и подавляющий частоты сигнала выше этой частоты.

В работе были использованы следующие обозначения и сокращения:

СМА – спинальная мышечная атрофия;

ЭМГ – электромиография;

ФНЧ – фильтр нижних частот;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика.

Содержание

Введение.....	15
1 Обзор аналогов в области экзоскелетов для больных с поражением опорно-двигательного аппарата.	18
1.1 ExoAtlet	18
1.2 ExoLite	19
1.3 ReWalk.....	21
1.4 REX.....	22
1.5 ATLAS 2020.....	23
1.6 HAL 3.....	24
1.7 RT300 - SUPINE	25
Выводы по главе 1	30
2 Проектирование системы управления приводами суставов экзоскелета.....	31
2.1 Общий принцип работы системы.....	31
2.2 Элементная база	31
2.2.1 Модуль регистрации мышечных сигналов	32
2.2.2 Микроконтроллер	36
2.2.3 Исполнительное устройство	38
2.3 Средства математического моделирования	39
Выводы по главе 2	40
3 Реализация системы управления приводами суставов экзоскелета .	41
3.1 Снятие и первичная обработка мышечного сигнала.....	41
3.2 Идентификация состояния мышечной группы	53
3.3 Программная реализация управления приводом при помощи полученного полезного сигнала.	58
4 Концепция стартап-проекта	60
4.1 Продукт	60
4.2 Анализ конкурентных преимуществ.....	61
4.3 Целевые аудитории.....	63

4.3.1 Медицинские учреждения	64
4.3.2 Фирмы-поставщики медицинской техники	64
4.3.3 Частные лица	65
4.4 Бизнес-модель проекта	65
Выводы по разделу «Концепция стартап-проекта»	67
5 Социальная ответственность.....	68
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	69
5.2 Производственная безопасность	70
5.2.1 Отклонение показателей микроклимата	71
5.2.2 Превышение уровня шума	72
5.2.3 Освещение	72
5.2.4 Психические и физические перегрузки	74
5.2.5 Электробезопасность.....	75
5.3 Экологическая безопасность	75
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	76
Вывод по разделу «Социальная ответственность».....	77
Заключение	79
Список литературы	80
Приложение А. Листинг программы управления сервоприводом	84

Введение

В настоящее время в восстановительной медицине одним из наиболее перспективных направлений является разработка комплексов двунаправленного взаимодействия человека с роботизированными устройствами, использующими принцип биометрического управления, основанный на использовании электрофизиологических сигналов человеческого тела [1]. В рамках данной области актуальной является задача разработки экзоскелетных устройств, направленных на терапию заболеваний опорно-двигательного аппарата и/или реабилитацию пациентов, имеющих данные заболевания по тем или иным причинам [2].

Особое место в списке заболеваний опорно-двигательного аппарата занимает спинальная мышечная атрофия. Спинальная мышечная атрофия (СМА) – аутосомно-рецессивное заболевание, характеризующееся дегенерацией α -мотонейронов в передних рогах спинного мозга, ведущей к прогрессирующей мышечной слабости, атрофии мышц, развитию деформаций позвоночника и суставов. Распространенность заболевания составляет 1 человек на 10 тысяч человек, среди новорожденных данная цифра отличается – 1 человек на 6 тысяч человек. Как показывает статистика, каждый пятидесятый человек является носителем гена, вызывающего данное заболевание [3, 4].

СМА является одной из наиболее частых причин детской смертности. При наиболее острых формах СМА у пациента затруднены некоторые рефлекторные действия, такие как глотание, кашель и дыхание, а также возможность самостоятельно сидеть и переворачиваться [4]. Другие формы СМА протекают более благоприятно, для них наиболее характерным фактором является мышечная слабость у пациента, причем в большей степени страдают нижние конечности. При этом по мере прогрессирования болезни атрофия мышц усиливается, может наблюдаться развитие мышечных и скелетных деформаций, контрактуры и сколиоз, пролежни [5].

В 2016 году в США было зарегистрировано первое поддерживающее лекарство от СМА, что в ближайшее время приведет к улучшению здоровья и качества жизни пациентов с СМА. Поэтому на первый план встают вопросы профилактики осложнений, которые ухудшают состояние больного и ведут к вторичным нарушениям работы всех органов и систем организма. Одной из основных профилактик является движение суставов и работа мышц с определенной амплитудой и постепенным увеличением объема нагрузок [3].

Данные факторы обуславливают необходимость создания комплексов механотерапии, действие которых было бы направлено непосредственно на терапию и предотвращение развития СМА у пациентов. Наибольший реабилитационный эффект дают устройства, в которых управление движением основано на использовании естественных физиологических процессов человеческого тела, а именно электрических потенциалов мышц [6]. Человек при этом делает осознанные действия, а также образуется обратная связь между мозгом и нижними конечностями. Методика, сочетая в себе использование мышечных сокращений и механической конструкции, воспроизводит естественный механизм движения нижних конечностей человека, что позволяет косвенно усилить эффект от терапии. Такой подход получил название HAL-терапии в честь экзоскелетного устройства Hybrid Assistive Limb (HAL), на основе которого он базируется [7].

В настоящее время весь ряд экзоскелетных реабилитационных устройств, согласно интернет источнику «Ваш гид в мире роботов и дронов в России и в мире. Новости и справочная информация» [8] ограничивается 17 образцами. При этом данные устройства либо имеют очень высокую стоимость (в среднем около 3 млн. рублей), что делает их недоступными для целевой аудитории, либо управляются при помощи внешних сигналов (манипуляторы, смартфон) или же вовсе не несут в себе возможности управления (движение происходит по заранее заданной траектории).

Целью работы является создание системы управления приводами суставов экзоскелета-тренажера, который обеспечивал бы движение нижних

конечностей пациента в лежачем состоянии и мог бы служить базой для HAL - терапии. Главным требованием к системе является ее низкая себестоимость.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучение теоретических материалов, связанных с конструированием экзоскелетов, снятием мышечных сигналов и управлением приводами.

2. Выполнение обзора зарубежных и отечественных аналогов реабилитационных экзоскелетов нижних конечностей.

3. Организация связи «MATLAB – Arduino» для реализации возможности снятия мышечного сигнала и его анализа встроенными средствами MATLAB, а также взаимодействия переменных модели с реальными механизмами (сервопривод).

4. Организация снятия и первичной обработки реальных значений мышечных сигналов для дальнейшего их использования в качестве управляющих воздействий на реальные исполнительные устройства экзоскелета.

5. Реализация управления исполнительным устройством на основе полученного сигнала.

1 Обзор аналогов в области экзоскелетов для больных с поражением опорно-двигательного аппарата.

В данной главе проводится обзор отечественных и мировых аналогов в области реабилитационных экзоскелетных комплексов. Рассмотрены технико-экономические характеристики данных устройств, их области применения и способы управления. Целью главы является выявление недостатков уже существующих экзоскелетных устройств и определение вектора разработки собственной системы.

1.1 ExoAtlet

ExoAtlet – российский медицинский экзоскелет, который предназначен для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями нижних конечностей, наступивших в результате травм или заболеваний опорно-двигательного аппарата и нервной системы. Основные сферы применения – восстановление нарушенных и компенсация утраченных функций опорно-двигательного аппарата. Данное устройство предназначено для использования пациентами, у которых частично или полностью обездвижена нижняя часть тела.

Система управления данного устройства доступна в двух вариантах:

- система с обратной связью, построенная на силомоментных и электромиографических датчиках;
- программное управление, основанное на заранее заданном алгоритме движения.

ExoAtlet позволяет пациентам ходить, садиться/вставать, спускаться по наклонным поверхностям без посторонней помощи. Вес конструкции составляет около 20 кг. Пользователь не ощущает веса, поскольку экзоскелет перемещает себя и пользователя со скоростью и шириной шага, подобранными индивидуально для каждого пациента. При этом имеется возможность регулировки данных параметров.

Данным устройством в настоящий момент оборудовано 27 медицинских учреждений по всей России. Основным недостатком устройства является его высокая стоимость – около 3,6 млн. рублей, что делает его приобретение частными лицами весьма проблематичным [9].

Характеристики:

- Вес конструкции: 20 кг.
- Вес пользователя: до 100 кг.
- Рост пользователя: от 1,6 до 1,9 м.
- Высота: 1,35 м.
- Ширина: 0,64 м.
- Время зарядки аккумулятора: 5 часов.
- Время работы: до 4 часов в режиме ходьбы.
- Допустимый угол наклона для ходьбы: от минус 10 до плюс 10 °.

Внешний вид устройства представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Экзоскелетное устройство ExoAtlet

1.2 ExoLite

ExoLite – это роботизированный ассистирующий экзоскелет, разработанный для людей с нарушениями опорно-двигательного аппарата и предназначенный для их реабилитации и социальной адаптации.

В экзоскелете реализовано ручное управление – все функции активируются при помощи джойстика.

Данное устройство позволяет пациентам ходить, вставать/садиться, стоять на одной ноге, передвигаться по наклонным поверхностям. Все вышеперечисленные действия не требуют применения опорных костылей. В устройстве реализована возможность регистрации параметров ходьбы, возможна также индивидуальная настройка размеров для каждого пациента. В процессе использования происходит улучшение работы опорно-двигательного аппарата, а также укрепление костей и суставов.

Цена ExoLite составляет 3,5 млн. рублей, что осложняет приобретение устройства частными лицами [10].

Технические характеристики:

- Вес конструкции: 50 кг.
- Вес пользователя: до 80 кг.
- Высота: 1,3 м.
- Ширина: 0,74 м.
- Напряжение встроенной аккумуляторной батареи: 16,5 В.
- Время непрерывного использования: (120 – 240) мин на 1 аккумуляторе.
- Количество аккумуляторов: (1 – 4) шт.
- Время полного заряда батареи: около 3 часов.
- Скорость передвижения: до 4-х км/ч.

Внешний вид устройства представлен на Рисунок 2.



Рисунок 2 – Экзоскелетное устройство ExoLite

1.3 ReWalk

ReWalk – бионический экзоскелет, разработанный для людей с параличом нижних конечностей.

Управляется данное устройство при помощи пульта дистанционного управления, который надет на запястье пациента и распознает его движения.

Устройство позволяет выполнять пациентам базовые действия такие как: ходьба, движение по наклонным поверхностям, удержание равновесия. Использование высокоемкостного аккумулятора обеспечивает высокую автономность устройства и позволяет использовать его в течение дня без необходимости каких-либо обслуживающих действий.

ReWalk способствует повышению плотности костей, а также улучшению функций опорно-двигательного аппарата.

Цена в 6,4 млн. рублей делает данное устройство труднодоступным для частных лиц [11,12].

Характеристики

- Вес конструкции: 25,0 кг.
- Вес пользователя: до 100 кг.
- Рост пользователя: от 1,6 до 1,9 м.
- Время зарядки аккумулятора: от 5 до 8 часов.
- Время работы: до 3-х часов непрерывной ходьбы.

Внешний вид устройства представлен на Рисунок 3.



Рисунок 3 – Экзоскелетное устройство ReWalk

1.4 REX

REX – это роботизированный реабилитационный экзоскелетный костюм, обеспечивающий людям с параличом нижних конечностей возможность стоять и ходить самостоятельно, без помощи костылей или ходунков.

Устройство может использоваться даже людьми с полным повреждением спинного мозга.

Все функции активируются при помощи встроенного джойстика. Управление осуществляется при помощи 27 бортовых микропроцессоров. За движение отвечают 10 высокоскоростных моторов с высоким крутящим моментом

Использование данного устройства позволяет повысить подвижность суставов, предотвратить дегенерацию мышечных и костных тканей.

REX обеспечивает пользователю полную свободу движений и позволяет выполнять следующие действия: вставание/приседание, ходьба назад, ходьба по различным наклонным поверхностям.

Цена REX составляет 9,5 млн. рублей. Данная цена делает устройство недоступным для приобретения частными лицами [12, 13].

Характеристики:

- Вес конструкции: 38 кг.
- Вес пользователя: до 100 кг.
- Рост пользователя: от 1,46 до 1,95 м.
- Высота: 1,35 м.
- Ширина: 0,64 м.
- Материал корпуса: композиты и различные сплавы металлов, пластмасса высшего класса.

Внешний вид устройства представлен на Рисунок 4



Рисунок 4 – Экзоскелетное устройство REX

1.5 ATLAS 2020

Экзоскелет ATLAS 2020 предназначен для детей, страдающих спинальной мышечной атрофией. Экзоскелет не просто поможет детям со спинальной мышечной атрофией ходить (в ряде случаев, дети смогут встать на ноги в первый раз), но и предотвратит сколиоз.

Устройство весит 26 килограмм. Экзоскелет корректируется, чтобы соответствовать области вокруг ног и туловища ребенка. Серия двигателей имитирует человеческие мускулы, давая пациенту необходимую силу, чтобы стоять в вертикальном положении и ходить. Аккумулятор позволяет устройству работать в течение 5 часов. Экзоскелет сделан из алюминия и титана. Его опции и функции можно варьировать для детей в возрасте от 3-х до 14-и лет. Ограничение по весу составляет 40 кг.

Интерфейс управления основан на обнаружении и использовании остаточного движения, а также на использовании джойстика [14, 15].

Внешний вид устройства представлен на Рисунок 5.



Рисунок 5 – Экзоскелетное устройство ATLAS 2020

Также экзоскелет имеет ограничение по росту от 1 до 1,5 м.

ATLAS 2020 отсутствует в открытой продаже, стоимость в открытых источниках также не публикуется.

1.6 HAL 3

HAL 3 – это экспериментальный экзоскелет, предназначенный для восстановления двигательной функции ног. Целевая аудитория – люди, страдающие двигательной дисфункцией, пожилые люди. Данный экзоскелет может использоваться как:

- средство усиления двигательной активности пациентов с поражением опорно-двигательного аппарата;
- средство реабилитации после травм спинного мозга, а также инсультов.

Система управления HAL 3 основана на применении электрических импульсов, вырабатываемых в мускулах, в качестве управляющих сигналов сервоприводов.

HAL 3 позволяет пользователю осуществлять ходьбу по различным поверхностям (в том числе и наклонным), вставание/приседание.

На базе устройства создана HAL-терапия – метод локомоторной терапии, результатом которого является восстановление навыков ходьбы пациента, наращивание мышечной массы, улучшение координации, а также косвенное улучшение работы некоторых органов (мочевой пузырь, кишечник) [16,17].

Заявленная производителем цена составляет 270 тыс. рублей. Однако устройство еще не поступило в открытую продажу, поэтому подтвердить эту информацию не представляется возможным.

Характеристики:

- Вес конструкции: 33 кг.
- Вес пользователя: до 80 кг.
- Рост пользователя: от 1,4 до 2 м.

- Высота: 1,6 м.
- Напряжение встроенной аккумуляторной батареи: 100 В.
- Время автономной работы: до 2,5 часов.
- Скорость передвижения: до 4-х км/ч.

Внешний вид устройства представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Экзоскелетное устройство HAL 3

1.7 RT300 - SUPINE

RT300-SUPINE – это профессиональный тренажер для комплексной тренировки нижних конечностей с функциональной электростимуляцией (ФЭС).

В экзоскелете реализовано ручное управление движением - все действия производятся при помощи встроенной панели управления.

При ФЭС применяются низкие уровни электрического тока для стимуляции определенных функций, потерянных при нарушениях нервной системы. Электростимуляция используется для периферических нервов, контролирующих специфические мышцы или группы мышц.

Использование данного устройства снижает последствия дефицита двигательной активности: отеки, одеревенелость суставов.

RT300-SUPINE производит базовые движения нижних конечностей в лежачем и сидячем состоянии [18,19,20].

Данное устройство не находится в открытой продаже, цена на него неизвестна.

Характеристики:

- Вес конструкции: 48 кг.
- Вес пользователя: до 200 кг.
- Рост пользователя: от 1,32 до 1,98 м.
- Высота: 1 м.
- Ширина: 0,49 м.
- Материал корпуса: алюминий, сталь, полистирол, полиуретан
- Подключение к сети: 230 В~, 5/60 Гц.
- Время автономной работы не ограничено.

Внешний вид устройства представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Экзоскелетное устройство RT300-Supine

Таблица 1 – Техничко-экономические характеристики отечественных и зарубежных экзоскелетных устройств

Аналог	Характер движения	Масса	Габаритные размеры	Цена	Материалы	Метод управления
ЕхoAtlet	Позволяет: Ходить. Садиться/Вставать. Двигаться по наклонным поверхностям. Равновесие поддерживается с помощью костылей.	20 кг	Рост пользователя: от 1,6 до 1,9 м Высота: 1,35 м Ширина: 0,64 м	1,5 млн. рублей	Неизвестно	Заранее заданный алгоритм движения Система обратной связи на силомоментных и ЭМГ-датчиках
ЕхoLite	Позволяет: Ходить. Вставать/Садиться. стоять на одной ноге. Двигаться по наклонным поверхностям. Действия не требуют использования костылей.	46 кг	Рост пользователя: от 1,55 – 1,85 до м Высота: 1,3 м Ширина: 0,74 м	3,5 млн. рублей	Неизвестно	Управление при помощи джойстика

Продолжение таблицы 1 - Технико-экономические характеристики отечественных и зарубежных экзоскелетных устройств

ReWalk	Позволяет: Ходить. Вставать/Садиться. стоять на одной ноге. Двигаться по наклонным поверхностям. Действия не требуют использования костылей.	25 кг	Рост пользователя: от 1,6 м до 1,9 м	6,4 млн. рублей	Неизвестно	Управление при помощи пульта на запястье, распознающего движения пользователя.
REX	Позволяет: Ходить. Вставать/Садиться. Передвигаться по наклонным поверхностям. Не требует костылей или иных средств для стабилизации.	38 кг	Рост пользователя: от 1,46 до 1,95 м Высота: 1,35 м Ширина: 0,64 м	9,5 млн. рублей	Композиты и различные сплавы металлов, пластмасса высшего класса	Управление при помощи джойстика или планшета

Продолжение таблицы 1 – Техничко-экономические характеристики отечественных и зарубежных экзоскелетных устройств

ATLAS 2030	Позволяет ходить пациентам со СМА.	26 кг	Рост пользователя: от 1 до 1,5 м Ширина: от 0,24 до 0,35 м	Неизвестно	Неизвестно	Управление при помощи джойстика. Управление на основе остаточного движения.
HAL 3	Производит базовые движения нижних конечностей в лежачем состоянии.	33 кг	Рост пользователя: от 1,4 до 2 м Высота: 1,6 м	270 тыс.руб.	Алюминий, пластик	Система с обратной связью управляемая на основе биоэлектрических мышечных сигналов.
RT300-SUPINE	Производит базовые движения нижних конечностей, одновременно проводя функциональную электростимуляцию мускульной системы.	48 кг	Рост пользователя: от 1,32 до 1,98 м Высота: 1 м Ширина: 0,49 м	Неизвестно	Алюминий, сталь, полистирол, полиуретан	Контроль движений через панель управления.

Выводы по главе 1

В настоящей главе был проведен сравнительный анализ самых известных из существующих на данный момент экзоскелетных комплексов. Анализ показал, что все представленные образцы обеспечивают довольно высокую мобильность и свободу движения пациентов. Однако большинство из этих устройств (кроме HAL 3 и EхоAtlet) не могут служить базой для HAL-терапии. Кроме того почти все устройства, информация о которых находится в открытом доступе обладают достаточно высокой ценой (кроме HAL 3), что делает их труднодоступными для частных лиц. Из представленных устройств только HAL 3 сочетает в себе доступность и возможность использования как средства HAL-терапии, однако данный комплекс не находится в открытой продаже, а поэтому информацию о его стоимости нельзя считать достоверной.

Учитывая все вышесказанное, при разработке системы управления приводами необходимо стремиться по возможности достичь максимально низкой стоимости системы. Немаловажной задачей при этом является достижение оптимального соотношения цены и ключевых параметров при подборе элементной базы, а именно:

- цена/производительность для микроконтроллера;
- цена/точность измерения для датчиков.

2 Проектирование системы управления приводами суставов экзоскелета

В данной главе рассматривается проектирование системы управления приводами суставов экзоскелета: приводится общий принцип работы системы, проводится обзор методик снятия мышечных сигналов, производится и обосновывается выбор элементной базы и программного обеспечения.

2.1 Общий принцип работы системы

Как было сказано выше наибольшим реабилитационным эффектом обладают устройства, в которых человек имеет возможность управлять движением при помощи собственных мышечных сокращений (HAL-терапия).

Общий принцип работы системы управления приводами заключается в следующем: человек в зависимости от того, какое движение он хочет совершить, задействует определенную группу мышц, биоэлектрические потенциалы мышц снимаются при помощи измерительного модуля и передаются в микроконтроллер, который производит первичную обработку сигнала (фильтрация, преобразование к форме удобной для управления исполнительным устройством) и на основании полученного полезного сигнала производит управление исполнительным устройством. Функциональная схема устройства представлена на рисунке 8.

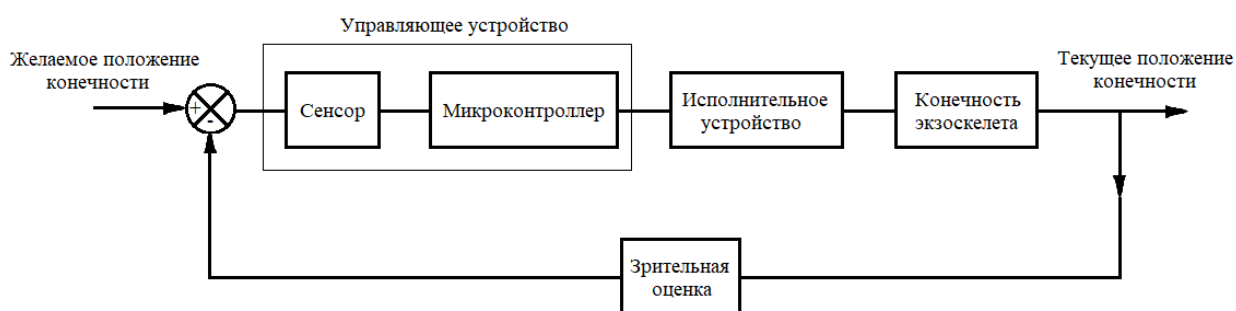


Рисунок 8 – Функциональная схема работы системы управления приводами

2.2 Элементная база

Как было сказано в предыдущей главе, в разрабатываемой системе необходимо соблюдать оптимальное соотношение между ключевыми параметрами элементов и их ценой. К данным соотношениям относится:

- цена/производительность для микроконтроллера;
- цена/точность измерения для датчиков.

Именно с учетом данных условий был проведен выбор всех элементов системы.

2.2.1 Модуль регистрации мышечных сигналов

2.2.1.1 Способы регистрации мышечных сигналов

Для снятия электрических сигналов было решено применять электромиографический сенсор. Метод электромиографии позволяет оценивать функциональное состояние мышечных тканей при помощи регистрации мышечных биопотенциалов в состоянии покоя и напряжения.

Снятие ЭМГ-сигнала может быть произведено:

- инвазивным путем - введением электродов непосредственно в мышцу. Введение электрода дает преимущество в точности полученного сигнала. Однако введение электрода может быть болезненным и требует стерильных условий для предотвращения инфекции, что делает применение данного метода весьма непрактичным для повседневного использования;
- неинвазивным путем – размещение электродов на коже в области необходимой мышцы. Поверхностные электроды легко наносятся на кожу и удаляются без травм. Данный метод также не лишен недостатков. Минусом возможность снятия ЭМГ-сигнала только с поверхностных мышц и более низкая по сравнению с инвазивным методом точность. Эти ограничения не являются запретительными и обычно перевешиваются преимуществами неинвазивности, но их следует учитывать при размышлениях о размещении электродов и анализе данных.

Выбор был сделан в пользу неинвазивного метода, так как недостатки данного метода нивелируются его практичностью, простотой использования, отсутствием особых требований к медицинской квалификации пользователя.

Размещение ЭМГ-электродов может быть выполнено в трех разных конфигурациях: монополярной, биполярной и многополярной.

Монополярная конфигурация реализована с использованием только одного электрода на коже относительно опорного электрода, подключенного к электрически нейтральной части тела, например костной части локтя, голени или предплечья. Этот метод используется из-за его простоты, но строго не рекомендуется, поскольку он обнаруживает все электрические сигналы в непосредственной близости от поверхности обнаружения. Схема подключения электродов в монополярной конфигурации представлена на рисунке 9.

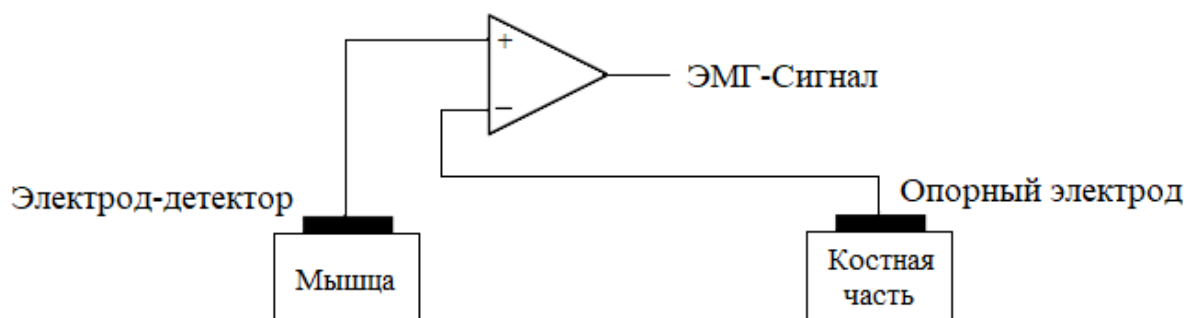


Рисунок 9 – Схема подключения электродов в монополярной конфигурации

Многополярная конфигурация использует более двух детектирующих поверхностей для получения сигнала ЭМГ с помощью электрода сравнения. Сигналы от трех или более поверхностей обнаружения ЭМГ, расположенных на расстоянии от 1 до 2 см друг от друга, проходят более двух этапов дифференциального усиления. Например, если используются три обнаруживающие поверхности, то применяется метод двойного дифференциала. Для поставленной задачи использование данной конфигурации нецелесообразно, так как она направлена на более глубокие и комплексные медицинские исследования, проводимые для изучения ориентации мышечных волокон, скорости проводимости и локализации моторных точек.

Более популярной конфигурацией записи является биполярная ЭМГ или одnodифференциальная ЭМГ. Два поверхностных электрода расположены на коже над мышцей на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга. Один из электродов при этом находится в активной зоне сокращения, а другой слегка смещен от центра мышцы. Сигналы, записанные в двух точках, вычитаются, их разница усиливается, в результате чего сигналы, которые могут возникнуть от

мышц за пределами места записи, в значительной степени исключаются, и регистрируются преимущественно локальные изменения в активности. Таким образом, эта конфигурация нивелирует проблему перекрестных помех и шума. Схема подключения электродов в биполярной конфигурации представлена на рисунке 10.

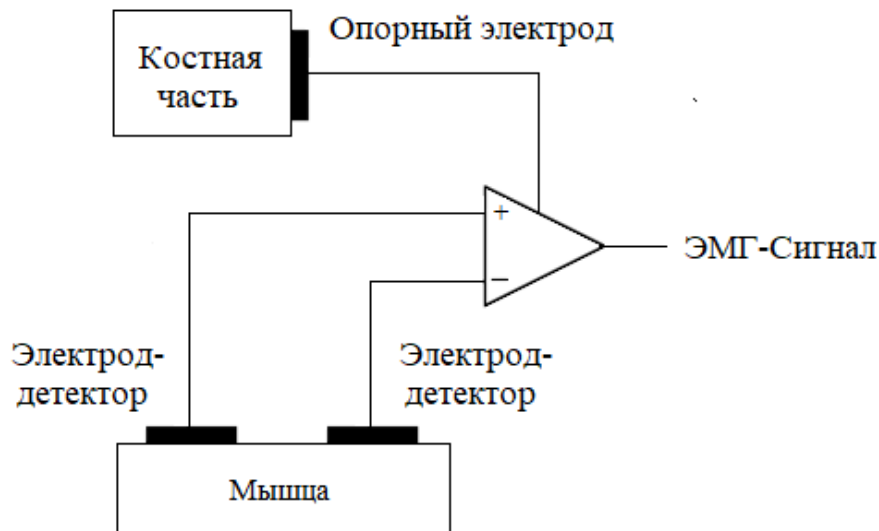


Рисунок 10 – Схема подключения электродов в биполярной конфигурации

С помощью биполярной поверхностной ЭМГ можно определить несколько показателей мышечной активности.

Одним из них является временной момент напряжения и расслабления мышц. Большинство мышц проявляют очень небольшую активность в состоянии покоя. При напряжении наблюдается заметное увеличение появления электрических импульсов. Когда мышцы расслабляются, эти импульсы исчезают, и регистрируется только базовый шум. Время активности мышц может быть соотнесено с другими показателями.

Другим показателем является сила или усилие, прилагаемое во время сокращения. Когда субъект увеличивает силу сжатия, можно наблюдать увеличение, как частоты электрических импульсов, так и амплитуды сигнала.

Эти изменения обусловлены двумя факторами:

- более высокая частота сокращения в уже активных моторных единицах;
- включение дополнительных моторных единиц.

С увеличением силы сжатия все больше моторных единиц начинают производить сокращения, их активность суммируется и способствует увеличению частоты и амплитуды [21,22,23].

2.2.1.2 Выбор датчика электромиографии

В качестве ЭМГ-датчика был выбран модуль Advancer Technologies Muscle Sensor v3. Данный модуль работает в связке с 3 поверхностными (неинвазивными) электродами, размещающимися в соответствии с биполярной конфигурацией. Проходя через данный модуль, ЭМГ-сигнал претерпевает некоторые изменения (происходит сглаживание и выпрямление). Выходной сигнал может быть легко считан микроконтроллером. Для работы модуля необходимо две 9-вольтовых батареи.

Преимущества модуля:

- Компактный размер.
- Совместимость с микроконтроллерами и монтажными платами.
- Настройка усиления.

Технические характеристики и особенности [24]:

- Размер: 2,5х2,5 см.
- Диаметр электродной площадки: 52 мм.
- Длина кабеля: 2 фута.
- Вес: 30 г.
- Напряжение питания: 3.5-18 В.
- Выходное напряжение: $0-V_s$ В, где V_s -напряжение источника

питания.

Внешний вид модуля и схема подключения представлены на рисунках 11, 12 соответственно.



Рисунок 11 – Внешний вид модуля Advancer Technologies Muscle Sensor v3

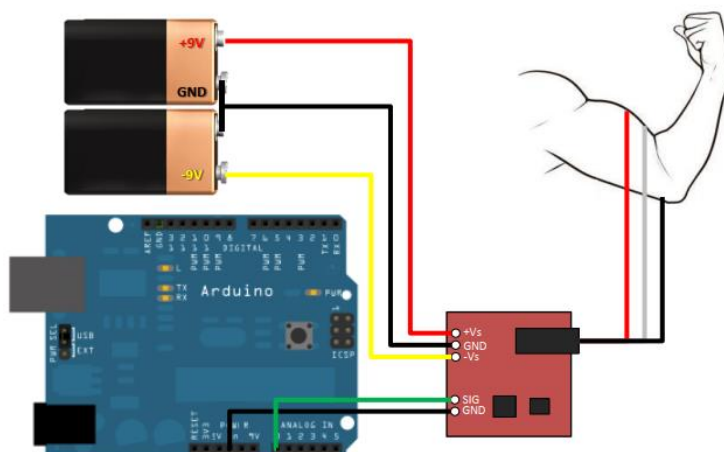


Рисунок 12 – Схема снятия мышечных сигналов

2.2.2 Микроконтроллер

В качестве микроконтроллера было решено выбирать устройства из линейки Arduino. Выбор этой линейки обоснован несколькими факторами:

- Доступность устройств на рынке.
- Открытость платформы (возможность использования в связке с пакетами математического моделирования).
- Наличие справочной документации и проектов в открытом доступе.
- Невысокая цена.

Изначально выбор пал на плату Arduino Uno, однако в процессе работы выяснилось, что данная плата не обладает необходимым количеством внутренней памяти для обработки сигнала, снятого с мышц.

Именно поэтому была выбрана расширенная версия платы Arduino Uno - Arduino Mega 2560, построенная на микроконтроллере. Плата обладает достаточным количеством внутренней памяти для обработки сигнала. Внешний

вид Arduino Mega 2560 представлен на рисунке 13. Основные технические характеристики приведены в таблице 2 [25].



Рисунок 13 – Внешний вид микроконтроллера Arduino Mega 2560

Таблица 2 - Технические характеристики Arduino Mega 2560

Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение	(7 – 12) В
Предельное входное напряжение	(6 – 20) В
Цифровые входы/выходы	54 (15 могут использоваться в качестве ШИМ выходов)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через входы/выходы	20 мА
Постоянный ток через вывод 3.3 В	50 мА
Флэш-память	256 Кбайт (8 Кбайт используются загрузчиком)
Оперативная память SRAM	8 Кбайт
Энергонезависимая память EEPROM	4 Кбайт
Длина	101,52 мм
Ширина	53.3 мм
Вес	37 г

2.2.3 Исполнительное устройство

В качестве исполнительного устройства было решено использовать сервопривод. Выбор обоснован надежностью данного класса устройств, а также возможностью довольно точного управления положением вала сервопривода. Кроме того, сервоприводом является любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т.п.) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике и устройстве согласно заданному внешнему значению. Это означает, что при интегрировании системы в уже существующие экзоскелетные устройства, перед производителем будет стоять только задача модификации задействованных приводов, без необходимости подбора новых комплектующих.

На данном этапе для работы был выбран сервопривод Tower Pro MG995. Серводвигатель MG995 поставляется с проводом длиной 30 см и 3-мя 'S' контактами типа мама. Выходной вал сервопривода поворачивается на 120 градусов (60 градусов в каждом направлении). Для управления MG995 можно использовать любые контроллеры с питанием логики 5 В, в том числе и Arduino. MG995 изготавливается в пластиковом корпусе. На выходе стоит редуктор с металлическими шестернями. В комплекте поставляются пластиковые качалки различных форм-факторов [26].

Внешний вид серводвигателя TowerPro MG995 представлен на рисунке 15.



Рисунок 14 – Внешний вид сервопривода TowerPro MG995

Технические характеристики MG995:

- 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/60° (при 4.8 В), 0.16 с/60° (при 6 В).
- Рабочее питание: от 4.8 до 7.2 В.
- Ширина мертвой зоны: 5 мкс.
- Диапазон рабочих температур: от 0 до 55 °С.

2.3 Средства математического моделирования

Специфика и цель работы (разработка системы управления на основе мышечных сигналов) предполагали возможную необходимость моделирования процессов, законов управления, моделирования алгоритмов цифровой обработки. Разработка алгоритмов цифровой фильтрации является довольно сложной процедурой, связанной с анализом первичного сигнала и калибровкой уже разработанных алгоритмов. Использование стандартных сред программирования микроконтроллеров основанных на текстовых языках программирования делает данную процедуру очень трудоемкой. В связи с этим было решено использовать пакет математического моделирования MATLAB. MATLAB обладает мощными встроенными утилитами анализа сигналов (Signal Analyzer), средствами имитационного моделирования (Simulink), средствами цифровой обработки сигналов (Signal Processing Toolbox). Достоинствами данного пакета являются:

- возможность простой модификации программы и наращивание ее функциональной развитости;
- наличие пакетов расширения, позволяющих работать с различными платформами;
- переносимость программного обеспечения между различными платформами за счет наличия встроенного генератора С-кода;

- возможность создания программ в графическом виде;
- возможность создания пользовательских функций.

Для связи Arduino Mega2560 и MATLAB, а также генерирования кода для микроконтроллера используется пакет расширения Simulink Support Package for Arduino Hardware. Данный пакет добавляет Simulink-библиотеку, функциональные блоки которой предоставляют MATLAB полный доступ ко всем возможностям микроконтроллеров производства Arduino.

Выводы по главе 2

В настоящей главе был описан принцип работы системы управления приводами суставов экзоскелета, а также была представлена ее функциональная схема. В рамках данной главы произведен и обоснован выбор элементной базы (микроконтроллер, датчик регистрации мышечных сигналов, исполнительное устройство) и программного обеспечения (пакет математического моделирования MATLAB) проекта. Все подобранные компоненты подобраны с целью максимальной минимизации стоимости разрабатываемой системы.

3 Реализация системы управления приводами суставов экзоскелета

В данной главе подробно описывается процесс разработки системы управления приводами суставов экзоскелета: поэтапно описываются задачи, выполненные во время разработки, а также методики и средства примененные при реализации системы.

3.1 Снятие и первичная обработка мышечного сигнала

В качестве первого шага было решено проверить возможность управления сервоприводом при помощи констант Simulink-модели. Ключевым блоком является блок Slider Gain, позволяющий задавать положение сервопривода прямо из Simulink-модели в режиме реального времени. Непосредственно приводом управляет блок Standard Servo Write, находящийся во вложенной подсистеме. Simulink-модель и блок Standard Servo Write представлены на рисунках 16 и 17 соответственно.

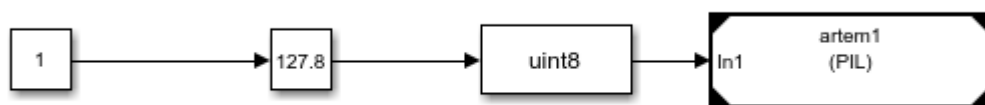


Рисунок 15 – Модель управления сервоприводом

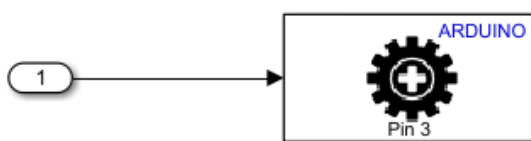


Рисунок 16 – Блок Standard Servo Write

Далее работа производилась непосредственно с ЭМГ-сигналом, его снятием и первичной обработкой. На данном этапе реальные исполнительные устройства практически не затрагивались.

Для снятия мышечного сигнала была создана Simulink-модель, реализующая считывание значение аналогового входа платы Arduino Mega, к которому подключен сенсор. Считывание сигнала происходило с периодом дискретизации $T_d = 0.001$ с. Simulink-модель представлена на рисунке 18.



Рисунок 17 – Модель для снятия ЭМГ-сигнала
Полученный ЭМГ-сигнал представлен на рисунке 19.

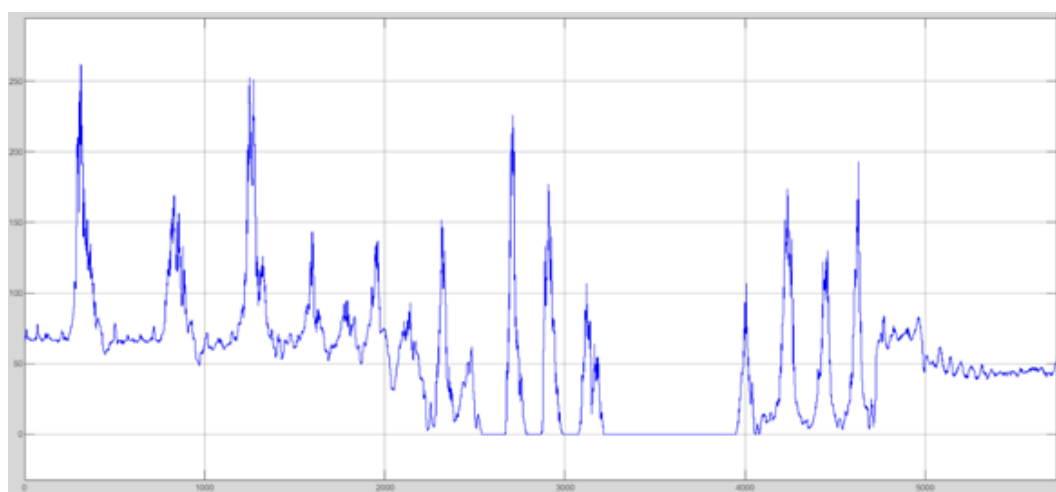


Рисунок 18 – Полученный ЭМГ-сигнал

После того как было организовано снятие мышечного сигнала, обнаружилось, что получаемый с сенсоров сигнал сильно зашумлен и без обработки невозможно использовать его для управления исполнительными устройствами. Поэтому одной из ключевых задач при разработке системы была определена фильтрация мышечного сигнала. Основной целью фильтрации сигнала является удаление помех, выделение из сигнала полезной составляющей.

Для более глубокого анализа было решено использовать встроенную в MATLAB утилиту Signal Analyzer. Решение обосновано наличием в Signal Analyzer большого количества мощных инструментов анализа и обработки сигналов.

Signal Analyzer может использовать для анализа сигнала данные из области Workspace пакета MATLAB. Поэтому первым шагом стало получение выборки ЭМГ-сигнала и ее импорта в область Workspace. В пакете Simulink

данные действия позволяет выполнить стандартный блок To Workspace. Модель представлена на рисунке 20.

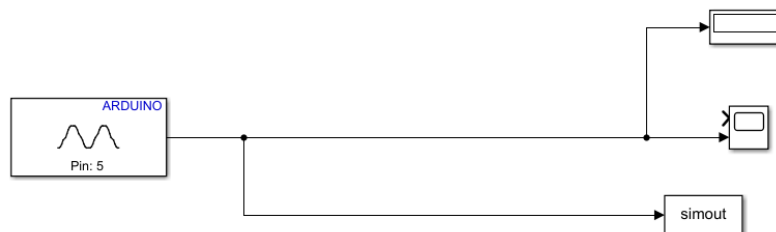


Рисунок 19 – Модель для создания в Workspace набора данных

С помощью Workspace-данных в Signal Analyzer был сформирован сигнал, аналогичный полученному экспериментально при помощи ЭМГ-датчика. Также получен спектр данного сигнала. Результаты показаны на рисунке 21.

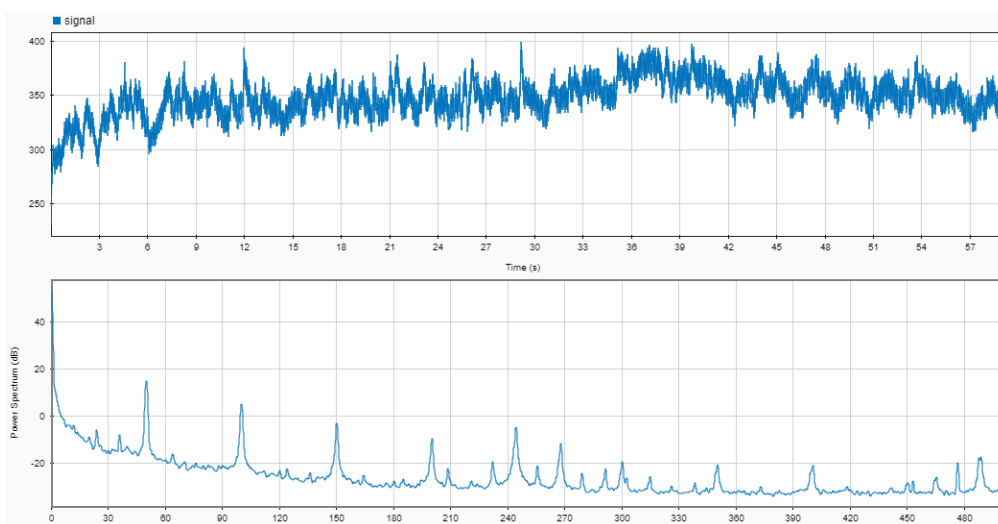


Рисунок 20 – ЭМГ-сигнал и его спектр

Анализ спектра показал присутствие нескольких частотных составляющих в полученном с датчика сигнале. Было замечено наличие в спектре частоты приблизительно равной 50 Гц и нескольких кратных ей частот. Появление данных составляющих обусловлено наводками сети. Основной гармоникой сигнала является частота, приблизительно составляющая 0.1 Гц. Все остальные частотные составляющие вносят помехи и должны быть подавлены.

Для решения данной задачи было принято решение использовать фильтр нижних частот (ФНЧ). Данный фильтр пропускает частотный спектр сигнала ниже частоты среза, но подавляет все остальные частоты.

В Signal Analyzer было промоделировано применение фильтра с частотой среза 0.1 Гц и затуханием в полосе подавления равным 60 дБ. Сигнал и его спектр после фильтрации представлены на рисунках 22 и 23 соответственно.

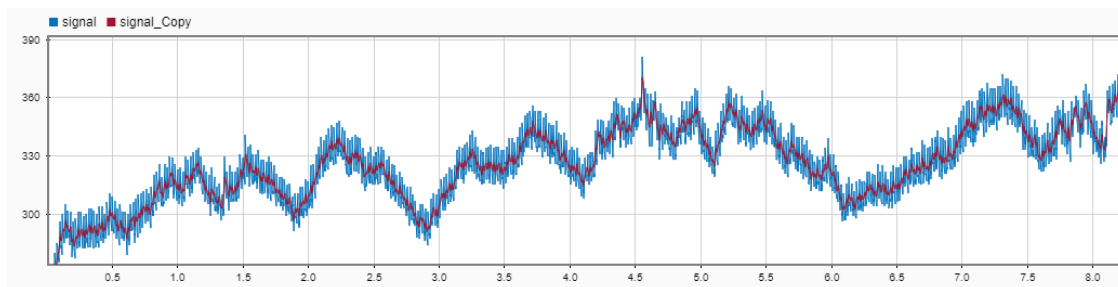


Рисунок 21 – Сигнал после фильтрации

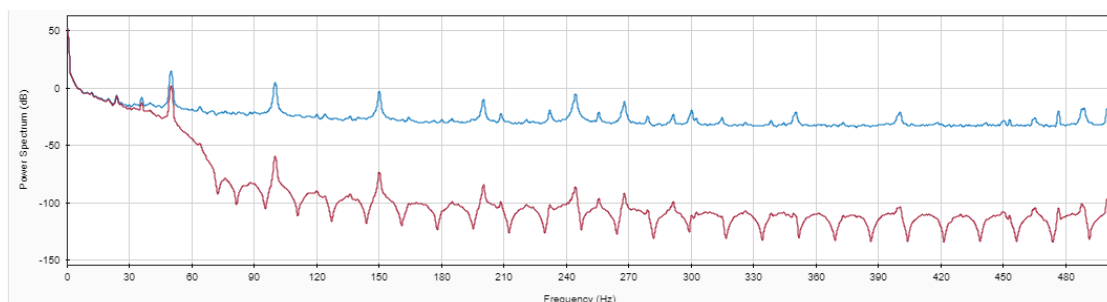


Рисунок 22 – Спектр сигнала после фильтрации

На рисунках 22 и 23 представлено подавление ФНЧ частот выше частоты среза. Также показано значительное сглаживание сигнала. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности использования ФНЧ в рамках системы первичной обработки сигнала.

Для создания ФНЧ в Simulink-модели необходимо использовать блок Digital Filter Design. Внешний вид блока и его интерфейс показаны на рисунках 24, 25 соответственно.

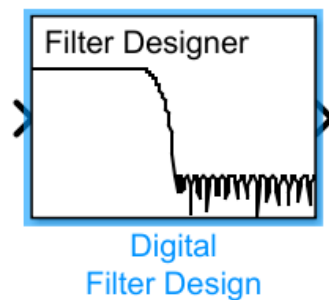


Рисунок 23 – Внешний вид блока Digital Filter Design

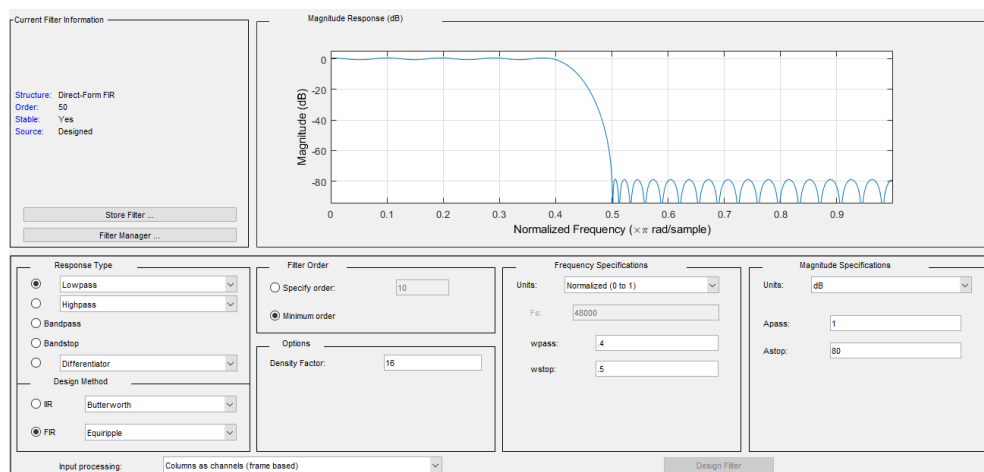


Рисунок 24 – Интерфейс блока Digital Filter Design

Блок Digital Filter Design содержит в себе не только возможность моделирования различных типов фильтров и подбора их параметров, но и информационные окна, показывающие такие характеристики фильтра, как АЧХ, ФЧХ, график групповой задержки (время задержки между входом и выходом фильтра, выраженное в количестве периодов дискретизации).

Вариативность параметров фильтра ограничивается возможностями аппаратного обеспечения. Это значит, что в Simulink-модели невозможно создать фильтр аналогичный фильтру из утилиты Signal Analyzer. При малой частоте среза значительно вырастает порядок фильтра, что приводит к большой задержке при обработке сигнала. При решении поставленной задачи большие временные задержки недопустимы, поэтому необходимо подбирать такие параметры фильтра, при которых будет соблюдаться оптимальный баланс между степенью фильтрации и скоростью обработки сигнала.

Было решено проводить моделирование ФНЧ Баттерворта с бесконечной импульсной характеристикой.

Ниже представлены несколько вариантов смоделированных ФНЧ.

1. Конец полосы пропускания $F_{pass} = 1$ Гц, начало полосы подавления $F_{stop} = 2$ Гц; значение пульсации в полосе пропускания $A_{pass} = 1$ дБ, затухание в полосе подавления $A_{stop} = 80$ дБ.

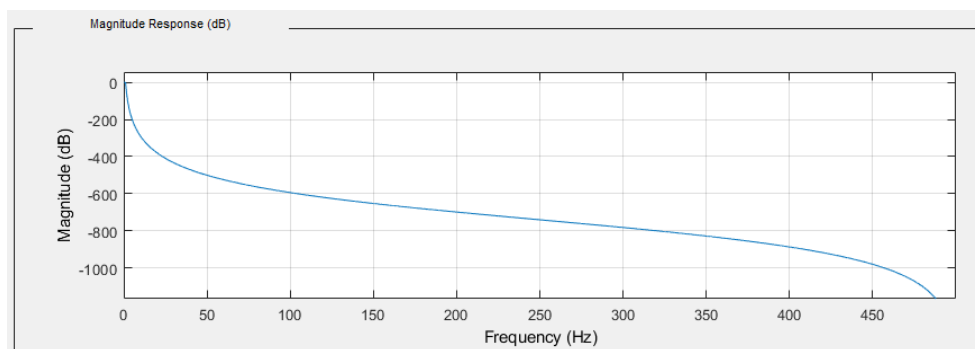


Рисунок 25 - АЧХ полученного фильтра

Structure: Direct-Form II, Second-Order Sections
Order: 15
Sections: 8
Stable: Yes
Source: Designed

Рисунок 26 – Информационное окно блока Digital Filter Design

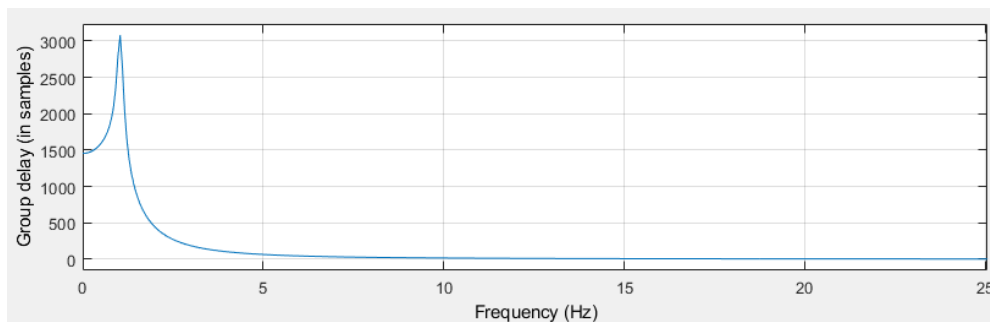


Рисунок 27 - График групповой задержки (значение запаздывания в количестве периодов дискретизации).

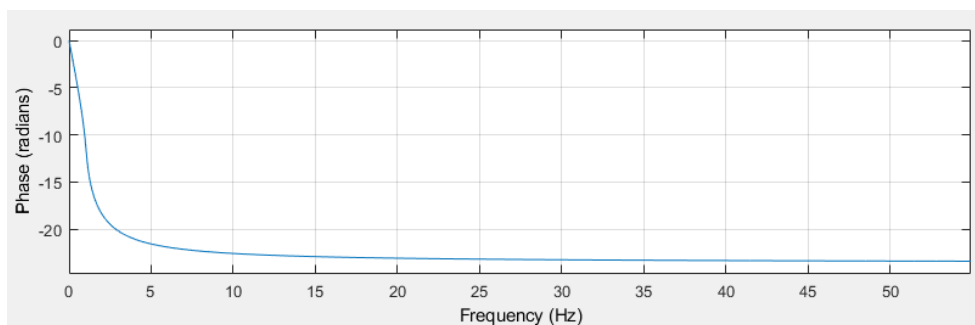


Рисунок 28 - ФЧХ фильтра

Полученный фильтр имеет 15 порядок и как представлено на графиках ФЧХ и групповой задержки дает сильное запаздывание по времени (около 3 секунд). Поэтому было решено продолжить моделирование.

2. Конец полосы пропускания $F_{pass} = 1$ Гц, начало полосы подавления $F_{stop} = 5$ Гц; значение пульсации в полосе пропускания $A_{pass} = 1$ дБ, затухание в полосе подавления $A_{stop} = 80$ дБ.

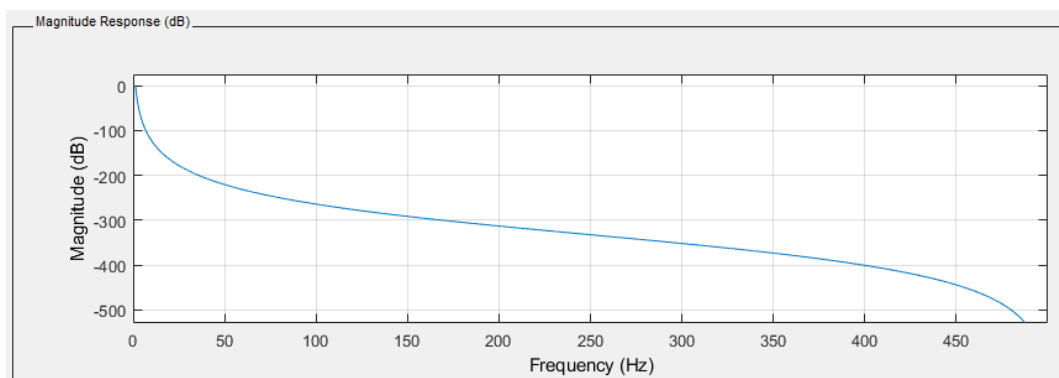


Рисунок 29 - АЧХ фильтра

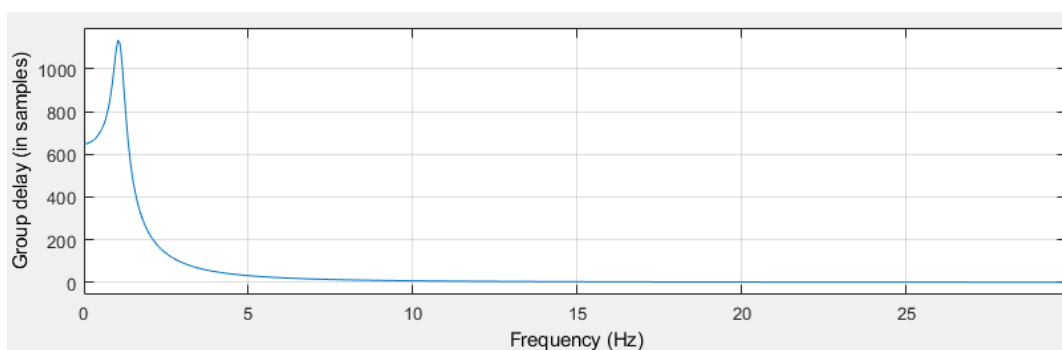


Рисунок 30 – График групповой задержки фильтра

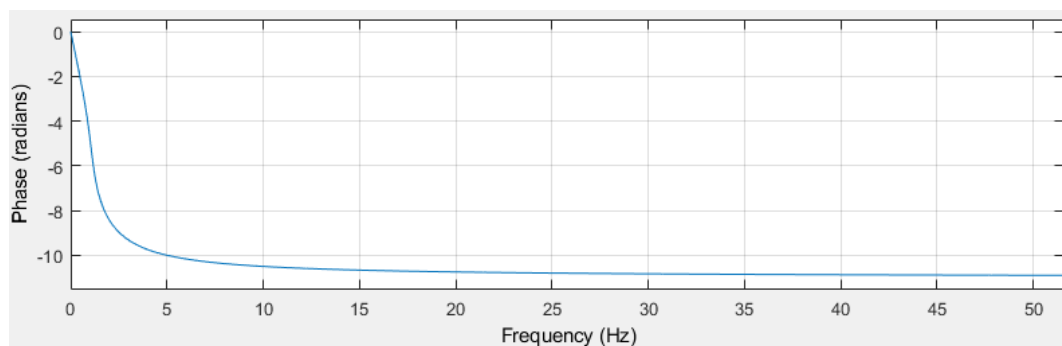


Рисунок 31 - ФЧХ фильтра

Полученный фильтр имеет 7 порядок. По полученным графикам ФЧХ и групповой задержки наблюдается уменьшение запаздывания (в данном случае оно составляет около 1 секунды). Вид исходного сигнала и полученного после

фильтрации можно наблюдать на рисунке 33. Однако результат все еще нельзя считать удовлетворительным, поэтому необходимо проводить дальнейшее моделирование ФНЧ.

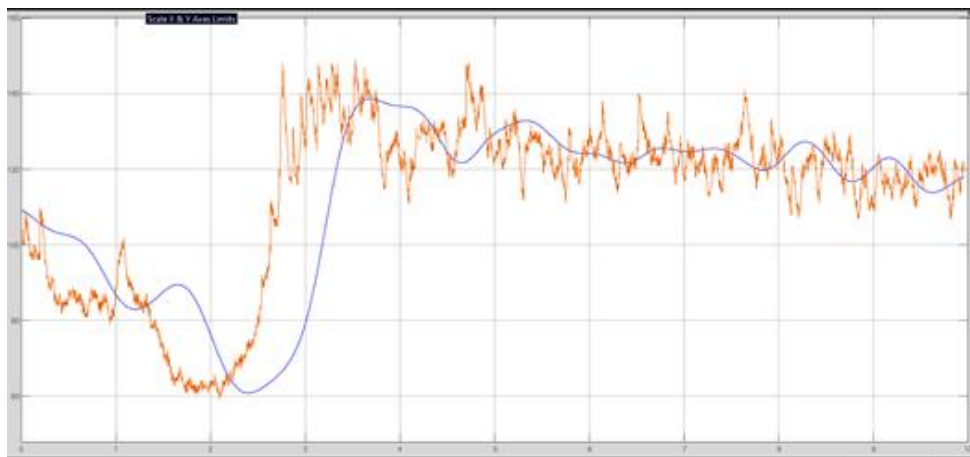


Рисунок 32 – Результат фильтрации сигнала

3. Конец полосы пропускания $F_{pass} = 10$ Гц, начало полосы подавления $F_{stop} = 40$ Гц; значение пульсации в полосе пропускания $A_{pass} = 1$ дБ, затухание в полосе подавления $A_{stop} = 80$ дБ.

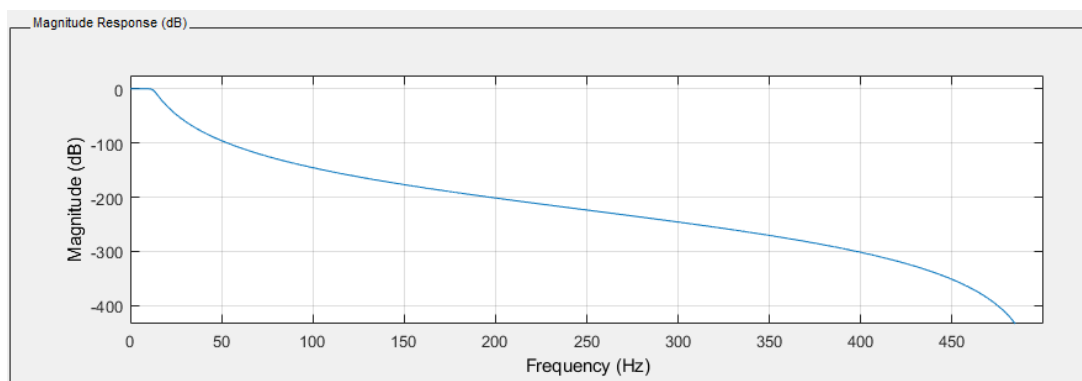


Рисунок 33 – АЧХ фильтра

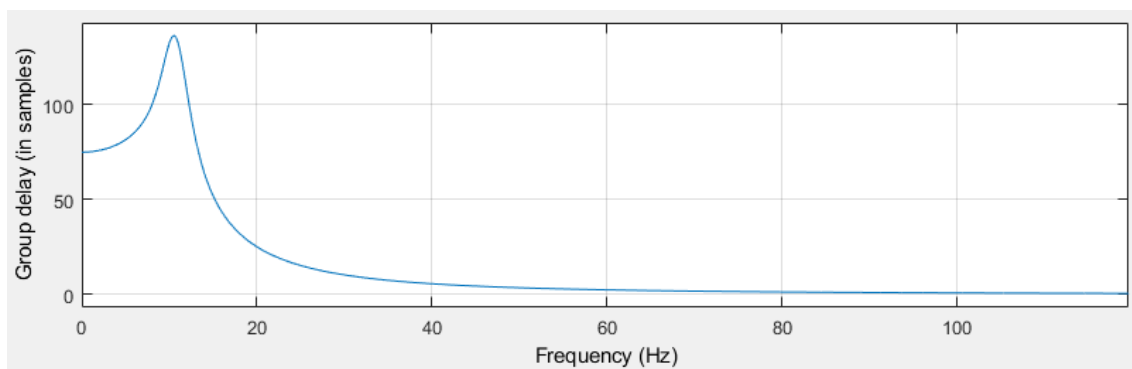


Рисунок 34 – График групповой задержки

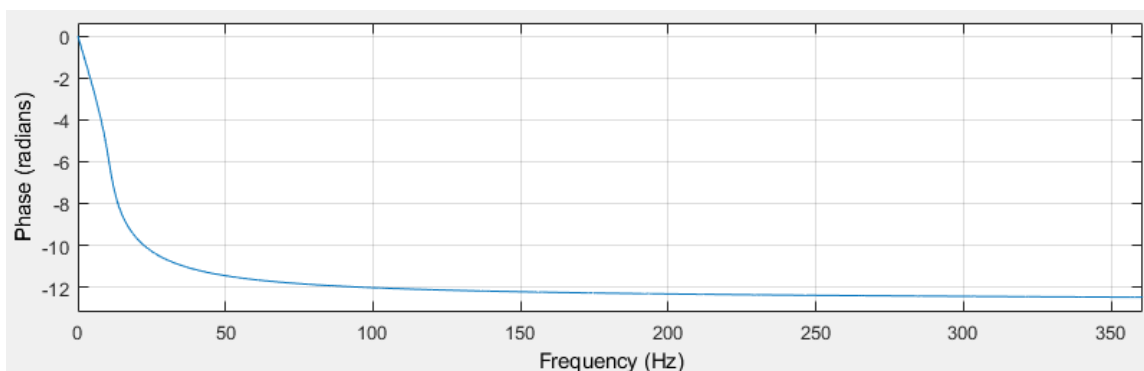


Рисунок 35 – ФЧХ фильтра

Полученный фильтр имеет 8 порядок. Исходя из графиков ФЧХ и групповой задержки, можно утверждать о значительном улучшении показателей быстродействия, задержка составляет 0,13 с. Несколько увеличить быстродействие можно изменив значения затухания, что и было сделано далее.

4. Конец полосы пропускания $F_{pass} = 10$ Гц, начало полосы подавления $F_{stop} = 40$ Гц; значение пульсации в полосе пропускания $A_{pass} = 1$ дБ, затухание в полосе подавления $A_{stop} = 70$ дБ.

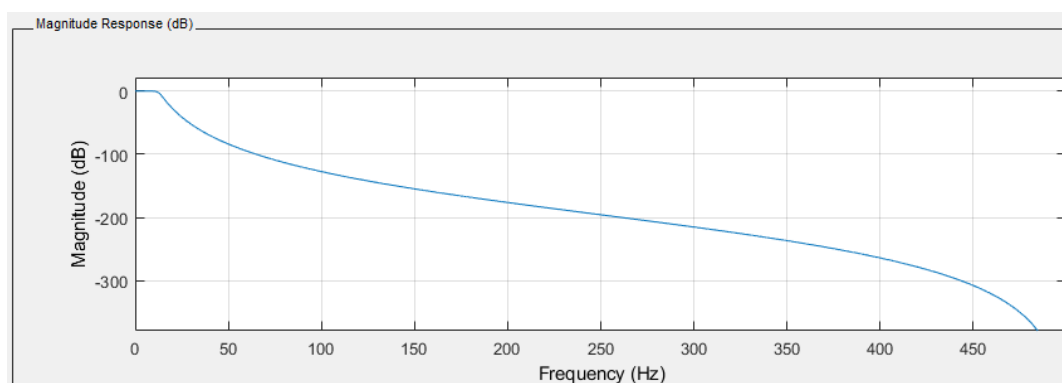


Рисунок 36 – АЧХ фильтра

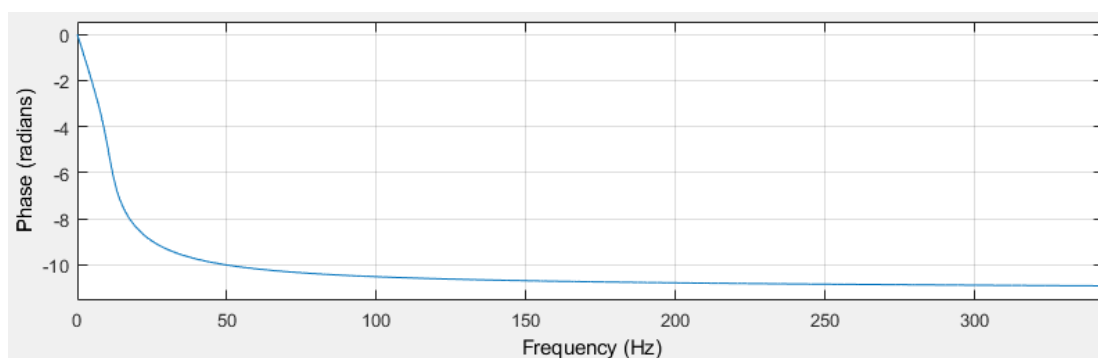


Рисунок 37 – ФЧХ фильтра

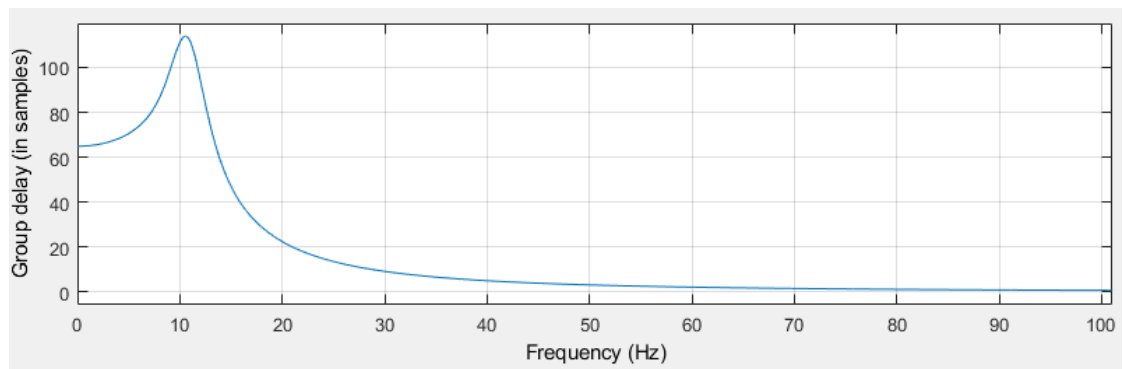


Рисунок 38 - График групповой задержки

Полученный фильтр имеет 7 порядок. Временную задержку удалось сократить до 0,11 с. Данное значения можно считать удовлетворяющим условиям задачи, поэтому в дальнейшем процессе обработки сигнала будет использоваться именно этот фильтр. Структура данного фильтра представлена на рисунке 40.

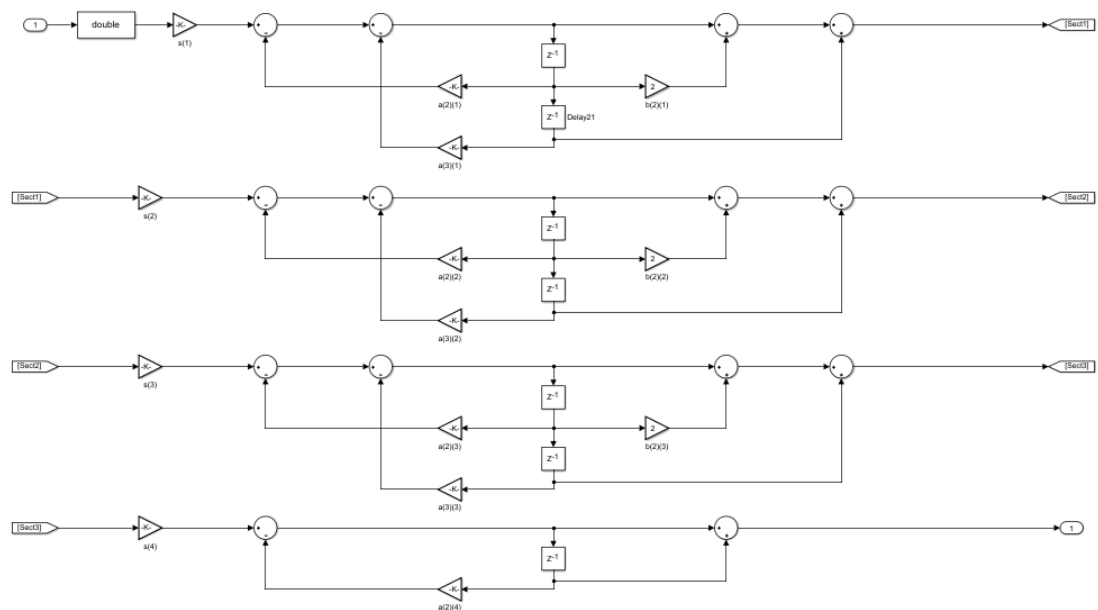


Рисунок 39 - Структура фильтра

Simulink-модель с полученным фильтром представлена на рисунке 41.

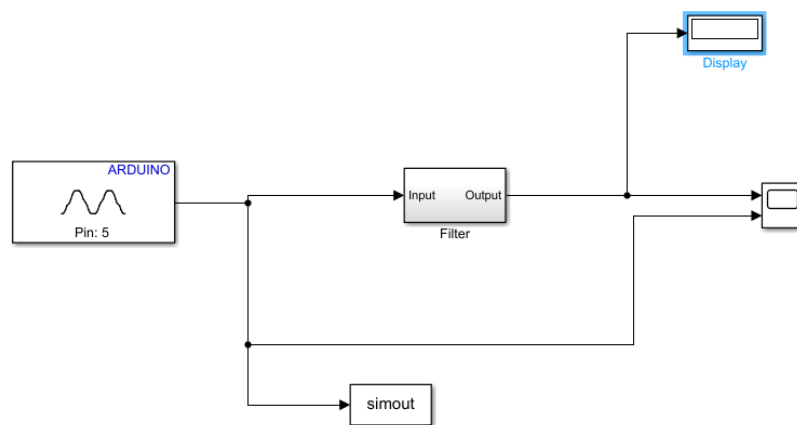


Рисунок 40 - Схема с фильтром

Основные параметры всех разработанных фильтров представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики разработанных фильтров

№	Конец полосы пропускания, Гц	Начало полосы подавления, Гц	Пульсация в полосе пропускания дБ,	Затухание в полосе подавления, дБ.	Порядок фильтра	Задержка, с
1	1	2	1	80	15	3
2	1	5	1	80	7	1
3	10	40	1	80	8	0,13
4	10	40	1	70	7	0,11

Также была предпринята попытка улучшить качество фильтрации при помощи введения в модель медианного фильтра и фильтра скользящего среднего. Модель с их использованием представлена на рисунке 42, результаты моделирования представлены на рисунках 43, 44.

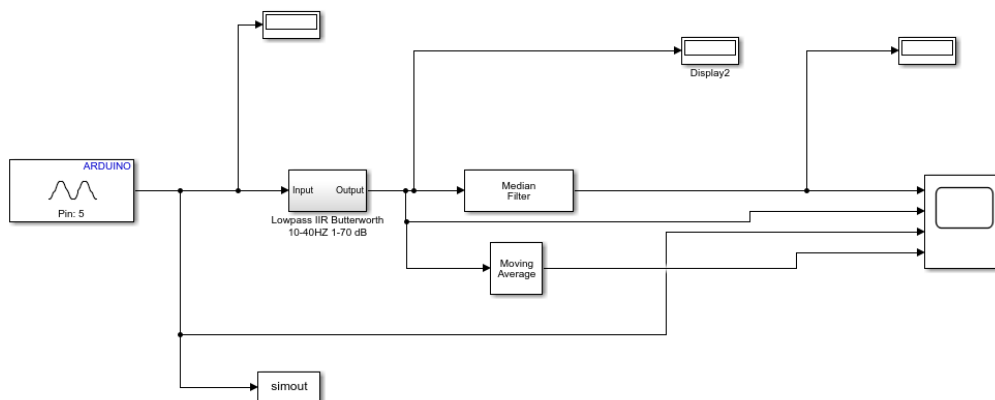


Рисунок 41 – Simulink-модель с медианным фильтром и фильтром скользящего среднего

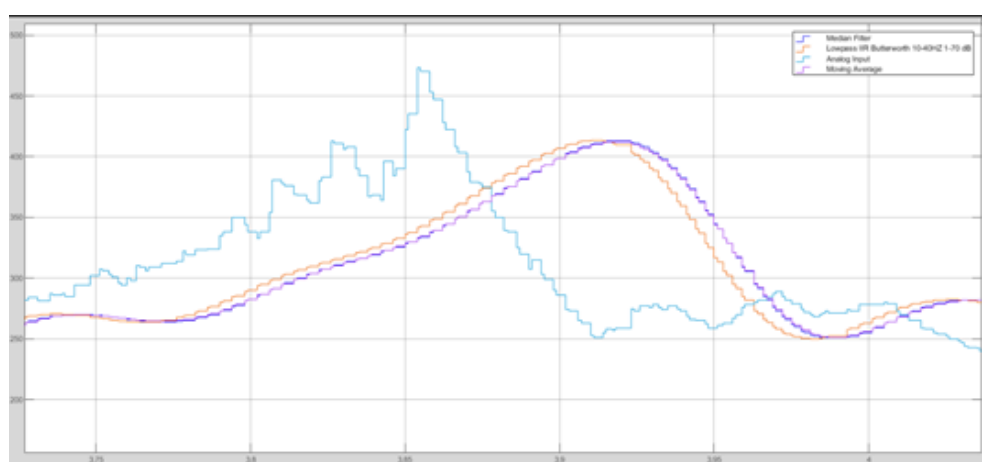


Рисунок 42 – Сигнал после фильтрации медианным фильтром и фильтром скользящего среднего

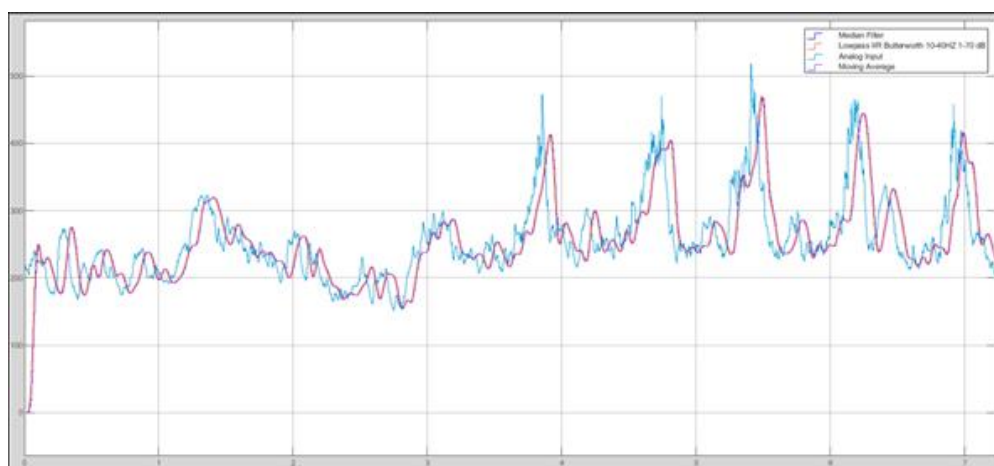


Рисунок 43 – Результаты фильтрации

Как показывают результаты моделирования использование ФНЧ в связке с медианным фильтром или фильтром скользящего среднего приводит к запаздыванию по времени, при этом, существенно не увеличивая качества

фильтрации. Поэтому использование данных алгоритмов фильтрации в качестве дополнения к ФНЧ является нецелесообразным.

3.2 Идентификация состояния мышечной группы

В рамках проведенных экспериментов по наблюдению за мышечным сигналом было обнаружено, что фильтрация, хоть и значительно снизила, но не исключила зашумление сигнала. Значение получаемого с сенсоров мышечного сигнала не является постоянным, оно постоянно колеблется относительно определенной величины – полезного сигнала. Во время перехода мышц в напряженное состояние значение полезного сигнала увеличивается, при этом также увеличивается и амплитуда колебаний считываемого сигнала относительно полезного. Это означает, что при напряжении мышцы будут возрастать амплитудные значения производной от мышечного сигнала, по которым и можно будет определять состояние, в котором находятся мышцы.

Для получения производной от сигнала используется блок MATLAB Discrete Derivative. Simulink-модель для получения производной представлена на рисунке 45. Результаты моделирования представлены на рисунках 46, 47.

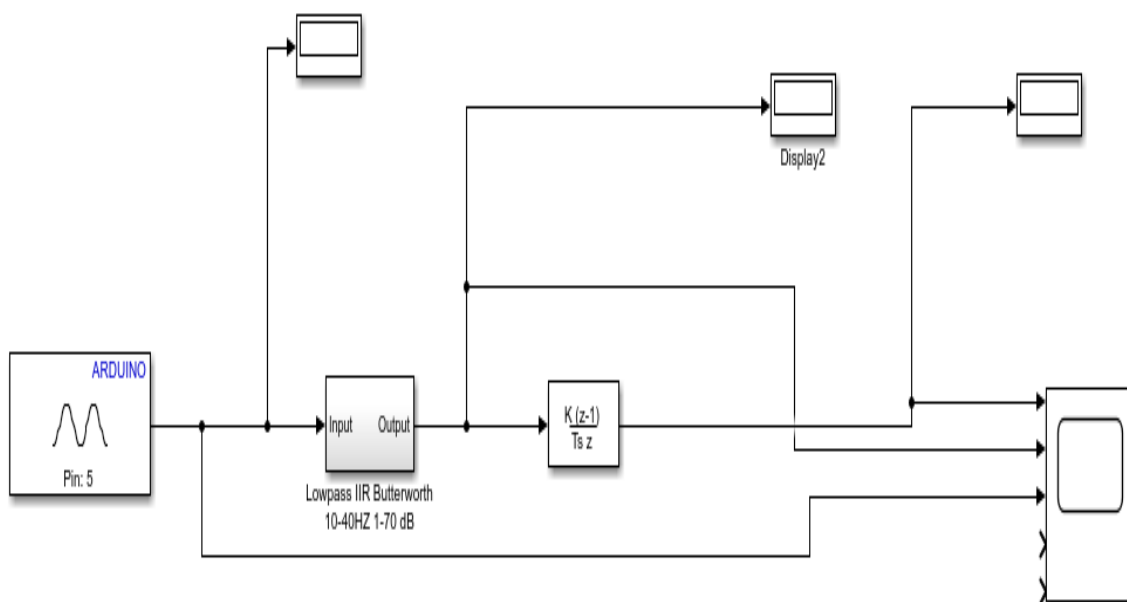


Рисунок 44 – Simulink-модель для получения производной от сигнала

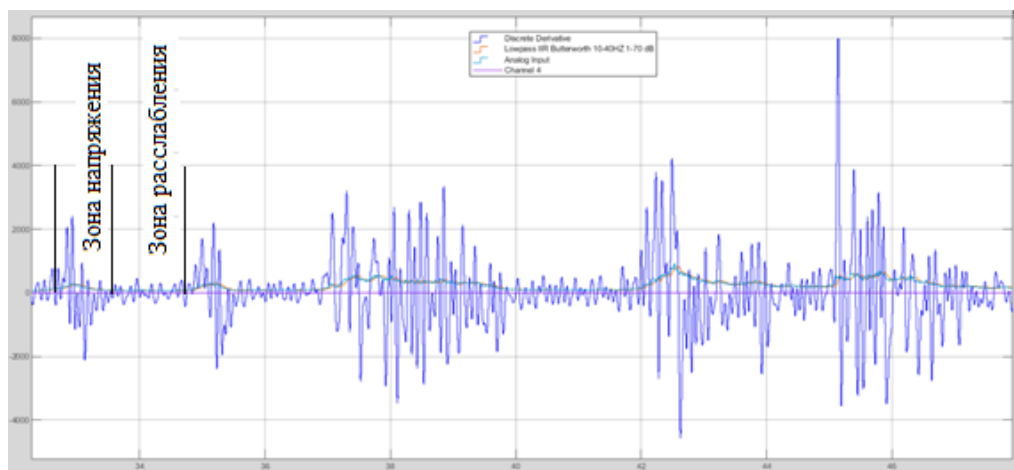


Рисунок 45 – График производной от сигнала в увеличенном масштабе

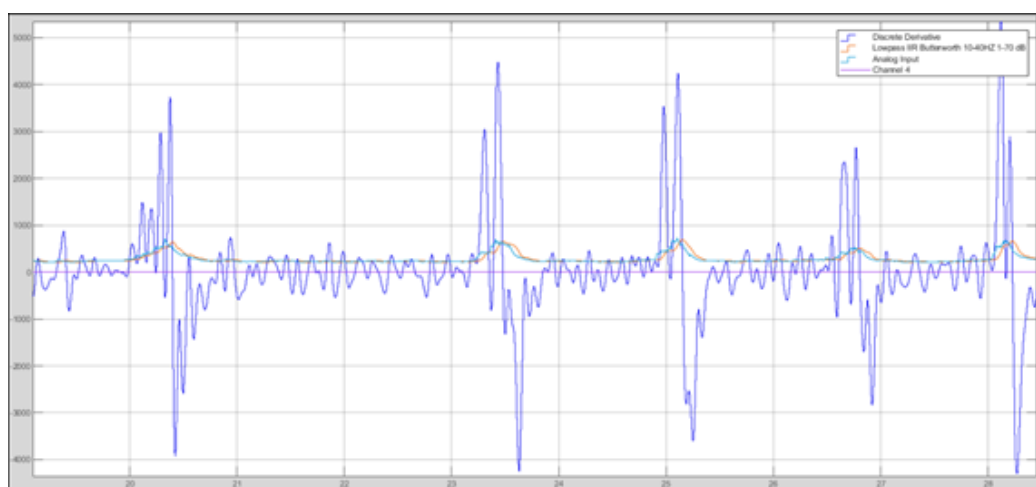


Рисунок 46 – График производной от сигнала

Анализ производной показал, что на участках высокого уровня мышечного сигнала, происходит больший разброс ее амплитуды относительно нулевого значения, чем на участке с низким уровнем сигнала. Для построения детектора было решено взять модуль производной и произвести ее сглаживание при помощи алгоритма скользящего среднего. В результате был получен сигнал, представляющий собой огибающую производной от ЭМГ-сигнала. Simulink-модель представлена на рисунке 48. Результаты моделирования представлены на рисунках 49, 50, 51.

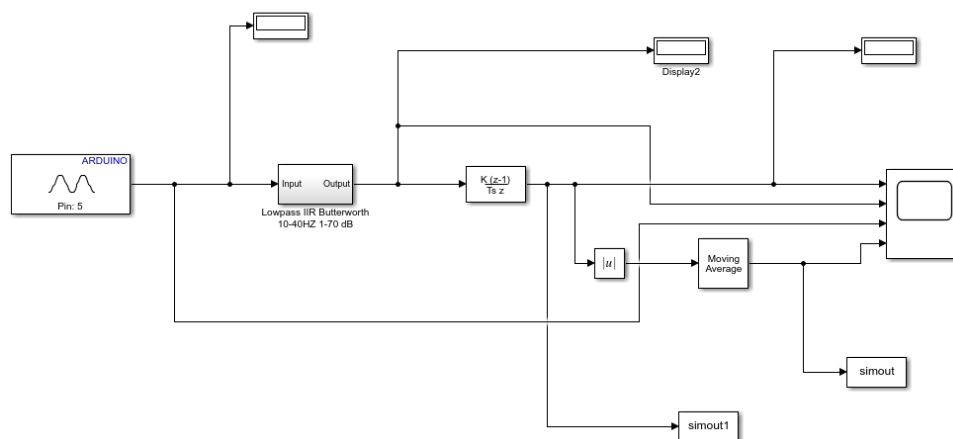


Рисунок 47 – Simulink-модель для обработки производной

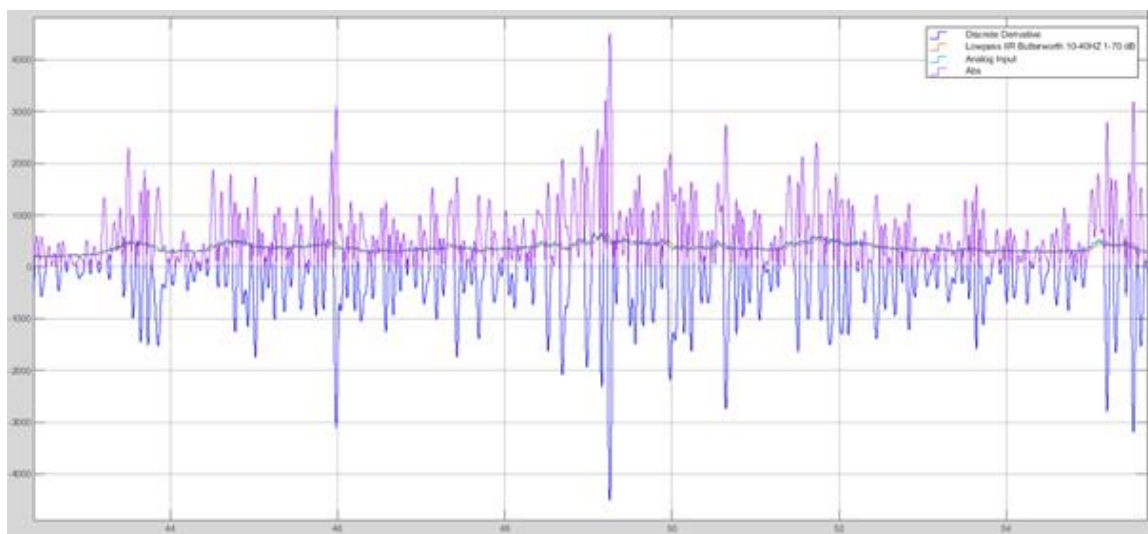


Рисунок 48 – Модуль производной

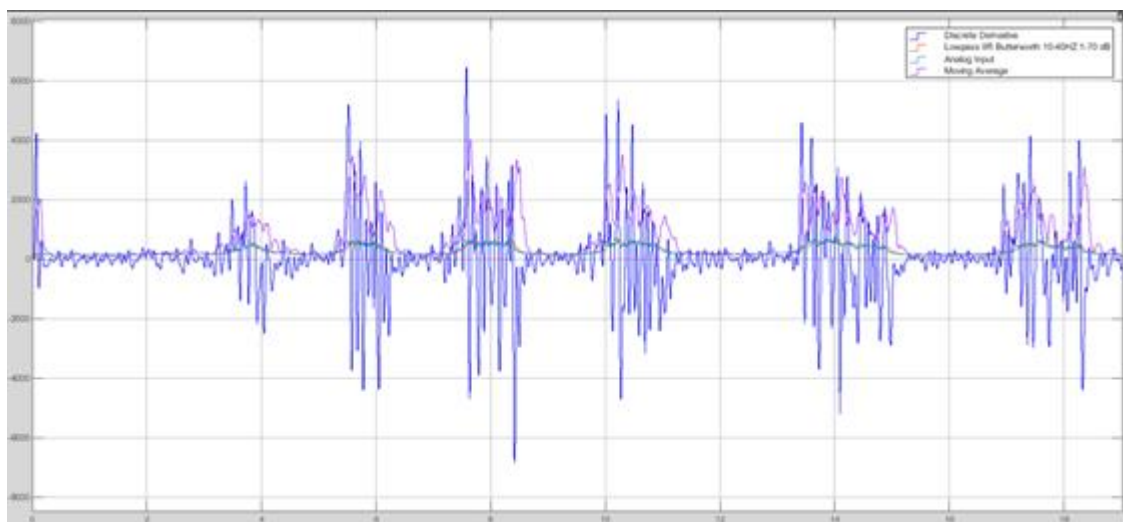


Рисунок 49 – Модуль производной после сглаживания

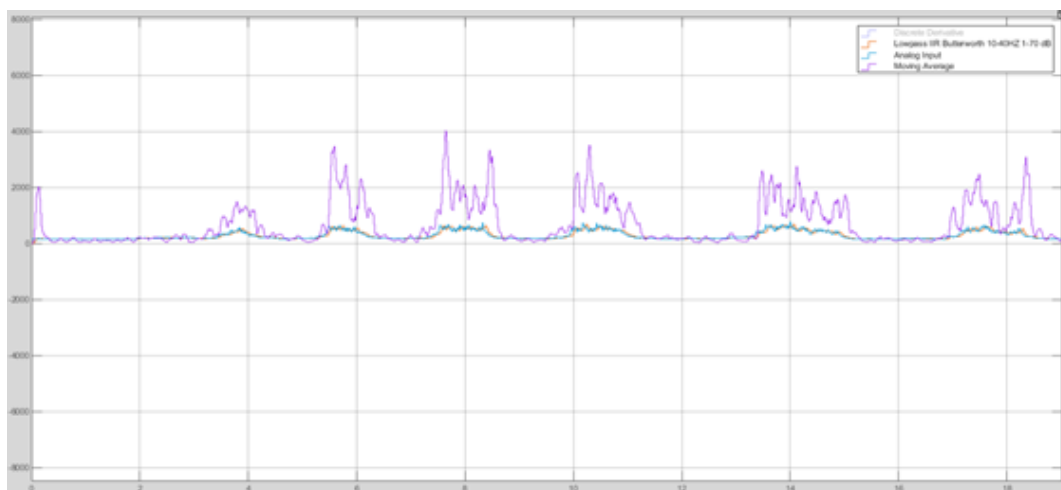


Рисунок 50 – Огибающая производной от сигнала

На графике полученной огибающей отчетливо показано несколько диапазонов, сильно напоминающих ряд ступенчатых импульсов. Поэтому было принято решение аппроксимировать огибающую именно при помощи ступенчатого сигнала. Для этого была доработана предыдущая модель, путем добавления блока Relay, который реализует реле с гистерезисом. При достижении огибающей определенных значений, реле производит включение, либо отключение. Выходной сигнал реле, таким образом, представляет собой ступенчатые импульсы непосредственно связанные со значениями ЭМГ-сигнала, производной и огибающей. Simulink-модель представлена на рисунке 52. Результаты моделирования представлены на рисунках 53, 54.

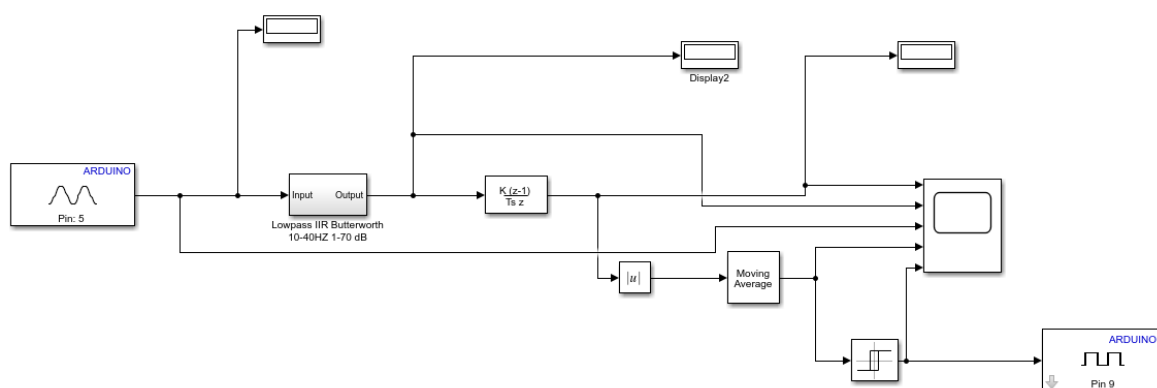


Рисунок 51 – Simulink - модель, формирующая ступенчатые импульсы

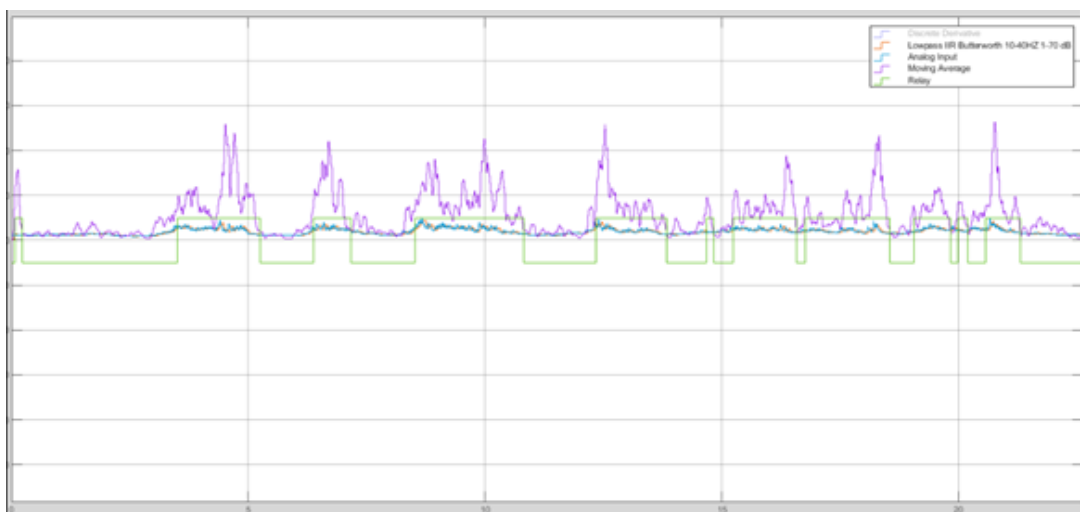


Рисунок 53 – Полученные ступенчатые сигналы

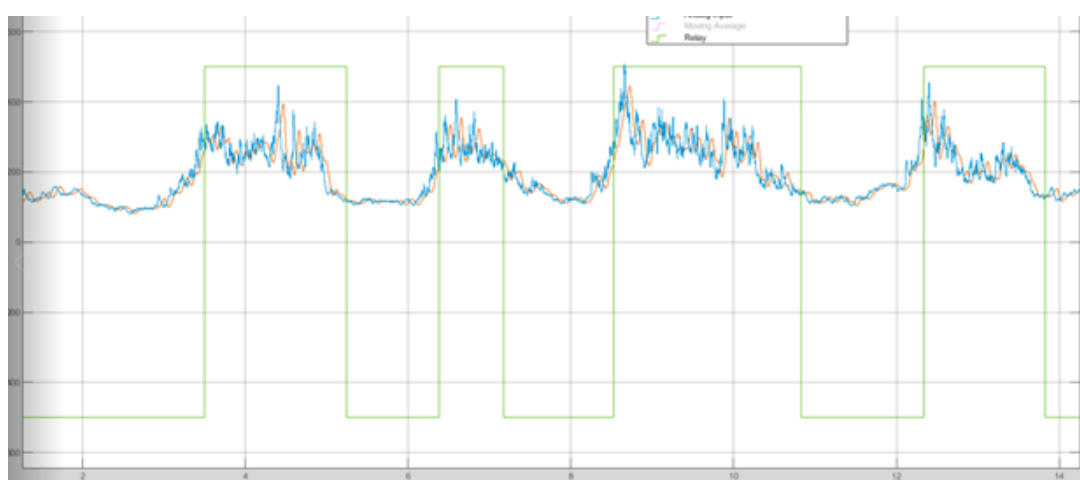


Рисунок 54 – Ступенчатые сигналы в увеличенном масштабе

Как видно из рисунка 54 полученный детектор довольно точно интерпретирует, получаемые с мышц ЭМГ-сигналы. Сигнал, получаемый в пакете MATLAB также можно выводить в Arduino, что также было сделано (управление дискретным выходом при помощи мышц).

Также при проектировании была обнаружена следующая проблема: так как не всегда получается непрерывно поддерживать мышцу в напряженном состоянии, иногда случается кратковременный спад мышечного сигнала, что вызывает ложное срабатывание детектора и переход импульса с пикового на нулевое значение, что недопустимо при управлении исполнительными механизмами экзоскелета. В дальнейшем влияние данной проблемы на точность работы системы удалось нивелировать при помощи дополнительной настройки и калибровки ЭМГ-сенсора.

3.3 Программная реализация управления приводом при помощи полученного полезного сигнала.

На данном этапе работы было решено полностью разграничить между собой процессы первичной обработки сигнала и управления исполнительным устройством и разделить их между двумя микроконтроллерами. Это связано с тем, что алгоритм управления уже разработан и исправно работает, в то время как алгоритм фильтрации планируется дорабатывать. Таким образом, разделение данных задач между микроконтроллерами делает данную задачу более удобной. Для управления исполнительным устройством на данном этапе было решено использовать микроконтроллер Arduino Uno. В дальнейшем эти выполнение данных задач можно без труда совместить в одном устройстве.

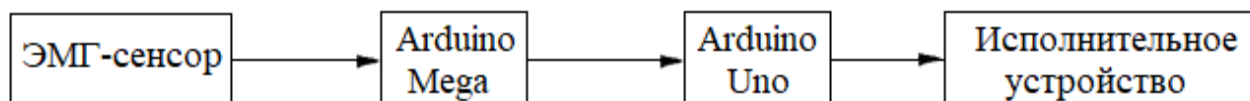


Рисунок 55 – Структурная схема управления исполнительным устройством

Результатом данного этапа работы стала разработка программы, осуществляющей триггерное управление сервоприводом, при помощи длительности мышечного импульса. На данном этапе была реализована упрощенная версия устройства: при поступлении на Arduino Uno импульса, свидетельствующего о напряжении мышцы-разгибателя начинается поворот сервопривода, ведущий к разгибу рабочего конечности экзоскелета. Изменение положения вала сервопривода продолжается до тех пор, пока не произойдет расслабление мышц и как следствие исчезновение управляющего импульса. При этом вал сервопривода начинает постепенное движение в противоположном направлении – происходит сгибание рабочей конечности экзоскелета. В дальнейшем будет производиться снятие мышечного сигнала, также и с мышцы-разгибателя. Таким образом, пользователь сможет самостоятельно и полноценно управлять движением экзоскелетной конечности.

Блок-схема, демонстрирующая работу алгоритма представлена на рисунке 56.

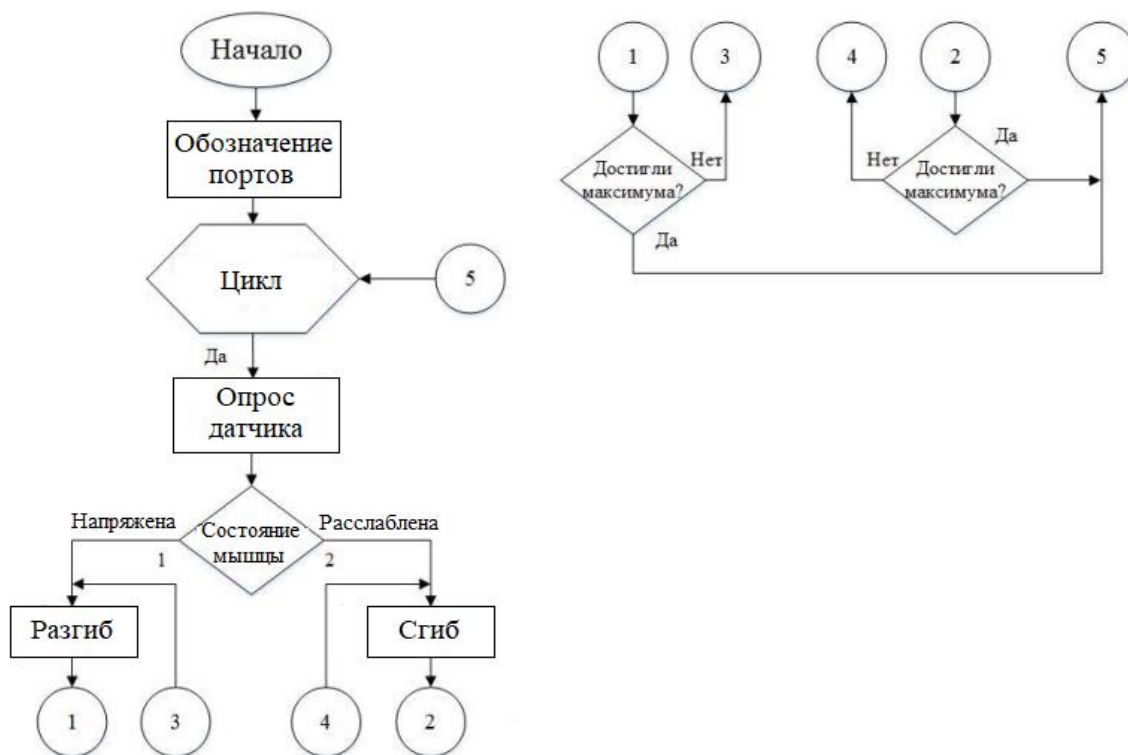


Рисунок 56 – Блок-схема работы алгоритма

4 Концепция стартап-проекта

В ходе данной работы планируется разработать экзоскелет нижних конечностей для ребенка, болеющего спинальной мышечной атрофией и проживающего в городе Томск. Для реализации прототипной модели данного экзоскелета, необходимо провести замеры антропометрических данных тела пациента, по этим показателям рассчитать необходимые параметры экзоскелета и механических компонентов, провести подбор элементной базы, реализовать систему управления исполнительными устройствами, реализовать модель экзоскелета в SolidWorks.

Применение устройства возможно в домашних условиях, а так же в специализированных клиниках.

Современная медицинская практика и статистические данные наглядно показывают острую потребность в экзоскелетных системах, усиливающих физические возможности людей с постоянными или временными нарушениями работы опорно-двигательного аппарата. На основе предлагаемого в данной работе решения возможно создание экзоскелетных устройств, которые могут применяться как в медучреждениях, так и в домашних условиях в качестве средств:

- терапии заболеваний опорно-двигательного аппарата;
- реабилитации и тренировки мышц после временной потери функций опорно-двигательного аппарата.

Целью раздела является разработка концепции стартап-проекта экзоскелета нижних конечностей ЕхoPH.

4.1 Продукт

Экзоскелет «ЕхoPH» – современное устройство на основе ЭМГ-датчиков, микроконтроллеров, двигателей и другого электрического оборудования. Устройство предназначено для тренировки и адаптации к движению нижних конечностей пациента

В устройстве применяется следующий принцип работы: при сокращении мышцы возникают биоэлектрические потенциалы, которые снимаются при помощи датчиков и передаются на микроконтроллер. Микроконтроллер в свою очередь обрабатывает данный сигнал и выдает управляющий сигнал на исполнительные устройства. Исполнительные устройства приводят в движение конструкцию экзоскелета, которая связана механическими связями с ногой, тем самым приводя в движение конечность человека. Движение конечностей позволяет больному адаптировать суставы, мышцы и связки к нагрузкам, тем самым тренируя нижние конечности.

4.2 Анализ конкурентных преимуществ

Товарами конкурентами являются: медицинский экзоскелет «ExoAtlet» компании «ЭкзоАтлет», ассистирующий экзоскелет ExoLite компании «ЭкзоМед», роботизированный реабилитационный экзоскелет «REX» производства «REX BIONICS», экзоскелет «ATLAS 2020» производства «Marsibionics», профессиональный тренажер RT300-SUPINE компании «Cyclone». Общие данные о товарах-конкурентах представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Мировые и отечественные аналоги-конкуренты

ExoAtlet	«ЭкзоАтлет», Россия	
ExoLite	«ЭкзоМед», Россия	

Продолжение таблицы 4 – Мировые и отечественные аналоги-конкуренты

REX	«REX BIONICS», Новая Зеландия	
ATLAS 2020	«Marsibionics», Испания	
RT300- SUPINE	«Cyclone», Великобритания	

В результате анализа конкурентных преимуществ было выявлено, что главным преимуществом разрабатываемого продукта перед аналогами является его цена, более совершенная система управления устройством по сравнению с аналогами. Преимуществом конкурентных устройств является известность и положительный опыт их применения в сегменте реабилитационной медицины, наличие проводимых в данный момент работ и исследований по модернизации

уже существующих образцов. Также почти все представленные аналоги обладают большим функционалом, однако данный фактор несет в себе и отрицательные черты, так как неизбежно ведет к значительному увеличению цены устройства.

Более низкий функционал устройства можно считать преимуществом, повышающим его конкурентоспособность, так как благодаря снижению функционала достигается значительное снижение цены по сравнению с аналогами, что делает наше устройство более доступным для частных лиц. Себестоимость устройства, рассчитанная для условий, когда в месяц будет изготавливаться и реализовываться одно устройство, представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Себестоимость единицы продукта

Наименование	Количество	Цена за единицу, рублей	Стоимость, рублей
Экзоскелет нижних конечностей			
ЭМГ-датчик	8	2500	20000
Двигатель постоянного тока	4	2000	8000
Энкодер	4	1000	4000
ПО 3D-моделирования (SolidWorks)	1	13000	13000
ПО мат. моделирования (MATLAB)	1	1000	1000
Микроконтроллер	4	2500	10000
Работы по производству, сборке и наладке устройства	1	100000	100000
Аренда помещения	1	10000	10000
Итого			166000

4.3 Целевые аудитории

К одним из особенностей рынка медицинских изделий и оборудования можно отнести, что медицинское изделие эксплуатируют квалифицированные специалисты и медицинские сестры, но конечное решение о закупке на рынке принимается третьими лицами – главными врачами ЛПУ и/или руководителями отдела закупок, исходя из запросов заведующего отделением и ведущих

специалистов отделения. Конечными потребителями на рынке являются пациенты, получающие услугу.

4.3.1 Медицинские учреждения

Итак, первая целевая аудитория проекта – это врачи-реабилитологи, формирующие заявку на закупку тренажера. К основным мотивам и целям приобретения медицинской техники организациями здравоохранения можно отнести следующие цели:

увеличение производительности. При закупке тренажеров производительность будет измеряться уменьшением сроков пребывания пациентов в медучреждении;

- улучшение качества предоставляемых услуг. Тренажеры должны способствовать снижению количества осложнений и сокращению постоперационного периода;
- расширение спектра оказываемых услуг, т.к. закупка нового оборудования позволяет принимать на реабилитацию пациентов с большим набором показаний. Для коммерческих медицинских структур современная техника важна не только как инструмент повышения качества обслуживания, но и как фактор в конкурентной борьбе. Эта тенденция постепенно начала распространяться и на государственные заведения;
- повышение качества обслуживания посетителей и больных. Для достижения этой цели необходимо увеличить количество успешно реабилитированных больных.

4.3.2 Фирмы-поставщики медицинской техники

Фирмы-поставщики медицинской техники выполняют важную функцию на медицинском рынке. Они непосредственно работают с ЛПУ, в том числе и с врачами и главными врачами больниц, соответственно, могут влиять на выбор того или иного изделия специалистом. Таким образом, фирмы-поставщики могут не только работать с существующим спросом, но и, в какой-то степени,

сами создавать спрос на то или иное медизделие. Менеджеры и торговые представители фирм-поставщиков могут предлагать врачам продукцию определенных поставщиков, поэтому производителям медицинских изделий необходимо налаживать контакт с крупными поставщиками медицинских изделий и предлагать выгодные условия работы.

Компании-поставщики – это, как правило, индивидуальные предприниматели или общества с ограниченной ответственностью, поставляющие медицинское оборудование, изделия и фармацевтические и лекарственные препараты. Компании небольшие по размерам, работающие в пределах одного-двух регионов. Расположены в крупных городах или областных центрах. В основном работают с крупными и средними закупщиками. Основной ассортимент предлагаемой продукции принадлежит импортным производителям. Работают с широким перечнем продукции и с разными, иногда даже конкурирующими между собой производителями. В своем штате имеют несколько менеджеров, которые непосредственно работают с ЛПУ и участвуют в организации закупок.

Основной мотив второй целевой аудитории – большое денежное вознаграждение и отсутствие рекламы.

4.3.3 Частные лица

Если люди со средним доходом могут использовать данное устройство в специализированных учреждениях, то люди с доходом выше среднего могут позволить приобрести данное устройство для личного пользования.

4.4 Бизнес-модель проекта

Бизнес-модель проекта было решено представить в форме матрицы Остервальдера. Бизнес-модель Остервальдера – это шаблон из девяти блоков, каждый из которых представляет собой ключевой элемент бизнеса. Действующим компаниям бизнес-модель Остервальдера поможет не только выявить новые возможности роста, но и проанализировать деятельность конкурентов, заимствуя лучшие практики.

Типовой вид матрицы Остервальдера представлен на рисунке 57.

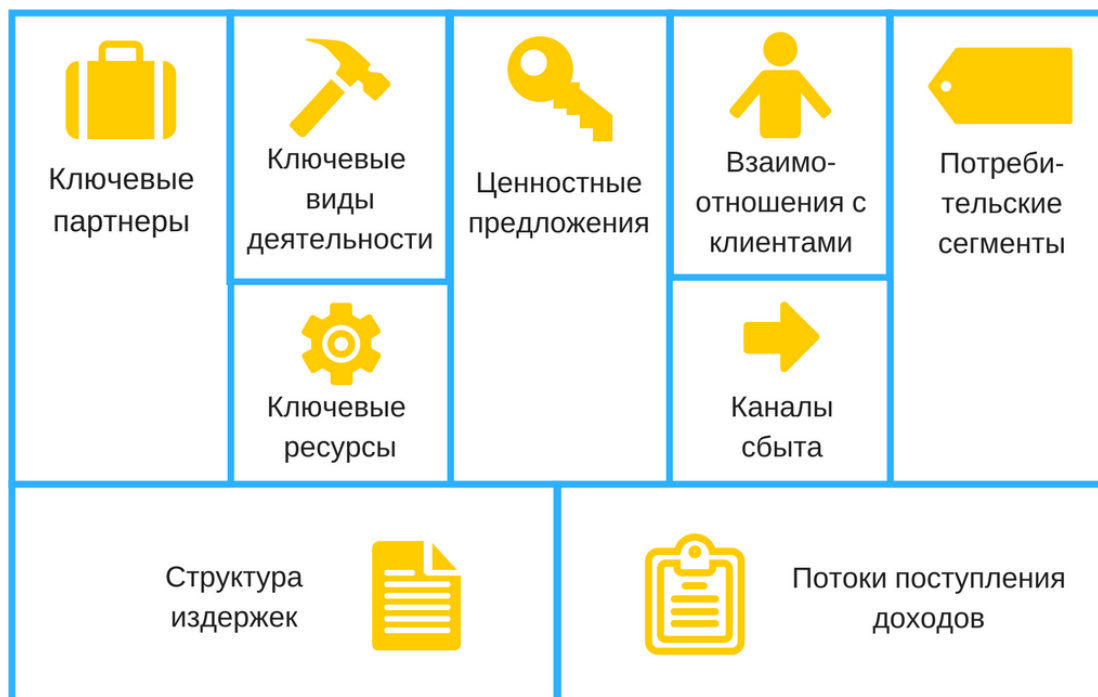


Рисунок 57 – Типовой вид матрицы Остервальдера

Бизнес-модель разрабатываемого проекта представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Бизнес-модель проекта в форме матрицы Остервальдера

• Органы социальной защиты • СМИ • Медицинско-исследовательские учреждения • Разработчики комплектующих • Фирмы, обладающие производственными мощностями	Качественные: • Сборка • Математическое и компьютерное моделирование • Программирование Персональные подготовительные мероприятия для каждого клиента	• Один из немногих комплексов механотерапии для терапии и реабилитации детей инвалидов со СМА • Доступная цена • Перспективная методика работы комплекса • Обучающие мероприятия для клиентов • Гарантийное обслуживание	• Персональная поддержка каждого пользователя • Автоматические средства работы с клиентами	• Медицинские учреждения • Фирмы - поставщики медицинской техники • Частные лица
	• ПО • Качественные материалы • Электронные и механические компоненты • Финансы • Недвижимость • Бюджетные средства 3-д печати		• Органы социального страхования и социальной защиты • Государство • Контактные центры • Интернет	
• Комплектующие • Сборка • Техобслуживание • Содержание материально-технической базы (контактные центры, участки производства)	• Субсидии от государства и социальных служб • Разовая сделка при приобретении устройства • Техобслуживание			

Выводы по разделу «Концепция стартап-проекта»

В результате исследования была определена концепция стартап-проекта по разработке экзоскелета нижних конечностей для больных с заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Был проведен анализ конкурентов, рассчитана себестоимость продукта, определена целевая аудитория продукта. Также была составлена бизнес-модель проекта в форме матрицы Остервальдера. Учитывая все конкурентные преимущества устройства, можно предположить, что продукт будет конкурентоспособным на рынке реабилитационных товаров и услуг.

5 Социальная ответственность

В работе рассматривается система, реализующей управление сервоприводами в суставах экзоскелета и использующей в качестве управляющих воздействий биоэлектрические потенциалы мышц.

Компонентами системы являются две батареи типа «Крона», электромиографические датчики, при помощи которых снимается управляющий сигнал, микроконтроллер Arduino Mega, обрабатывающий сигнал и передающий его на исполнительные устройства и сервопривод, который является непосредственно исполнительным устройством. Программа обработки мышечных сигналов была реализована в пакете MATLAB.

Применение системы возможно в следующих областях:

- протезирование;
- мехатроника и робототехника;
- разработка экзоскелетных устройств.

Соответственно, использовать систему, описываемую в данной работе, могут использовать компании и производители, которые относятся к одной из вышеприведенных областей.

Современная медицинская практика и статистические данные наглядно показывают острую потребность в экзоскелетных системах, усиливающих физические возможности людей с постоянными или временными нарушениями работы опорно-двигательного аппарата. На основе предлагаемого в данной работе решения возможно создание экзоскелетных устройств, которые могут применяться как в медучреждениях, так и в домашних условиях в качестве средств:

- терапии заболеваний опорно-двигательного аппарата;
- реабилитации и тренировки мышц после временной потери функций опорно-двигательного аппарата.

Все работы выполнены в аудитории 117а 10 корпуса НИ ТПУ.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К правовым нормам, регламентирующим эргономические требования к рабочей зоне исследователя относятся следующие нормативные документы:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)
2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
3. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
4. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.
5. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
6. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.
7. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
8. ГОСТ 21889-76. Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования.
9. ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.

В соответствии с 94 статьей ТК РФ длительность рабочей смены для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, где установлена сокращенная продолжительность рабочего времени, максимально допустимая продолжительность ежедневной работы (смены) не может превышать:

- при 36-часовой рабочей неделе – 8 часов;

- при 30-часовой рабочей неделе и менее – 6 часов.

В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается.

5.2 Производственная безопасность

Перечень возможных опасных и вредных факторов представлен в таблице 7.

Таблица 7 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+		СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2. Превышение уровня шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
3.Отсутствие или недостаток естественного света (освещенность)	+	+		СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
4.Физические и нервно-психические перегрузки	+	+		ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
Электробезопасность (возможность поражения электрическим током от источников питания ПК и паяльного оборудования, при соприкосновении с не заизолированными проводниками и при коротком замыкании в электрической цепи);	+	+		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы"

5.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха.

Показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма, что позволяет обеспечивать высокий уровень работоспособности.

Отклонение показателей микроклимата может быть вызвано конструктивными особенностями производственного помещения, функционированием производственного оборудования, климатическими условиями окружающей среды.

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	(22 – 24)	(21 – 25)	(40 – 60)	0,1
Теплый	Ia (до 139)	(23 – 25)	(22 – 26)	(40 – 60)	0,1

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата и поддержания его оптимальных условий должны быть использованы защитные мероприятия: введение системы местного кондиционирования воздуха, воздушное душирование, спецодежда и средства индивидуальной защиты, помещения для отдыха и обогрева, регламентация времени работы, сокращение рабочего дня и т.д.

5.2.2 Превышение уровня шума

Во время разработки описываемой системы основными источниками шума являются ПК и сервоприводы. Воздействие шума также сохраняется и при эксплуатации устройства, так как в его конструкцию входят сервоприводы.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты.

Допустимые шумовые характеристики рабочих мест регламентируются согласно [27]. Выполняемые работы можно отнести к конструированию, проектированию и программированию, рабочее место при этом располагается в лаборатории для теоретических работ и обработки данных. Исходя из этого, уровень звука должен находиться в пределах 50 дБА, согласно вышеприведенному нормативному документу. Уровень шума исправного современного компьютера находится в пределах от 35 до 50 дБА. Шум, вырабатываемый сервоприводом, также находится в пределах 50 дБА. Рабочее место удовлетворяет нормативным требованиям.

В качестве мер защиты от шума можно применить отделку рабочего помещения и готового устройства звукопоглощающими и звукоизоляционными материалами.

5.2.3 Освещение

Недостаточная освещенность рабочей зоны может быть обусловлена особенностями устройства производственных помещений (недостаток источников естественного света), а также недостаточным количеством источников искусственного света.

Плохое освещение негативно воздействует на зрение, протекание биологических ритмов внутри организма, приводит к быстрому утомлению, снижению работоспособности, вызывает дискомфорт, является причиной

головной боли и бессонницы. Все вышеприведенные факторы могут стать причинами несчастных случаев.

Обычно на производстве пользуются двумя видами освещения — естественным и искусственным. Как естественный, так и искусственный свет способствует усилению деятельности человека.

При разработке описываемой системы недостаток освещения может быть особенно ощутим при работе с ПК и во время непосредственной сборки системы, во время которой преобладающим процессом является процесс пайки элементов.

Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК согласно [28]. Данные требования представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК

Освещенность на рабочем столе	(300 – 500) лк
Освещенность на экране ПК	не выше 300 лк
Блики на экране	не выше 40 кд/м ²
Прямая блескость источника света	200 кд/м ²
Показатель ослеплённости	не более 20
Показатель дискомфорта	не более 15
Отношение яркости:	
– между рабочими поверхностями	3:1–5:1
– между поверхностями стен и оборудования	10:1
Коэффициент пульсации:	не более 5%

Работа с паяльным оборудованием относится к зрительным работам при пайке материалов толщиной 0.5 – 1.5 мм, что определяет разряд зрительной работы: IIIб. Рекомендуемые показатели освещения при пайке представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Рекомендуемые показатели освещения при пайке

Освещенность, лк		Показатель ослепленности	Коэффициент пульсации, %, не более
Комбинированное освещение	Общее освещение		
1250	400	40	(5 – 10)

В случае недостатка освещения можно предложить к исполнению следующие мероприятия: введение дополнительных источников искусственного света, помещения для отдыха, регламентация времени работы, сокращение рабочего дня и т.д.

5.2.4 Психические и физические перегрузки

Появление данных факторов связано с длительным нахождением в одной рабочей позе, повторением стереотипных однотипных движений, ненормированным рабочим днем и временем отдыха. В результате физических перегрузок нарушается кровообращение в области таза и нижних конечностей, а также становится возможным появление болезней позвоночника, таких как остеохондроз. Результатом психических перегрузок является умственное перенапряжение, перенапряжение органов слуха и зрения.

В целом к рабочему месту исследователя можно предъявить следующие основные требования:

Конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должны обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины, обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы.

Также очень важно поддерживать оптимальный режим труда и отдыха, для профилактики и предотвращения психического и физического переутомления.

5.2.5 Электробезопасность

Процесс разработки описываемой системы связан с риском поражения электрическим током, который возникает в сети запитывания ПК и паяльного оборудования, в случае прикосновения к не заизолированным или поврежденным проводникам электрического тока. Действие электрического тока на организм носит разносторонний характер. Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействие на различные системы организма и может вызвать нарушения в работе жизненно-важных органов.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов согласно [29]. Данные показатели представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока t , с										
		0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Переменный, 50 Гц	U, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60
	I, мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50

В качестве мер защиты от прямого контакта с проводниками тока, согласно [30], необходимо применять следующие защитные меры:

- основная изоляция;
- защитные оболочки;
- безопасное расположение токоведущих частей, размещение их вне зоны досягаемости частями тела, конечностями.

Все вышеперечисленные меры защиты соблюдены на рабочем месте.

5.3 Экологическая безопасность

Работы, проводимые при разработке системы не несут за собой значительного загрязнения окружающей среды, что отмечает необходимость в применении средств защиты селитебной зоны.

Загрязнение атмосферы может возникать во время процесса пайки соединительных проводников и радиоэлементов на печатных платах, в результате которого выделяются пары свинца и олова.

Значения предельно-допустимой концентрации данных (ПДК) веществ согласно [31] представлены в таблице 12.

Таблица 12 – ПДК вредных веществ в воздухе

Вещество	ПДК, мг/м ³
Свинец	0,01
Олово	10

В качестве метода защиты от выброса вышеприведенных веществ в атмосферу можно использовать специальные фильтры очистки, уменьшающие концентрацию свинца в рабочей зоне.

Загрязнение литосферы может происходить в результате утилизации вышедших из строя сервоприводов, ПК, а также элементов искусственного освещения (лампы накаливания, люминесцентные лампы). Составляющими данных компонентов являются: пластик, алюминий, железо, кремний, золото, серебро, медь, олово, ртуть и т.д. Данные отходы следует передавать утилизирующим компаниям. В результате данные материалы будут без вреда для окружающей среды уничтожены либо переработаны для повторного использования.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

С учетом специфики разрабатываемой системы с наибольшей вероятностью чрезвычайной ситуацией при разработке и эксплуатации устройства будет являться пожар. Возникновение пожара может быть связано с неисправностью проводки, либо высоким значением тока в сервоприводах.

В качестве мероприятий профилактики пожаров должны быть осуществлены следующие пункты:

- наличие средств пожаротушения;

- правильный выбор электрооборудования и способов его монтажа с учетом пожароопасности окружающей среды;
- оборудование эффективной вентиляции, исключающей возможность образования в помещении взрывоопасной смеси;
- запрещение курения и разведения огня в пожароопасных и взрывоопасных помещениях.

В случае пожара необходимо предпринять следующие действия:

- Вызвать пожарных по телефону «01», «101» или «112». Сообщить информацию об адресе, горящем объекте, а также фамилию и имя звонящего, номер телефона.
- При небольшом возгорании попытаться потушить пожар имеющимися средствами пожаротушения. Запрещается тушить водой электроприборы.
- При значительном распространении пламени немедленно покинуть помещение. Пользоваться лифтами запрещается.
- При задымлении путей эвакуации дышать через влажную ткань, передвигаться, пригибаясь к полу.
- При невозможности покинуть помещение — оставаться в комнате, закрыв окна и двери, привлекать внимание очевидцев через стекло.
- Встретить пожарных, показать машине удобный путь к очагу возгорания.

Вывод по разделу «Социальная ответственность»

Во время работы над разделом «Социальная ответственность» были установлены опасные и вредные факторы, имеющие место при разработке и эксплуатации системы управления приводами суставов экзоскелета. Выявлены такие факторы как: микроклимат, шум, освещенность, физические и нервно-психические перегрузки. Была приведены нормативные документы, регламентирующие требования безопасности.

Для каждого фактора были предложены меры минимизации влияния на людей и окружающую среду. Соблюдение данных мер позволяет обеспечить соответствие рабочего места исследователя и конечного устройства регламентированным требованиям безопасности.

Заключение

В рамках работы была спроектирована система управления приводами суставов экзоскелета с применением мышечных сигналов. Было осуществлено снятие мышечных сигналов, их первичная обработка в MATLAB. Также была разработана программа для управления поворотом сервопривода. Получены навыки работы с такими встроенными средствами пакета MATLAB, как Signal Analyzer, Simulink. Приобретены навыки настройки связи между внешними устройствами и пакетом MATLAB

Была разработана функциональная схема, описывающая структуры устройства, осуществлен подбор компонентов. Были составлены программы для обработки и фильтрации сигнала, управления сервоприводом при помощи отфильтрованных сигналов.

На данном этапе работы управление сервоприводом проводилось только с помощью мышечного сигнала, снятого с мышцы-разгибателя. Такой подход обеспечивает возможность управления движением экзоскелетной конечности только в одном направлении. В дальнейшем планируется добавить в систему в качестве управляющего воздействия сигнал с мышцы-сгибателя. Методика управления будет аналогична уже созданному алгоритму. Таким образом, пользователь будет способен проводить полноценное управление движением устройства.

В будущем планируется дальнейшая доработка системы, применение более эффективных методов управления, а также внедрение системы в реальное механическое устройство.

Список литературы

1. Шушарина Н.Н. Управление экзоскелетными конструкциями посредством устройства для регистрации электрофизиологических сигналов // Научные исследования и разработки: приоритетные направления и проблемы развития: сборник научных трудов по материалам X Международного междисциплинарного форума молодых ученых. – 2017. – С.342-347.
2. Хоружко М.А., Сесекин Г.Н., Болдырева Н.В., Шамшин М.О., Кастальский И.А., Миронов В.И., Пимашкин А.С., Казанцев В.Б. Мобильная система управления экзоскелетом с помощью электромиографических сигналов мышц человека // Современные технологии в медицине: Рецензируемый научно-практический журнал. – 2017. – С.163-165.
3. Благотворительный фонд «Семьи СМА» // Семьи СМА URL: <http://www.f-sma.ru/uploads/files/library/2017%20-%20report.pdf> - дата обращения: 30.02.2019.
4. Спинальная мышечная атрофия // Википедия – свободная энциклопедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B0%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B8%D1%8F - дата обращения: 30.02.2019.
5. Спинальная мышечная атрофия: что дальше // Благотворительный фонд развития паллиативной помощи URL: https://www.rcpcf.ru/wp-content/uploads/2018/09/SMA_preview-2.pdf - дата обращения: 02.03. 2019.
6. Лобов С.А., Миронов В.И., Кастальский И.А., Казанцев В.Б. Совместное использование командного и пропорционального управления внешними робототехническими устройствами на основе электромиографических сиигналов // Современные технологии в медицине: Рецензируемый научно-практический журнал. – 2015. – С.30-38.

7. HAL-терапия: Реабилитация при помощи экзоскелета HAL // Walk Again: Реабилитация при помощи экзоскелета URL: http://walk-again.ru/reabilitaciya_hal/ - дата обращения: 05.03.2019.
8. Каталог экзоскелетов // Ваш гид в мире роботов и дронов в России и в мире. Новости и справочная информация URL: <http://robotrends.ru/robopedia/katalog-ekzoskeletov> - дата обращения: 06.03.2019.
9. ЭкзоАтлет клиникам // ЭкзоАтлет – российский экзоскелет URL: <https://www.exoatlet.com/ru/for-clinics> - дата обращения: 07.03.2019.
10. Ассистирующий экзоскелет ExoLite // Российские экзоскелеты ExoLite URL: <https://www.exomed.org/> - дата обращения: 09.03.2019.
11. Rewalk 6.0 // Rewalk 6.0 URL: <https://rewalk.com/> - дата обращения: 11.03.2019.
12. Экзоскелет своими руками // Лучшие публикации за сутки/Хабр URL: <https://habr.com/ru/company/parallels/blog/326596/> - дата обращения: 11.03.2019.
13. Rex Bionics – Reimagining Rehabilitation // Clinical Use URL: <https://www.rexbionics.com/rex-for-clinical-use/> - дата обращения: 13.03.2019.
14. Atlas 2020/2030 // Products URL: <http://www.marsibionics.com/products/?lang=en> - дата обращения: 14.03.2019.
15. Первый экзоскелет для ребенка, страдающего спинальной мышечной атрофией // Журнал о науке и технологиях. Интернет-журнал о новых технологиях URL: <http://posterspb.ru/news/view/464-pervyy-ekzoskelet-dlya-rebenka--stradayutshego-spinalnoy-myshechnoy-atrofiey> - дата обращения: 15.03.2019.
16. What's HAL? // The world's first cuborg-type robot «HAL» - CYBERDYNE URL: <https://www.cyberdyne.jp/english/products/HAL/index.html> - дата обращения: 17.03.2019.

17. Hybrid Assistive Limb // Википедия – свободная энциклопедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Hybrid_Assistive_Limb - дата обращения: 18.03.2019.
18. Тренажер для разработки нижних конечностей RT300-SUPINE // Будущее реабилитации в ваших руках – Бека Рус URL: <http://www.beka.ru/ru/katalog/rannyaya-aktivizatsiya-i-vertikalizatsiya/rt300-supine/> - дата обращения: 21.03.2019.
19. Тренажер с одновременной функциональной стимуляцией верхних и нижних конечностей THERA-live RT300 // MyStyle – медицинское оборудование URL: <http://mstylespb.ru/thera-livert300> - дата обращения: 22.03.2019.
20. Тренажер реабилитационный RT 300 Supine прикроватный // Дельрус – медицинское оборудование и расходные материалы, продажа, ремонт и обслуживание медицинской техники URL: <https://www.delrus.ru/catalog/reabilitatsiya-i-funktsionalnaya-diagnostika/reabilitatsiya/aktivno-passivnaya-mekhanoterapiya/226393-trenazher-reabilitats-s-funktsional-elektrostimulyatsiey-i-biologich-obr-svyazyu-dlya-lecheni/> - дата обращения: 22.03.2019.
21. Signal Acquisition Using Surface EMG and Circuit Design Considerations for Robotic Prosthesis // IntechOpen – Open Science Open Mind URL: <https://www.intechopen.com/books/computational-intelligence-in-electromyography-analysis-a-perspective-on-current-applications-and-future-challenges/signal-acquisition-using-surface-emg-and-circuit-design-considerations-for-robotic-prosthesis> - дата обращения: 01.04.2019.
22. Basics of electromyography // ElectroPhys – Electrophysiology for undergrads URL: <https://electrophys.wordpress.com/home/electromyography/basics-of-emg/> - дата обращения: 04.04.2019.
23. Where to place EMG electrode sensors for biofeedback treatment // Resility URL: <https://resilityhealth.com/placing-emg-electrode-sensors-for-biofeedback/> - дата обращения: 07.04.2019.

24. Advancer Technologies. Muscle Sensor v3 Users Manual // Advancer Technologies URL: <http://www.advancertechnologies.com/2013/03/diy-conductive-fabric-electrodes.html> - дата обращения: 14.04.2019.
25. Arduino Mega 2560 // Аппаратная платформа Arduino URL: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560> - дата обращения: 23.04.2019.
26. Серводвигатель MG995 и Arduino // Arduino-diy – проекты и обучающие уроки под Arduino URL: <http://arduino-diy.com/arduino-MG995-servo> - дата обращения: 29.04.2019.
27. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы»
28. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
29. ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».
30. ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
31. ГОСТ 12.1.005-76 «Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования».

Приложение А

(Обязательное)

Листинг программы управления сервоприводом

```
#include <Servo.h> // подключаем библиотеку для работы с сервоприводом
Servo servo; // объявляем переменную servo типа "servo"
int led_pin=3; // пин подключения
int button_pin = 4; // пин кнопки
int angle = 0;
// переменные
int buttonState = 0; // переменная для хранения состояния кнопки
void setup() {
    pinMode(led_pin, OUTPUT); // Инициализируем цифровой вход/выход в режиме выхода.
    pinMode(button_pin, INPUT); // Инициализируем цифровой вход/выход в режиме входа.
    servo.attach(5); // привязываем сервопривод к аналоговому выходу 5
    servo.write(0); // устанавливаем вал сервопривода в начальное положение
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    buttonState = digitalRead(button_pin); // считываем значения с кнопки
    Serial.println(servo.read());
    if (buttonState == HIGH && angle < 1024) {
        digitalWrite(led_pin, HIGH); // зажигаем светодиод
        analogWrite(led_pin, angle); // поворачиваем вал сервопривода на определенное значение угла
        angle = angle+1; // пока кнопка нажата постепенно поворачиваем вал сервопривода
        servo.write(angle); // ставим вал на 180
        delay (50); // задержка в 50 мс
    }
}
```