

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Головин Михаил Андреевич

Разработка и исследование мехатронного инвалидного кресла-коляски

Направление подготовки 15.06.01 «Машиностроение»

Направленность 15.06.01_03 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:
Головин Михаил Андреевич
Научный руководитель: профессор,
д.т.н. Жавнер Виктор Леонидович

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ:	доцент, к.т.н., Мацко Ольга Николаевна
Научный руководитель:	профессор, д.т.н. Жавнер Виктор Леонидович
Рецензент:	генеральный директор ООО «Химический ресурс», к.т.н., Павлов Е.Е.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Инвалидное кресло-коляска (ИКК) предназначено для повышения мобильности человека. Оно широко используется в медицинской и социальной реабилитации, в том числе в условиях современного мегаполиса. Помимо этого, ИКК используются при подготовке к оперативным вмешательствам и в период восстановления после них.

Кресло-коляска для инвалидов является одним из видов ассистивных изделий. Разработка функциональных доступных ассистивных изделий является глобальным вызовом согласно перечню ВОЗ. По данным ВОЗ на 2016 г. рассматриваемыми техническими средствами реабилитации были обеспечены 5-15% из 70 миллионов нуждающихся в мире. В России более 500 тыс. чел. по данным Росстата постоянно пользуются такими креслами.

Общие медицинские показания к их назначению включают заболевания различной этиологии, врожденные особенности развития, последствия травм. Медицинские показания к обеспечению постоянной (специфической) позы человека в кресло-коляске включают, в том числе: болезнь Бехтерева; хирургические вмешательства на шейном сегменте позвоночника, в особенности у детей; невозможность поддержания естественного поля зрения у сидячих и лежащих больных. При подобных показаниях необходимо обеспечить постоянное положение сиденья, как в статике, так и при движении. Стабилизация кресла обеспечивает возможность концентрации внимания на окружающей обстановке, что уменьшает психическое напряжение оператора и повышает безопасность. От функционала кресла-коляски в условиях мегаполиса зависит жизнь человека.

Современный тренд на урбанизацию не учитывается при проектировании новых средств повышения мобильности лиц с ограниченными возможностями здоровья (лиц с ОВЗ). Отличительной особенностью современного многомиллионного города являются это метро, торговые центры, оснащенные эскалаторами и траволаторами. Комфорт от использования ИКК в таких условиях способствует более полной интеграции человека в социальную, бытовую и профессиональную среду. В настоящее время отсутствуют серийные кресло-коляски с электроприводом, которые можно самостоятельно использовать на эскалаторе. Данная проблема частично решается при вовлечении посторонних лиц и использовании различных ассистивных устройств (подъемники, ступенькоходы и др.), лифтов, но, к сожалению, не решает проблему в целом. В частности, в г. Санкт-Петербург лифтами оборудованы только станции метрополитена, открывшиеся после 2005 г. (Парнас, Беговая, Новокрестовская, Шушары, Дунайская – 5 из 72 станций). Расширение возможностей самообслуживания лиц с ОВЗ в условиях современной жизни в мегаполисе с учетом городской инфраструктуры является важным этапом развития доступной для них среды.

Использование устройств поступательного перемещения в качестве элемента опоры применяется, в частности, при умерении (уменьшении)

бортовой качки судов [self-stabilizing boats]. Имплементация данного подхода к решению проблемы обеспечения положения в статике и динамике, в частности - на малых скоростях, и обеспечения комбинированного движения, является перспективным направлением исследования.

Степень научной разработанности темы исследования. Задача обеспечения и совершенствования процессов стабилизации кресел-колясок решалась многими авторами, однако в научно-технической литературе отсутствует системный подход к анализу и проектированию мехатронных устройств подобного типа.

Первые исследования в области поддержания положения платформ относятся к середине XX века. Авторы Беляев, Русских, Нечувийтер посвятили свои работы рассмотрению данной проблемы при движении объектов. Вопросом обеспечения неподвижности платформы занимались русские и зарубежные авторы Дядченко Н.П., Труфанов Л.С., Дашко О.Г., Посохов Г.Н., Сенюков Д.Н. Теоретическое обоснование и практический расчет рациональных параметров пониженных значений угловых отклонений платформы от штатного принадлежат исследователю Пильгунову. Вопросам автоматизации процесса обеспечения постоянного положения посвящены работы ученых В.С. Щербакова, М.В. Григорьева, Hong Chen, исследованию характеристик этого процесса - В.Л. Жавнера, способам и критериям оценки его погрешности - Нагорного, Денисова А.А., эксплуатации установок, в которых реализуется такой процесс – Бортяков Д.Е.

Основное внимание в большинстве перечисленных выше работ уделялось изучению крупных изделий (кранов, передвижных платформ с гидроприводами). В области разработки технических средств реабилитации для повышения мобильности значительный вклад внесли И.И. Гнатченко, А.Г. Семёнов, В.В. Цветков, А.Д. Элизов, А.А. Красильников, А.Д. Самойлов, Д.М. Долгушев, А.А. Посевкин, М.А. Ткачев.

Впервые обобщили разрозненные теоретические разработки и экспериментальные данные по уравниванию в мехатронных системах А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес.

Исследования уравнивания подвижных платформ принадлежат ученым Верховскому В.В., Лакоте Н.А.

Предлагаются электрические и пневматические схемы компенсации отклонений. При этом обеспечиваемый ими диапазон движений не позволяет выполнять сочетанные движения: подъем и выравнивание как в статике, так и в динамике; не позволяет выполнять регулирование положения непрерывно в режиме реального времени.

Анализ научно-технической и патентной литературы показывает отсутствие системного подхода к проектированию инвалидного кресла-коляски, при котором приводы движения, подъема, поворота рассматриваются как единое устройство.

Актуальность указанных вопросов и отсутствие их универсального решения в условиях мегаполиса и развитой инфраструктуры обусловили выбор темы диссертационного исследования.

Цель и задачи исследования

Цель: разработка и исследование системы стабилизации инвалидного кресла-коляски (ИКК).

Задачи:

1. Анализ структуры прогулочных инвалидных кресел-колясок с электроприводом.
2. Разработка и исследование системы стабилизации положения сиденья прогулочной инвалидной кресла-коляски с электроприводом с рекуперацией энергии для увеличения дальности хода.
3. Разработка математической модели.
4. Разработка системы управления, обеспечивающей автоматическую стабилизацию.
5. Экспериментальное исследование системы стабилизации сиденья, включающей в себя кресло, модуль стабилизации, электропривод, пружинный аккумулятор, с целью разработки методики расчета.

Научная новизна

Исследованы существующие конструкции инвалидных кресел-колясок с системами стабилизации положения сиденья и предложена их классификация.

Исследовано положение пользователя в инвалидном кресле-коляске при отклонении в продольной плоскости для разработки медико-технических требований. Определены типовые операции при использовании инвалидной коляски в условиях мегаполиса.

Разработаны требования к инвалидным коляскам с системами стабилизации и уравнивания с учетом особенностей городской инфраструктуры.

Разработан макет инвалидного кресла-коляски с системой стабилизации и системой рекуперации энергии на базе пружинных аккумуляторов, а также его система управления.

Построена модель в MATLAB и исследована система управления стабилизацией сиденья инвалидного кресла-коляски как этап разработки цифрового двойника.

Теоретическая и практическая значимость

Предложенные методы конструирования инвалидных кресло-колясок позволяют проводить научно-обоснованный выбор конструкций модулей стабилизации в зависимости от условий инфраструктуры мегаполиса:

- для условия движения по эскалатору предложен способ стабилизации на основе скоростных и силовых актуаторов;
- для проектирования модулей стабилизации даны рекомендации по выбору их главных характеристик, разработаны алгоритмы расчета основных конструктивных размеров модулей;
- разработанный новый вид инвалидной кресло-коляски реализован в виде экспериментального образца;

- разработана идеология проектирования универсального инвалидного кресла-коляски с рекуперацией энергии на базе пружинных аккумуляторов и системой стабилизации, отклонения и изменения высоты сиденья;

- разработана модель в MATLAB для выбора параметров ключевых характеристик мехатронного инвалидного кресла-коляски и настройки его системы управления;

- разработана система управления стабилизацией, отклонением и изменением высоты корпуса ассиметричного колесного робота с четырьмя точками опоры и бортовым приводом на 4 колеса.

Апробация работы

Разработанная идеология проектирования использована при создании робота на четырех модулях стабилизации в ходе реализации гранта РФФИ № 19-38-90262 «Разработка и создание мехатронного модуля стабилизации, робота на его основе и разработка его системы управления».

Публикации

Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались на 10 конференциях и конгрессах: на конференции в ЛЭТИ «EIconRus 2021», в СПбПУ Петра Великого на «XLVIII международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ», в ФГБУ ФНЦРИ им. Г.А. Альбрехта Минтруда России на IV Национальном конгрессе «Реабилитация – XXI век: традиции и инновации» (2021 г.), а также дистанционно на конференции RESNA 2020, г. Техас.

По теме исследования опубликовано 18 печатных работ, из них 2 в журналах, рекомендуемых ВАК, и 4 публикации SCOPUS.

Промежуточные результаты работы по проекту были поддержаны (признаны победителем) в конкурсе грантов РФФИ, код конкурса: «Аспиранты». Научный руководитель: Жавнер В.Л. Проект № 19-38-90262: «Разработка и создание мехатронного модуля стабилизации, робота на его основе и разработка его системы управления», а также в Конкурсе лучших инновационных проектов в сфере науки и высшего образования Санкт-Петербурга в 2017 году, проект: «Повышение эффективности реабилитации инвалидов с нарушениями опорно-двигательного аппарата путем автоматизации технологий протезно-ортопедических изделий» и конкурсах грантов 2019 и 2020 годов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга:

- 1) в 2019 г. – проект: «Мехатронный модуль системы стабилизации положения платформы»;

- 3) в 2020 г. – проект: «Мехатронное инвалидное кресло-коляска».

Представление научного доклада: основные положения

При научных исследованиях и при разработке инвалидных кресел-колясок их надо рассматривать как единую взаимосвязанную реабилитационную биотехническую систему «инвалид – коляска – перемещение – городская инфраструктура».

Учет инфраструктуры города и его транспортной системы, в которой осуществляется «жизнь инвалида», необходим для выявления его типовых операций перемещения при проектировании мехатронных ассистивных устройств.

Рекуперация энергии пружинным аккумулятором в модуле системы стабилизации позволяет уменьшить затраты энергии на работу такого модуля.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, указана новизна.

Первая глава посвящена анализу научно-технической литературы по инвалидным креслам-коляскам с поддержанием положения сиденья. Представлены типовые операции пользователя ИКК для разработки медико-технических требований в дополнение к действующей нормативно-технической документации.

Проектируемое ИКК планируется к использованию в условиях современного мегаполиса. Для него характерна своеобразная среда обитания. Ее особенностью является высокая степень сформированности. Частными элементами являются пандусы с углом наклона более 10 градусов, надземные пешеходные переходы, эскалаторы.

Типовые операции, выбранные в исследовании:

- движение по горизонтальной поверхности;
- подъем и спуск по наклонной поверхности ($\alpha \leq 15^\circ$);
- въезд и съезд с эскалаторов
- максимальная высота преодоления одиночного препятствия – 100 мм;
- перемещение в вертикальном направлении вверх до высоты наиболее высокой точки сиденья 800 мм (посадка за высоким столом);
- перемещение в вертикальном направлении вниз – до высоты наиболее высокой точки сиденья 420 мм;
- подъезд к письменному столу (возможность разместиться за столом без задевания его подлокотниками);
- отъезд от стола задним ходом.

Из обзора научно-технической литературы следует сделать следующие выводы:

1. Не выявлено работ по созданию инвалидных кресел-колясок, при проектировании которых учитывались требования, предъявляемые инфраструктурой мегаполиса.
2. Движение на кресле-коляске с ручным приводом по пандусам связано с повышенными физическими нагрузками, отсутствием комфорта.
3. Движение по пандусу включает перемещение в вертикальном направлении против действия силы тяжести, что приводит к повышенному расходу энергии.
4. Использование кресла-коляски должно повышать мобильность оператора.

В разделе приведены функциональные узлы кресло-коляски, особенности проектирования, анализ преимуществ и недостатков имеющихся аналогов.

Функция вертикального перемещения. Типовые примеры механизмов вертикального перемещения кресла: линейный актуатор с электроприводом (рис. 1); механизм нюрнбергские ножницы с электроприводом.

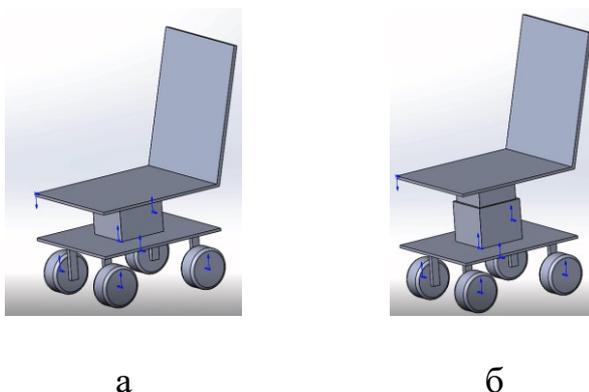


Рисунок 1 - Схема вертикального перемещения сиденья кресла-коляски: а) минимальная высота; б) максимальная высота

Функция стабилизации в продольной плоскости позволяет оператору ИКК сохранять поле зрения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Типовые примеры приводов (рис.9): наклон сиденья, поворот сиденья, рука-манипулятор, инерционное движение кресла.

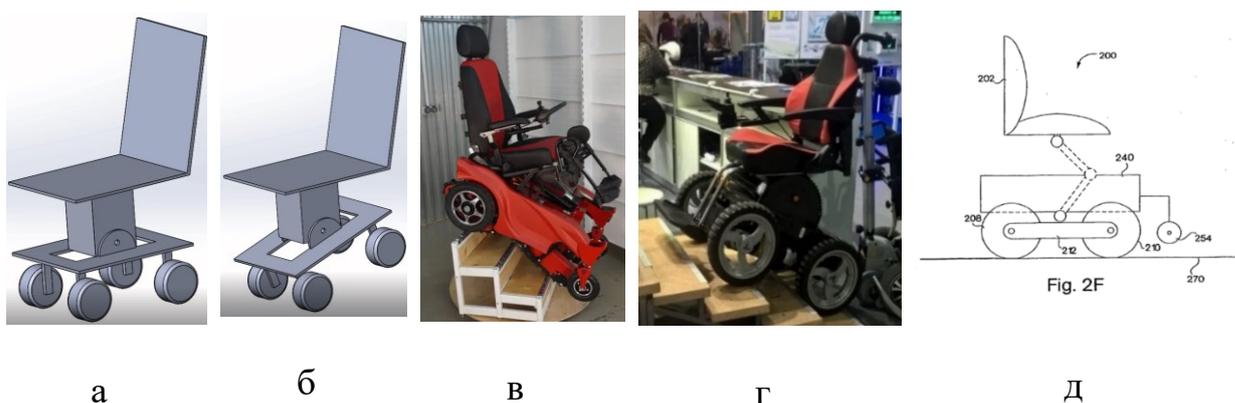


Рисунок 2 - Примеры устройств отклонения сиденья в продольной плоскости: а) схема ИКК в горизонтальном положении; б) схема ИКК при съезде лицом вперед; в) наклон сиденья - Caterwil GTS5; г) поворот сиденья - Observer Maximus; д) рука-манипулятор [патент EP 1 161 216 B1, 2005]

Из анализа научно-технической литературы и патентов по теме диссертации можно сделать следующие **выводы**:

Во-первых: отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по выбору систем стабилизации.

Во-вторых: одновременное поддержание положения в двух плоскостях и изменение высоты производятся только на малой скорости.

Таким образом, настоящая диссертация решает следующие научно-практические задачи:

1. Поиск нового конструктивного решения для системы стабилизации сиденья в условиях одновременного отклонения в нескольких плоскостях.
2. Исследование быстродействия и схемы обеспечения требуемого положения сиденья ИКК с целью разработки рекомендаций по ее применению.
3. Разработка и исследование универсального модуля стабилизации.

Во второй главе представлена информация о концепции проектируемой мехатронной инвалидной кресло-коляски применительно к типовым операциям ее использования, выполнен поиск нового конструктивного решения для решения вопроса обеспечения неподвижности сиденья в условиях одновременного отклонения в нескольких плоскостях, приведены структурно-функциональная и кинематические схемы.

Стабилизацию сиденья за счёт шасси ИКК можно сравнить с механизмами горизонтирования больших платформ, когда имеется четыре вертикальных привода относительно уровня горизонта (земли). Одним из возможных решений этой задачи является установка робота между сидением и шасси, что не выгодно из-за диссипативных потерь, обусловленных структурой робота.

В настоящее время широко принято в колесных транспортных средствах использовать 4 точки опоры – 2 оси, 4 колеса. Изменение высоты каждого колеса (точки опоры) не представляется возможным, в особенности – для оператора кресло-коляски. Узел изменения положения сиденья относительно каждого колеса должен обеспечивать более чем 1,5 кратное изменение высоты, а колесо (привод колеса) - малую (до 1,5 м/с) скорость прямолинейного движения. Кривошипно-шатунный механизм с плечами равной длины обладает рядом преимуществ:

1. выигрыш в диапазоне перемещения исполнительного звена – 2 радиуса кривошипа;
2. компактность модуля;
3. малое количество звеньев и сочленений.

На рисунке 3 изображены кинематические схемы модуля с системой уравнивания.

Модуль с системой уравнивания устроен следующим образом. Уравнивающее устройство состоит из звена 1 длиной $O_1O_2=L$, шарнирно соединенного с звеном 2, где L – расстояние между осями шарнирного соединения данного звена 1 с звеном 2 и шарнирного соединения с осью мотор-колеса 3. Длина звена 2 равна $O_1O_3=L+l$, где L – расстояние между осями шарнирного соединения данного звена 2 с звеном 1 и шарнирного соединения с рамой 4 инвалидной коляски, а l – это расстояние между осью

шарнирного соединения звена 2 с рамой и осью блока 4, установленного на звене 2. Звенья 1 и 2 образуют двухзвенник.

$$L=OO_1=O_1O_2, l=OO_3$$

Звено 1 шарнирно соединен с мотор-колесом 3. Привод 6 мотор-колеса 3 подвижно закреплен на раме 4. Мотор-редуктор с необратимой передачей 7 соединен с звеном 2. На раме 4, соосно с шарниром соединения звена 2 с рамой 4, неподвижно закреплен шкив 8 и установлена зубчатая ременная передача 9 с передаточным числом 2:1, другой шкив которой 10 закреплен на оси O_1 . Шкив 10 жестко соединен с звеном.

Такой модуль реализует работу пружинного аккумулятора в диапазоне $0 < q < \pi/2$. При этом возможна компоновка для работы в диапазоне $\pi/2 < q < \pi$ (рисунок а, б). Вариант б) отличается отсутствием плеча 1 звена 2, и расположением оси O_3 на расстоянии L от оси O , и конструктивным размещением блока 5 таким образом, чтобы прямая O_1O_3 являлась касательной к нему. Привод 7 может быть выполнен на основе актуатора.

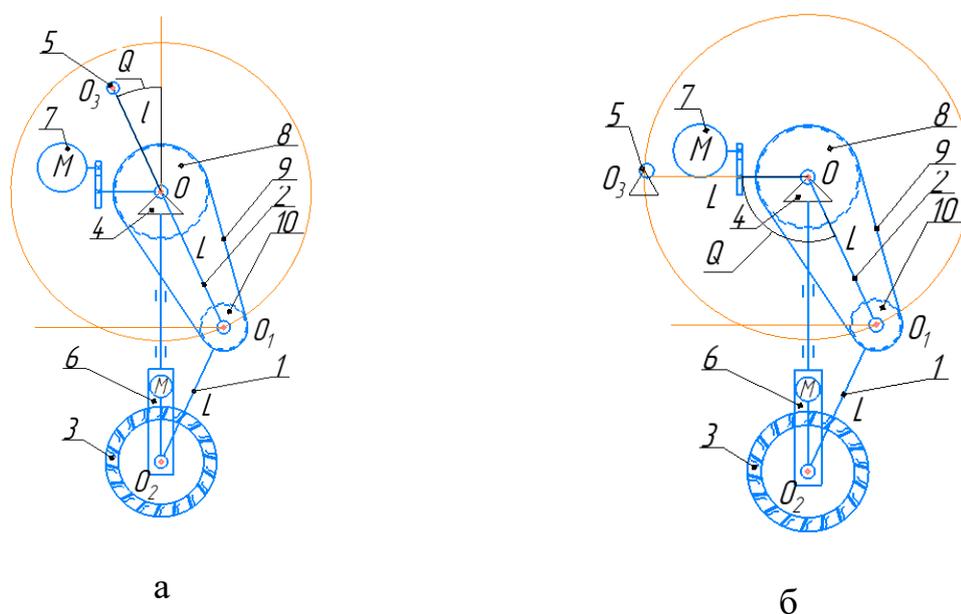


Рисунок 3 - Кинематические схемы модуля стабилизации: а) работа в диапазоне $0 < q < \pi/2$; б) работа в диапазоне $\pi/2 < q < \pi$

Рекуперация механической энергии позволяет сократить затраты энергии на приведение механизма в движение. Анализ конструкций в разделе 1 показал, что устройства рекуперации не применяются разработчиками.

В работе предлагается использовать пружинный аккумулятор - силовую пассивную систему уравнивания с источником энергии на основе сил упругой деформации.

На раме 3 шарнирно установлен блок 11, на котором запасован гибкий элемент 12, проходящий через блок 5 и соединенный с пружинами 13, жестко закрепленных на раме 3 в точке O_5 . Пружины 13, гибкий элемент 12 и блоки 5, 11 формируют пружинный аккумулятор. В случае использования пружин сжатия они должны быть поджаты на минимальное рабочее расстояние O_1O_3 ,

в случае использования пружин растяжения – они должны быть растянуты на это расстояние.

Исходя из медико-технических требований знаем минимальную ($h_{\text{мин}}$) и максимальную ($h_{\text{макс}}$) высоту сиденья ИКК. Соответственно, работа двухзвенника будет совершаться в определенном диапазоне угла сгибания q :

$$q \in (q_{\text{мин}}; q_{\text{макс}})$$

$$h_{\text{мин}} = r \sin q_{\text{макс}}$$

$$h_{\text{макс}} = r \sin q_{\text{мин}}$$

Для разрабатываемого ИКК работа совершается в диапазоне от 90 до 180 градусов. Примем, что длины плеч двухзвенника обеспечивают изменение угла q в диапазоне от 120 до 170 градусов (рисунок 4).

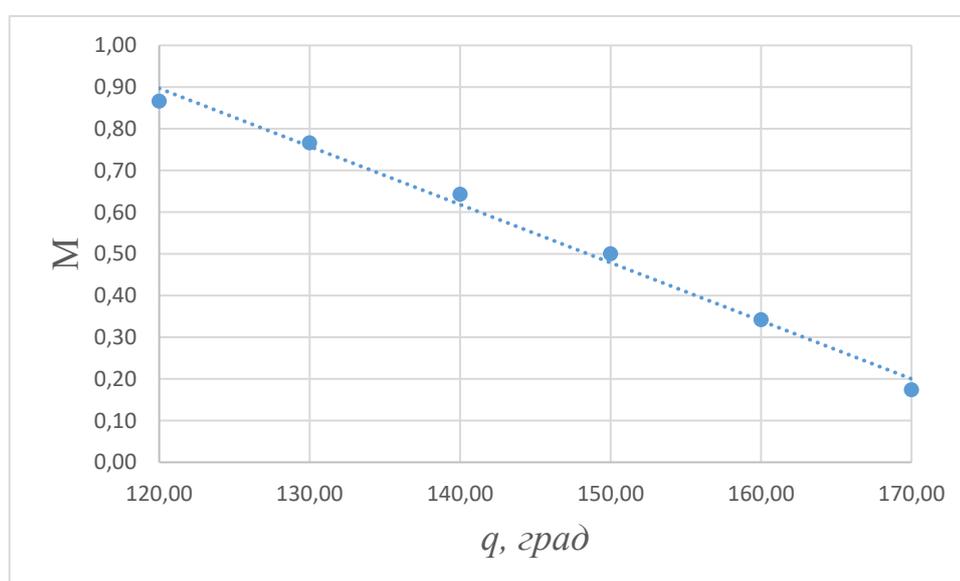


Рисунок 4 - График крутящего момента на оси двухзвенника модуля стабилизации с пружинным аккумулятором в диапазоне $q \in (120^\circ; 170^\circ)$

Анализ рисунка 4 показывает, что изменение угла q в рассматриваемом диапазоне можно аппроксимировать как линейную функцию.

$$M = -0.0139q + 2.5688$$

Момент вращения $M_{\text{кр}}$, обусловленный действием пружины:

$$M_{\text{кр}} = P_{\text{пр}} * h$$

Мощность пружины определяется по формуле:

$$P_{\text{пр}} = c * \Delta l$$

Учитывая, что:

$$\Delta l = O_1 O_2 = 2r \cos \frac{q}{2}$$

подставим это выражение в формулу расчета мощности пружины:

$$P_{\text{пр}} = 2cr \cos \frac{q}{2}$$

Тогда момент вращения $M_{\text{кр}}$:

$$M_{\text{кр}} = c * 2r \cos \frac{q}{2} * r \sin \frac{q}{2} = cr^2 * 2 \cos \frac{q}{2} \sin \frac{q}{2} = cr^2 \sin q$$

Задача системы уравнивания состоит в компенсации момента $M_{кр}$. Таким образом, уравниваем возникающие моменты:

$$M_{кр} = M_{ур}$$

$$cr^2 \sin q = mg(-2r \sin \frac{q}{2})$$

Следовательно, жесткость пружины равна:

$$c = \frac{2mg \sin \frac{q}{2}}{r \sin q}$$

Расчет усилия пружины:

$$P_{max} = C_1 * f_1$$

Расчет жесткости одного витка пружины:

$$C_n = \frac{C_1}{n}$$

где n – количество витков.

Рассмотрим пример расчета. При суммарной массе пользователя и подпрессоренной массы коляски 130,5 кг на один модуль подвески приходится масса $m = 32,6$ кг. Длина звена модуля стабилизации составляет $r = 275$ мм. Угол $q = 120^\circ$. Тогда:

$$c = \frac{2mg \sin \frac{q}{2}}{r \sin q} = \frac{2 * 32,6 * 9,81 * \sin \frac{120}{2}}{0,275 * \sin 120} = 2,33 * 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{с}^2} = 2,33 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Удлинение пружины составляет:

$$\Delta l = 2r \cos \frac{q}{2} = 2 * 275 * \cos(60) = 275 \text{ мм}$$

Усилие пружины составит:

$$P_{пр} = 2cr \cos \frac{q}{2} = 2 * 2,33 * 275 * \cos 60 = 640,75 \text{ Н}$$

Пружины растяжения подбираются, например, по ГОСТ 13775-86.

В третьей главе приведена техническая идеология проектирования, выполнены расчеты усилия пружины системы уравнивания (пружинного аккумулятора). Приведена математическая модель, алгоритм управления и модель в MATLAB. Приведены результаты исследования.

На раме 4 установлено не менее одного модуля с системой уравнивания. На раме 4 установлены контроллер, измерительное устройство, в состав которого входят гироскоп и акселерометр, датчики высоты. На рисунке 5 изображены возможные конфигурации шасси. На рисунке 5,а представлена расположение ног ИКК при движении эскалатора, при этом пружинные аккумуляторы могут быть расположены в подлокотниках, а приводы сгибания – ниже сиденья; на рисунке 5,б – вариант въезда на наклонную поверхность, пружинные аккумуляторы и приводы сгибания расположены в подлокотниках.

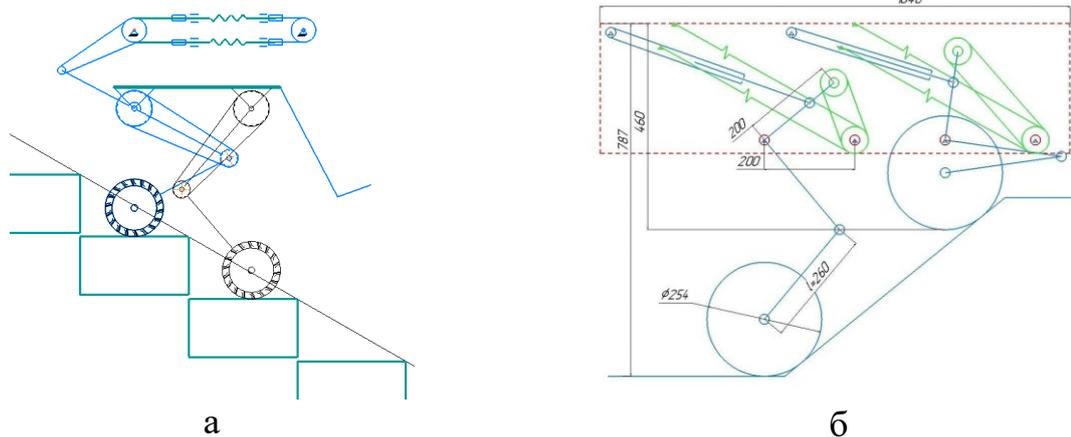
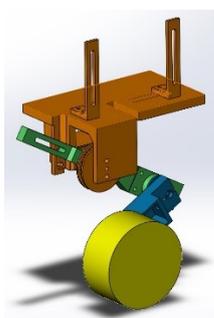
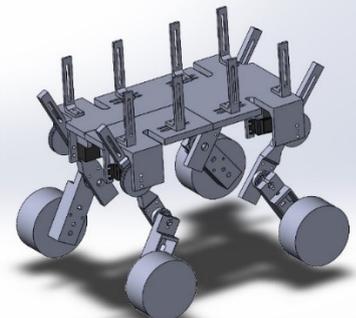


Рисунок 5 - Возможные конфигурации шасси: а) схема движения разрабатываемого ИКК по эскалатору; б) вариант компоновки шасси с указанием геометрических размеров элементов

На рисунке 6 представлен лабораторный макет шасси и его модели в MATLAB – как одного модуля, так и сборка.



а



б



в

Рисунок 6 - Масштабный макет: а) 3D модель одного модуля; б) общий вид электронной модели макета; в) собранный макет

На рисунке 7 представлен пружинный аккумулятор в сборе. Для упрощения этапа сборки предложено использовать 4 пружины вместо одной.

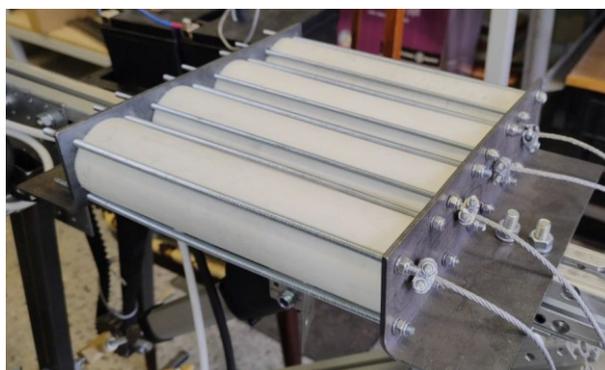


Рисунок 7 - Пружинный аккумулятор на базе 4-ех пружин

На рисунке 8 представлен полноразмерный макет разработанного мехатронного инвалидного кресла-коляски. Он включает раму, 4 модуля изменения высоты, пружинные аккумуляторы, сиденье и подножки оператора, пульт управления, источник питания.

Мощность привода колеса при движении по пандусу с углом наклона 10° должна составлять не менее 168 Вт.

Моменты от промежуточного звена кривошипно-кулисного механизма с электроцилиндром и пружинного аккумулятора обеспечивают требуемый закон движения. Первая геометрическая передаточная функция кривошипно-кулисного механизма определяет соотношение между моментом на выходном звене и усилием электроцилиндра, а также соотношение между угловой скоростью промежуточного звена и линейной скоростью штока электроцилиндра.

На рисунке 9 представлена компоновка кривошипно-кулисных механизмов: с пружиной растяжения и с электроцилиндром, с общим выходным поворотным звеном, соединяемым с входным рычагом передаточного механизма.

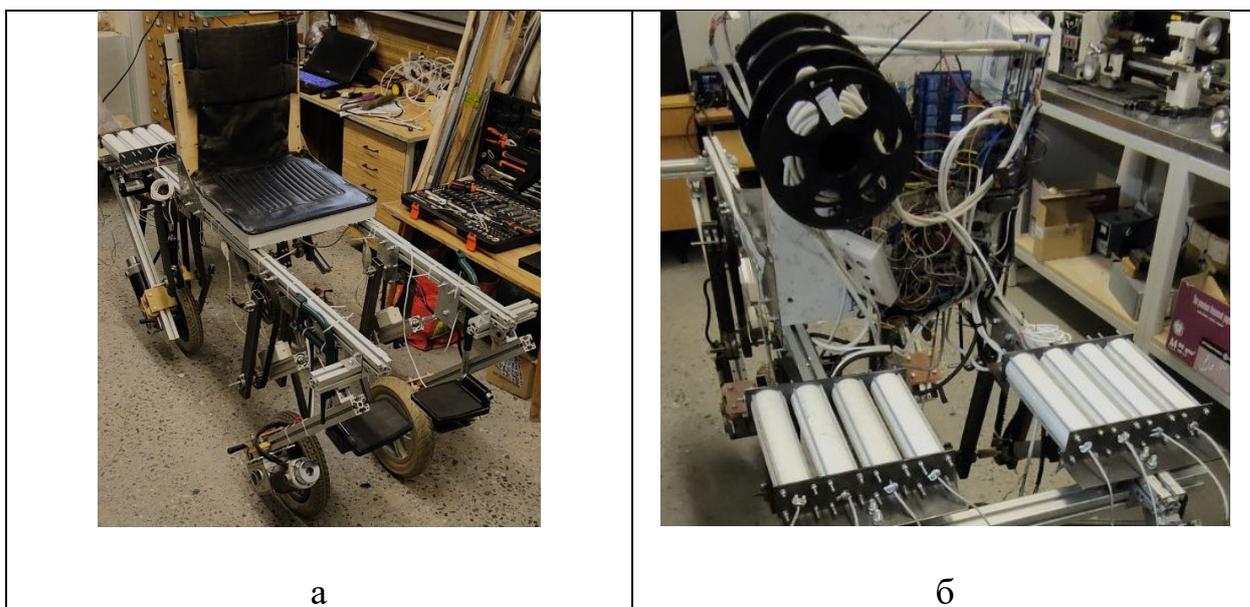


Рисунок 8 – Мехатронное инвалидное кресло-коляска (макет), подлокотники не показаны: а) общий вид; б) вид сзади на плату управления и пружинные аккумуляторы

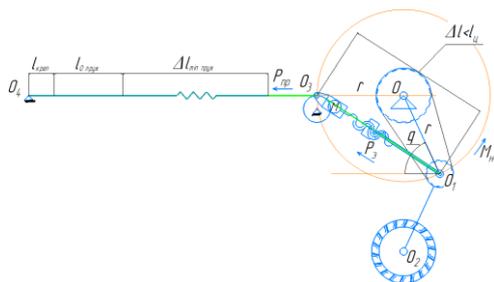


Рисунок 9 - Схема модуля стабилизации

Движение выходного звена происходит под действием усилия электроцилиндра. Момент нагрузки M_n определяется приведённым моментом инерции к промежуточному звену. В соответствии с теоремой Эри работа электроцилиндра на угле поворота q^* определяется в соответствии с формулой

$$A_{Ц} = 0,1P_{Ц}(2L_{Ц} - \Delta L_{ш})$$

$P_{Ц}$ – максимальное усилие на штоке электроцилиндра;

$L_{Цmax} = 2r$ – максимальный ход штока электроцилиндра;

$\Delta L_{ш}$ – рабочий ход штока электроцилиндра, обеспечивающий компенсацию диссипативных потерь.

Первая геометрическая передаточная функция кривошипно-кулисного механизма равна:

$$P'_{ш}(q) = \frac{\dot{L}_{ш}}{\dot{q}} = \frac{-r \sin \frac{q}{2}}{2r \cos \frac{q}{2}}$$

На рисунке 10 показан график первой геометрической передаточной функции кривошипно-кулисного механизма при $r = 1$. Для рассматриваемых диапазонов перемещения рабочие участки могут быть аппроксимированы в прямые.

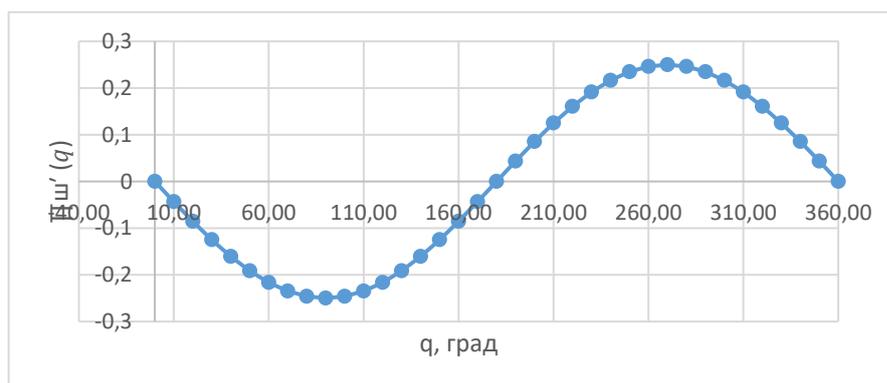


Рисунок 10 - График геометрической первой передаточной функции

Одной из задач проектируемого ИКК является обеспечение движения на эскалаторе. Движение по эскалатору включает въезд, фазу поддержания положения и съезд. Для определения требуемой скорости продольного выравнивания сиденья коляски в вертикальной оси возьмём режим работы при въезде на движущийся эскалатор.

Для расчета быстродействия использовался ГОСТ Р 54765-2011 (ЕН 115-1:2010) «Эскалаторы и пассажирские конвейеры. Требования безопасности к устройству и установке» (рисунок 11). Согласно приложению В, п. В.1., и п. 5.4.2 ГОСТ Р 54765-2011 были определены и рассчитаны скорости перемещения ступеней эскалатора. Скорость относительного вертикального перемещения ступеней эскалатора $V_{эск}$ не превышает 0,08 м/с. Так как в изменении высоты участвуют 2 звена, то необходимо обеспечить $V_h \geq 0,04$ м/с.

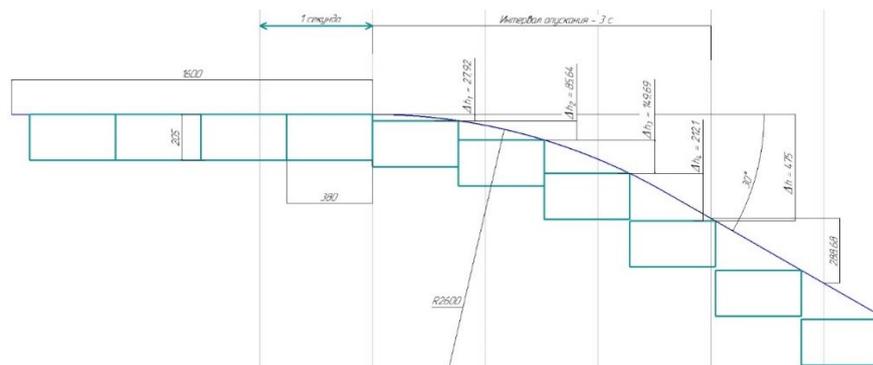


Рисунок 11 – Схема работы эскалатора на спуск

Контроллер управления силовыми актуаторами (таблица 1) собран на базе драйверов коллекторных двигателей (2 шт.), контроллер скоростных актуаторов - на базе драйверов ЛЕСРА (2 шт.). Изменение высоты в принудительном режиме обеспечивается как с потенциометра, так и с клавишного переключателя. Изменение высоты в автоматическом режиме осуществляется по сигналам с сенсоров.

Таблица 1. Характеристики используемых силовых и скоростных электроприводов.

Характеристика	ЛА1-24-8-2000-150	LEY25C-100WMD-R3AN3
Усилие на штоке (кгс)	200	32,5
Минимальная длина (между осями) (мм)	285	174
Ход (мм)	150	100
Максимальная скорость (без нагрузки) (мм/с)	8,7	125

Был собран испытательный стенд на базе двух пневмоцилиндров. Пневматическая схема представлена на рисунке 12. Она содержит: два двухпозиционных пневмораспределителя с управлением от соленоида и пружинным возвратом в исходное положение; два пневмоцилиндра; два крана; источник подготовленного сжатого воздуха.

Испытательный стенд представлен на рисунке 13. Он содержит мобильную раму на четырех поворотных колесах с фиксаторами, основание для пневмоцилиндров, два пневмоцилиндра, их систему управления, раму для ограничения перемещения мехатронного модуля. На рисунке 14 представлена блок регистрации тока в цепи питания актуаторов на базе датчика тока LA-55-R, подключенного к устройству сбора данных myDAQ, NI. Полученные данные регистрируются на персональном компьютере в среде LabView 2019.

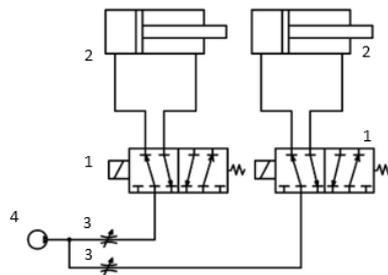


Рисунок 12 - Пневматическая схема испытательного стенда

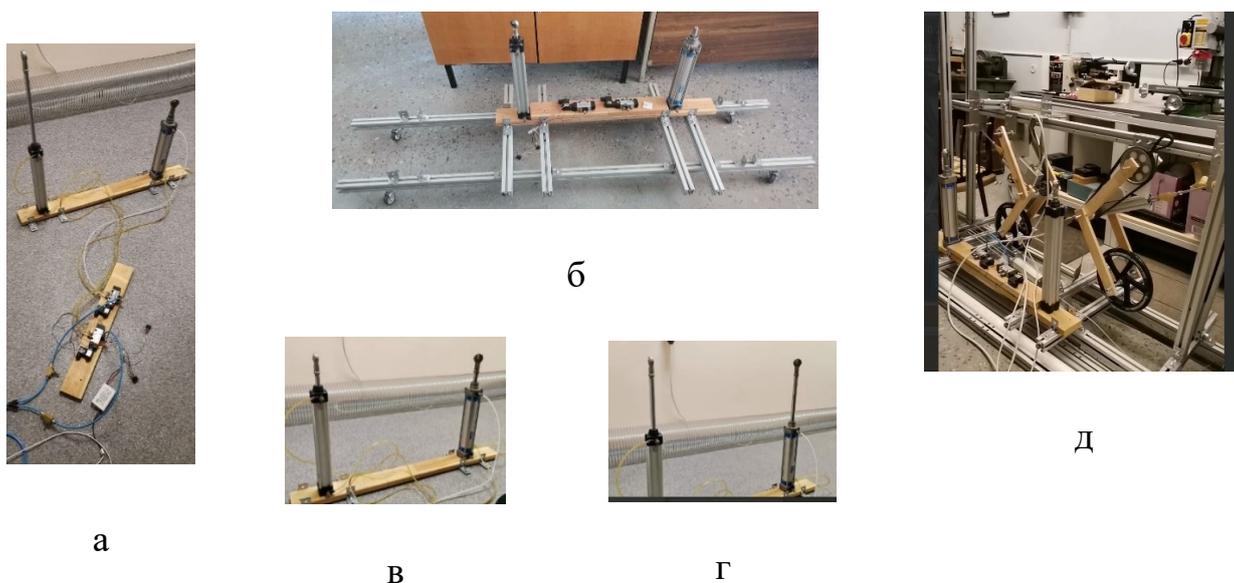


Рисунок 13 - Испытательный стенд: а) отладка системы управления, б) испытательный стенд, в) штоки задвинуты, г) штоки выдвинуты; д) борт макета ИКК на стенде

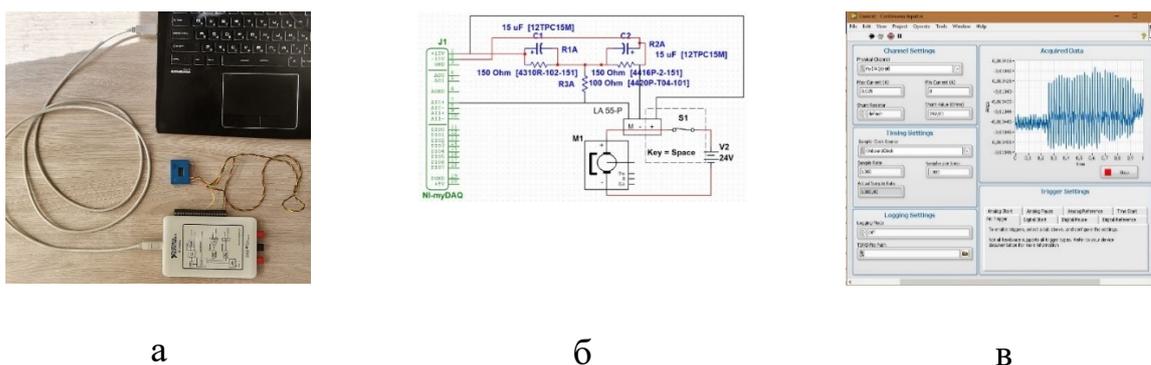


Рисунок 14 - Блок регистрации тока: а) myDAQ с датчиком тока LA-55-P, б) схема подключения датчика тока LA-55-P, в) окно регистрации данных в NI LabView2019 с драйверами ELVISmx

Структурно-функциональная схема разрабатываемого ИКК представлена на рисунке 15. Рабочим органом является модуль, который обеспечивает компенсацию отклонения сиденья ИКК. Информационно-измерительный комплекс включает 4 блока по 2 концевых выключателя,

установленных в крайних положениях на каждом из модулей для автоматического отключения приводов стабилизации. Исходная информация об углах наклона сиденья (рамы) кресла-коляски и наличии препятствий и изменения рельефа поступает с инерциального измерительного устройства и датчиков расстояния, установленных на подножках.

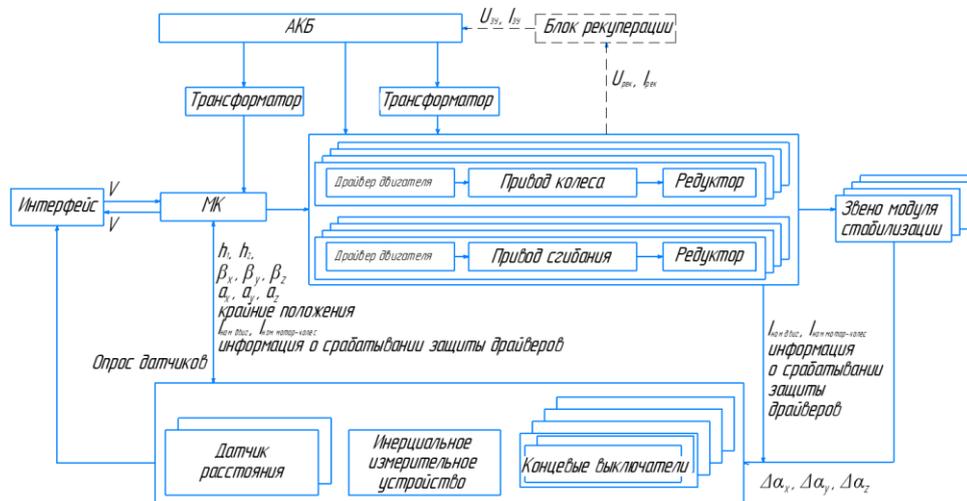


Рисунок 15 – Структурно-функциональная схема: МК – микроконтроллер; АКБ – аккумуляторная батарея

Алгоритм работы системы стабилизации. Датчики расстояния на подножках определяют минимальное расстояние до поверхности движения. Передняя нога борта коляски с минимальной высотой становится ведущей, остальные ноги – изменяют угол сгибания относительно нее путем расчета вертикального отклонения на основе матриц поворота. Изменение высоты ведущей ноги производится по обратной связи с датчика расстояния так, чтобы расстояния до поверхности было не менее минимального. Таким образом реализуется управление стабилизацией ассиметричного полноприводного колесного робота на четырех точках опоры. Управление приводами организовано на основе PID регуляторов.

Синергетический эффект работы модулей состоит в следующем. Для обеспечения изменения высоты - подъема или опускания рамы 4 - на ровной поверхности, производится одновременное включение модулей и перемещение рамы 4 вверх или вниз соответственно.

При необходимости изменения высоты рамы 4 до поверхности с сложным или переменным рельефом, по команде оператора производится включение модулей и перемещение рамы 4. При этом для контроля расстояния до поверхности опоры и обеспечения этого расстояния не менее допустимого учитывается сигнал с измерительного устройства и датчиков высоты. Управление движением и изменением направления движения реализована по типу бортового управления. Таким образом в системе отсутствуют приводы поворота колес и рулевое управление.

На рисунке 16 представлена модель робота в Simulink (MatLab, Mathworks Inc.). На рисунках 17-18 показаны узлы модели.

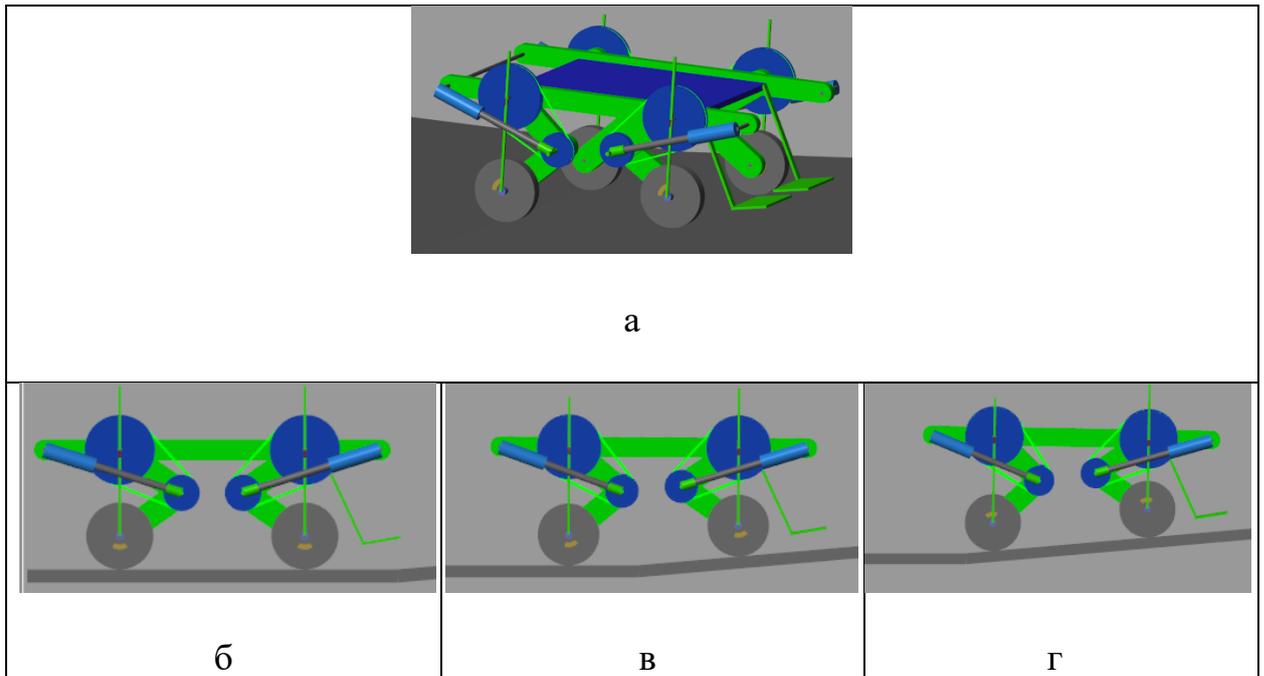


Рисунок 16 – Модель робота в MATLAB, стабилизация при въезде на пандус: а) изометрия модели робота; б) начальное положение (средняя высота); в) въезд на пандус; г) фаза движения по пандусу

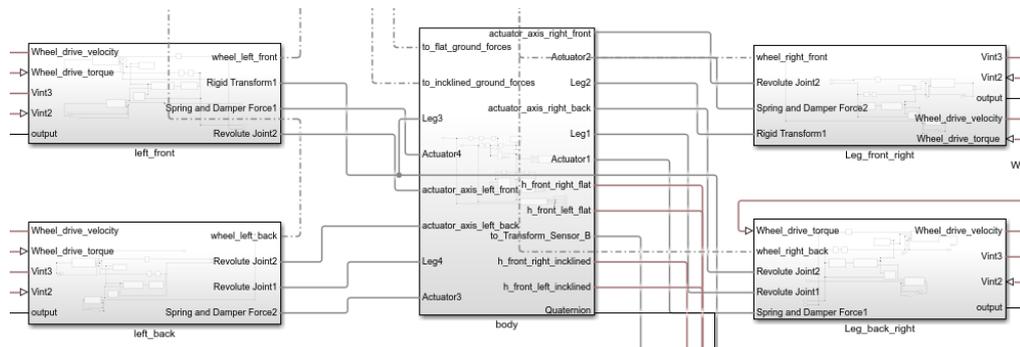


Рисунок 17 - Блоки тела и ног инвалидного кресла-коляски

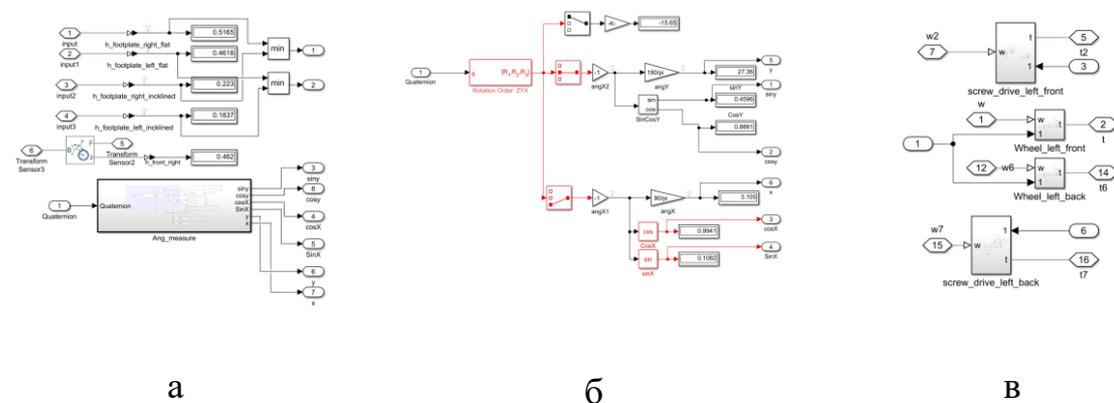


Рисунок 18 – Блоки модели робота в MATLAB: а) измерение расстояния; б) измерение углов отклонения; в) приводы борта

На рисунке 19 представлены результаты исследования изменения высоты рамы в малом диапазоне перемещения (10 см).

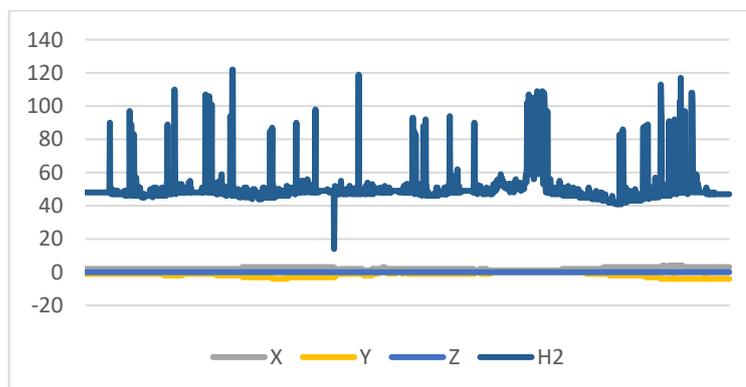


Рисунок 19 - Результаты исследования изменения высоты рамы

На графике 20 представлены результаты натурального моделирования изменения высоты макета: задающий сигнал, нагрузочная характеристика и значения с сенсоров - результат обработки системой шести задающих сигналов. Первые три обрабатывались с пружинным аккумулятором, но без полезной нагрузки, следующие три – с полезной нагрузкой.

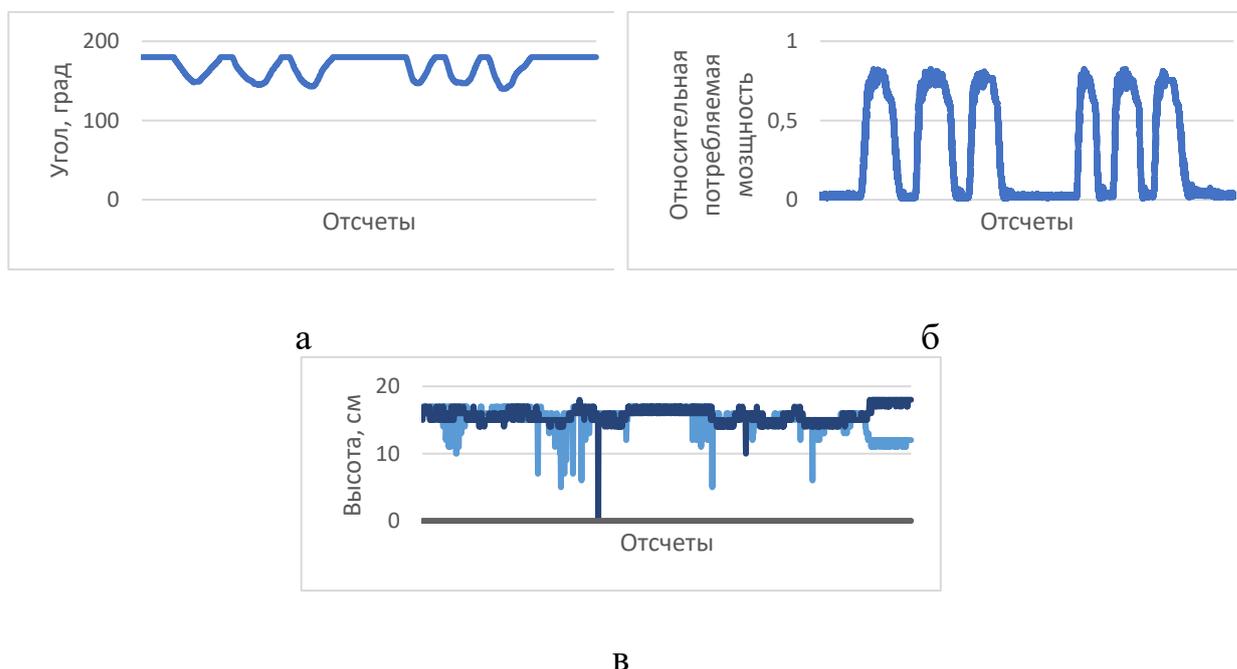


Рисунок 20 - Результаты исследования изменения высоты рамы: а - задающий сигнал сгибания модулей; б - график потребляемой мощности, NI myDAQ; в – значения с датчиков высоты

Из анализа рисунка 20 следует, что, несмотря на ограничения метода измерения, без полезной нагрузки (в первом случае) в процессе опускания изменение высоты происходило с небольшой задержкой, так как приводы

сгибания модулей работали на растяжение пружин. С полезной нагрузкой (при уравнивании крутящего момента пружин) – опускание платформы происходило быстрее, а подъем платформы происходил с минимальными затратами энергии за счет взаимной компенсации веса полезной нагрузки и усилия пружин. Показано, что при работе пружинных аккумуляторов и наличии полезной нагрузки затраты энергии на работу двигателей модулей меньше, чем при отсутствии полезной нагрузки.

Объекты, (предмет) и методы исследования

Объект исследования – платформа с мехатронными модулями линейного перемещения выходного звена с ременной передачей с системой рекуперации на базе цилиндрических пружин сжатия.

Предмет исследования – геометрические, динамические и силовые характеристики мехатронных модулей.

Методология и методы исследования. В процессе исследования применялись методы теории машин и механизмов, теоретической механики, анализа и синтеза систем автоматического управления. Информационной базой исследования явились материалы, опубликованные в открытой печати. Модель робота построена в среде Simulink (MatLab, Mathworks Inc.), с использованием библиотек Simscape Multibody, Simscape Electrical, Simscape Driveline, Simulink Control Design, Aerospace Toolbox.

Результаты и их обсуждение

Предложена конструкция и определены характеристики рабочих диапазонов мехатронных модулей с рекуперацией энергии, в которых снижаются энергетические затраты и обеспечиваются благоприятные динамические режимы. Разработаны рекомендации по использованию модулей с использованием нелинейных пружинных аккумуляторов для стабилизации сиденья ИКК, что позволяет обеспечить необходимую дальность хода и широкий диапазон перемещений сиденья ИКК. Приведена методика определения конфигурации ИКК при перемещении на эскалаторе. Показано, что использование рекуперации энергии позволяет сократить энергопотребление. Разработана система управления инвалидной кресло-коляской с изменением положения сиденья (стабилизацией, изменение высоты и отклонением).

Вывод: Разработанная мехатронная система, включающая привода и программное обеспечение к ней, обеспечивает её универсальность, выраженную в широком диапазоне изменения углов установки сиденья относительно поверхности движения, при этом обеспечивается неизменность положения оператора ИКК. Программное обеспечение может использоваться и для других видов ИКК при любом другом диапазоне массы и роста оператора ИКК.

Заключение

Выполнен обзор и анализ структуры инвалидных кресел-колясок с электроприводом.

Предложены кинематические схемы системы поддержания положения сиденья прогулочной инвалидной кресла-коляски с электроприводом, методика расчета пружин для рекуперации энергии для увеличения дальности хода.

Предложена математическая модель и разработана модель стабилизации платформы в ПО MATLAB.

Предложена методика расчета системы стабилизации, включающей в себя кресло, модуль, электропривод, пружинный аккумулятор.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Головин М.А., Шестаков К.Д., Сафаров В.Д. Разработка мехатронного модуля с уравнивающим устройством и создание робота на его основе / Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8-1 (110). С. 60-68.
2. Жавнер М.В., Головин М.А., Ли С. Использование нелинейных пружинных аккумуляторов в системах уравнивания и мехатронных пружинных приводах / Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 4. С. 330-337.

Публикации в других изданиях

В журналах и сборниках конференций, индексируемых в реферативной базе Scopus

1. Golovin, M. A. Development and Research of a Platform Stabilization Module Mathematical Model / M. A. Golovin // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2021. – Vol. 44. – No 9. – P. 45-52.
2. Golovin, M. A. Mechatronic Stabilization System for Wheelchair Seat / M. A. Golovin // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021, Moscow, 26–28 января 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 903-906. – DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396397.
3. Wheelchair Stabilization and Control System / M. A. Golovin, X. Liu, J. Zhang, W. Wu // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020, St. Petersburg and Moscow, 27–30 января 2020 года. – St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 653-655. – DOI 10.1109/ElConRus49466.2020.9039384.
4. Golovin, M. A. Wheelchair balancing control system / M. A. Golovin, A. R. Sufelfa // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, Saint Petersburg - Moscow, 28–30 января 2019 года. – Saint Petersburg - Moscow: Institute of

Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 514-517. – DOI 10.1109/EIConRus.2019.8656780.

В других изданиях

1. Реабилитация инвалидов: Национальное руководство. Краткое издание / А. Н. Разумов, Г. Р. Абусева, А. О. Андриевская [и др.] ; Межрегиональная общественная организация "Научное общество физической и реабилитационной медицины". – Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательская группа "ГЭОТАР-Медиа", 2020. – 544 с. – ISBN 9785970456187. – DOI 10.33029/9704-5618-7-REI-220-1-544.
2. Головин, М. А. Динамическая стабилизация подвижной платформы / М. А. Головин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020 : Сборник тезисов. Секция «Круглый стол молодых ученых» VII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23–24 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 84-88.
3. Головин, М. А. Разработка макета модуля стабилизации мехатронного инвалидного кресла-коляски / М. А. Головин // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 29-31.
4. Щербина, К. К. Разработка системы стабилизации положения платформы кресла-коляски для инвалидов / К. К. Щербина, А. Р. Суфэльфа, М. А. Головин // Первый Югоосетинско-Российский симпозиум по медико-социальной реабилитации : Сборник публикаций I-го югоосетинско-российского симпозиума «Медикосоциальная реабилитация», Цхинвал, 29 октября 2018 года / Министерство здравоохранения и социального развития республики Южная Осетия. Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации. Первый московский государственный медицинский университет имени И.Н. Сеченова (Сеченовский университет) Министерства здравоохранения Российской Федерации. – Цхинвал: МО: Осипов А.А., 2019. – С. 102-104.
5. Головин, М. А. Анализ физиологических движений стабилизации в отделах позвоночника при движении по пандусу в инвалидном кресле-коляске / М. А. Головин, Е. А. Скребенков, А. А. Кольцов // Физическая и реабилитационная медицина. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 38-41. – DOI 10.26211/2658-4522-2019-1-1-38-41.
6. Головин, М. А. Стабилизация положения пациента в инвалидном кресле-коляске реабилитации при болезнях позвоночника / М. А. Головин, А. А. Першин // Ортотерапия межведомственное и междисциплинарное взаимодействия в клиническом ортезировании и реабилитации : Материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 18–19 мая 2018 года. – Санкт-Петербург: Без издательства, 2018. – С. 12-13.
7. Головин, М. А. Показания к использованию мехатронного инвалидного кресла-коляски с фиксированным положением сиденья / М. А. Головин, А. А.

Першин // Технологии реабилитации: наука и практика : Материалы Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 25–26 апреля 2018 года / Главный редактор Г.Н. Пономаренко. – Санкт-Петербург: ООО "Р-КОПИ", 2018. – С. 164-165.

8. Головин, М. А. Анализ компенсаторных движений в отделах позвоночника при движении по пандусу в инвалидном кресле-коляске / М. А. Головин, Е. А. Скребенков, А. А. Кольцов // Реабилитация - XXI век: традиции и инновации : Сборник статей материалов II Национального конгресса с международным участием, Санкт-Петербург, 12–13 сентября 2018 года / Главный редактор Г.Н. Пономаренко. – Санкт-Петербург: ООО "ЦИАЦАН", 2018. – С. 303-306.

9. Суфэльфа, А. Р. Разработка системы стабилизации хирургического операционного стола в мобильной транспортной системе / А. Р. Суфэльфа, М. А. Головин // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2018 : Сборник трудов XXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 04–06 декабря 2018 года / Под общей редакцией В.И. Жулева. – Рязань: И.П. Коняхин А.В. (Book Jet), 2018. – С. 477-479.

10. Суфэльфа, А. Р. Разработка системы управления мехатронным модулем подвески платформы с уравниванием / А. Р. Суфэльфа, М. А. Головин // Биотехнические, медицинские, экологические системы и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2018 : Сборник трудов XXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 04–06 декабря 2018 года / Под общей редакцией В.И. Жулева. – Рязань: И.П. Коняхин А.В. (Book Jet), 2018. – С. 479-482.

11. Головин, М. А. Способ уменьшения габаритных размеров системы уравнивания на базе нелинейного пружинного аккумулятора / М. А. Головин, О. Н. Мацко, В. Л. Жавнер // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2018. – С. 12-14.

12. Головин, М. А. Вариант компоновки инвалидного кресла-коляски для перемещения по неровным поверхностям / М. А. Головин, В. Л. Жавнер // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 11-14.

Аспирант _____ ФИО

(подпись)