

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ОРЕЛ ЕГОР ОЛЕГОВИЧ

**Повышение энергетической эффективности систем тягового электропривода  
автономных транспортных средств**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор Аносов Владимир Николаевич

Новосибирск 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ .....	11
1.1 Проблема повышения энергетической эффективности .....	11
1.2 Использование комбинированных энергоустановок .....	16
1.3 Виды источников энергии .....	20
1.4 Типы тяговых электроприводов .....	35
1.5 Алгоритмы управления .....	39
Выводы по главе 1 .....	49
ГЛАВА 2 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	50
2.1 Выбор испытательного цикла движения .....	50
2.2 Выбор элементов тягового электропривода.....	54
2.2.1 Расчёт тягового двигателя.....	54
2.2.2 Выбор типа двигателя.....	58
2.2.3 Мотор-колесо на базе BLDC-двигателя.....	61
2.2.4 Коммутация обмоток BLDC двигателя .....	67
2.3 Буферный накопитель энергии .....	69
Выводы по главе 2.....	72
ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	73
3.1 Источник бесконтактного подвода энергии .....	73
3.2 Синтез системы автоматического управления тяговым электроприводом ..	86
3.3 Нейросетевой наблюдатель тягового момента двигателя .....	87
3.4 Нейрорегулятор момента тягового двигателя.....	90
3.5 Исследование работы системы с буферным накопителем энергии.....	95

Выводы по главе 3.....	97
ГЛАВА 4 АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В ПРОСТРАНСТВЕ.....	99
4.1 Сенсоры.....	100
4.2 Локализация и картографирование.....	105
4.3 Принцип планирования движения.....	106
4.4 Оптимальное управление навигацией.....	108
4.5 Экспериментальное исследование.....	113
4.5.1 Система навигации.....	113
4.5.2 Сравнение одной и двух камер глубины.....	115
4.5.2 Локализация.....	120
Выводы по главе 4.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А Алгоритм обучения с подкреплением TD3.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технические характеристики камер Intel Realsense d435i.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	153

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Переход к электрическим транспортным средствам (ТС) – одна из главных тенденций современности. Активность в этом направлении связана со стремлением внести вклад в борьбу с проблемами загрязнения природы, ограниченности ископаемых ресурсов, доставки товаров из логистических центров до потребителей в крупных населенных пунктах с загруженным автомобильным движением, оптимизации логистических процессов на предприятиях [1].

Внимание к решению обозначенных проблем отражено в стратегических документах коммерческих и государственных автопредприятий. *Volkswagen* вкладывает миллиарды евро для создания экологически чистых автомобилей с электрическими или гибридными энергоустановками. Запланированная доля электромобилей в общих продажах – 60% к 2030 году [2]. *Nissan* нацелен продавать ежегодно один миллион гибридных и полностью электрических автомобилей в рамках программы развития "*MOVE-to-2022*" [3]. А компания *Tesla*, мировой лидер индустрии электромобилей, выпустила на рынок 1.31 миллиона автомобилей в 2022 году, что составляет почти 300%-ный рост относительно продаж 2020 года [4, 5]. Стратегические замыслы по распространению электромобилей в качестве составляющей части «зеленого» развития существуют и в российском нормотворчестве: 23 августа 2021 года было принято постановление Правительства РФ №2290-р [6], в котором рассматриваются целевые показатели по производству электрического транспорта и развитию зарядной инфраструктуры до 2030 года.

Рост промышленного производства и увеличение его объема неизбежно влечет за собой использование автоматизированных систем и роботизированных, в том числе транспортных, комплексов. При эксплуатации транспортных средств (ТС) в закрытых помещениях предпочтителен отказ от двигателей внутреннего сгорания с целью снижения вредного воздействия выхлопных газов на здоровье сотрудников. В связи с этим, всё больше ТС для использования на предприятиях выпускается с электрическими двигателями.

Одним из этапов в развитии систем автоматизации является применение

автономных транспортных средств с электрическим приводом. Согласно классификации *SAE International (Society of Automotive Engineers International)* выделяют следующие шесть основных уровней автономности для продвинутых систем помощи при вождении (*ADAS – Advanced Driver Assistance System*): от 0 (ручное управление с предупреждениями об опасности) до 5 (полностью беспилотное управление без участия человека). Общепринятый уровень автономности для автомобильного транспорта – третий или четвертый, в то время как производственный транспорт стремятся сделать полностью автономным. Среди наиболее известных отечественных исследований в области беспилотного вождения – разработка и запуск в Москве и Иннополисе беспилотного такси компанией Яндекс [7] и начало эксплуатации беспилотных грузовиков компании КАМАЗ для доставки грузов по зимникам между стоянками в Заполярье [8]. В мировом масштабе безоговорочным лидером является компания *Tesla* [9, 10].

Для определения оптимального управления автономным транспортным средством используются следующие критерии: минимальный расход энергии и минимальная длина пути от начальной точки до конечной на безопасном удалении от объектов окружающей среды. При работе в среде, связанной с людьми, наиболее важным фактором является безопасность. Поэтому, сначала вычисляется безопасная траектория, а потом происходит отработка желаемого движения с минимальным потреблением энергии.

С распространением электрических ТС возрастает актуальность проблемы повышения энергоэффективности электроприводов. Важную роль играет выбор системы питания. Бесконтактный подвод энергии от питающей линии к электрическому ТС является одним из наиболее перспективных способов обеспечения его энергетической автономности. В частности, большой интерес вызывает способ передачи энергии с использованием электромагнитной индукции.

**Степень разработанности темы исследования.** Тема индукционного подвода электроэнергии к ТС практически не освещена в отечественной литературе. Одни из последних значимых работ были опубликованы советским изобретателем Г.И. Бабатом в середине XX века [11, 12]. В зарубежной литературе

данной теме уделяется несколько большее внимание. Основоположником идей индукционной передачи энергии считается Н. Тесла [13]. С 1990-х годов были предложены различные системы индукционного подвода энергии (ИПЭ) для стационарных и динамических методов беспроводной зарядки электромобилей на основе индукционной связи между несколькими катушками, в том числе разработанные Оклендским университетом, США [14-18], специалистами компаний *Bombardier*, Канада [19-24], Окриджской национальной лаборатории, США [25, 26]. С 2009 года Корейский институт науки и технологий (*KAIST*) совершил большой прорыв в реализации технологий ИПЭ от кабеля, заложенного в дорожном полотне [27-37]. Однако, ни одна из работ не предусматривает описания такого источника питания как элемента системы автоматического управления.

Вопрос энергоэффективного управления тяговым электрическим приводом на низком уровне управления (регуляторы электропривода) имеет достаточно высокую степень проработки. Вопросы теории тягового расчета были исследованы В. Е. Розенфельдом, М. П. Кутыловским [38, 39]. Методы энергоэффективного управления тяговым электроприводом подробно описываются в работах К. Г. Марквардта, В. П. Феоктистова, В. В. Шевченко, *A. Ruffer* и других авторов [40-42]. Проблема энергоэффективного управления тяговым электроприводом является предметом исследований целого ряда учёных из Новосибирского государственного технического университета [43-50]. Однако, появление новых методов реализации алгоритмов управления открывает дополнительные пути для повышения эффективности регулирования.

Системы высокоуровневого энергоэффективного управления (задание внешних сигналов управления) освещены меньше. А. А. Жук, В. М. Булойчик, С. В. Акулич исследуют систему беспилотной навигации с построением маршрута по критерию минимального потребления топлива [51]. *Shen Z., Wilson J., Gupta S.* предлагают варианты планирования пути с учетом возврата на станцию зарядки в случае нехватки энергии [52]. Авторы работ [53-59] рассматривают математические модели, позволяющие планировать энергоэффективные

траектории, совмещая их с поиском наикратчайшего пути. Обширные исследования проводятся группой сотрудников исследовательской лаборатории *Mitsubishi Electric*, США [60, 61]. Однако, исследования в данной области требуют дальнейшей проработки, так как в современных трудах не представлены решения, удовлетворяющие одновременно критериям кратчайшего пути, безопасной траектории и энергетической эффективности.

**Целью исследования** является повышение энергоэффективности тягового электропривода автономного ТС за счёт внесения конструктивных изменений и использования энергооптимальных алгоритмов управления.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Выработка рекомендаций относительно компоновки тягового электропривода для обеспечения наибольшей энергоэффективности ТС.
2. Выбор основных элементов тягового электропривода.
3. Создание математической модели источника бесконтактной передачи энергии.
4. Разработка наблюдателей для оценки переменных состояния системы тягового электропривода на основе искусственных нейронных сетей.
5. Синтез нейросетевых регуляторов переменных состояния системы тягового электропривода с применением методики обучения нейронных сетей с подкреплением.
6. Разработка энергооптимальной системы управления автономной навигацией ТС.
7. Подтверждение теоретических наработок с помощью моделирования в среде *MATLAB Simulink*.

**Объектом исследования** является система тягового электропривода с источником бесконтактного подвода энергии и буферным бортовым накопителем энергии.

**Предметом исследования** являются математическая модель источника бесконтактного подвода энергии, алгоритмы управления тяговым электроприводом с применением методов искусственного интеллекта.

**Методы и средства проведения исследования.** При подготовке работы использовались аналитические методы и сведения из теории электрического привода, теории вероятности и математической статистики, автоматического управления, электрических машин, машинного обучения. Моделирование и последующий анализ работоспособности синтезированной системы произведены с использованием программного пакета *MATLAB Simulink* и языка программирования *Python*.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Составлено математическое описание источника бесконтактной передачи энергии как элемента системы управления тяговым электроприводом, позволяющее анализировать динамические свойства транспортного средства при изменении параметров источника питания.

2. Предложена методика оценки переменных состояния тягового электропривода с использованием искусственных нейронных сетей, что облегчает расчет и построение бездатчиковой системы управления.

3. Синтезированы регуляторы переменных состояния тягового электропривода методом обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) с подкреплением, обеспечивающие энергоэффективное управление транспортным средством.

4. Предложена методика расчёта безопасной и энергоэффективной траектории ТС при объезде препятствия, использование которой, в конечном итоге, обеспечит безаварийную эксплуатацию электротранспорта.

**Практическое значение работы.**

1. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая произвести расчёт технических характеристик для выбора тягового двигателя и буферного накопителя энергии ТС на основе выбранных циклов движения.

2. Апробирована методика использования буферного накопителя энергии с целью уменьшения потерь энергии в тяговом электроприводе.

3. Синтезирован и исследован наблюдатель крутящего момента двигателя по косвенным показателям с использованием ИНС.

4. Синтезирован и исследован нейрорегулятор момента для системы автоматического управления тяговым электроприводом электрического ТС.

Совокупность полученных **теоретических и практических результатов** может служить основой для увеличения числа научных исследований и практических внедрений автономных электрических ТС с бесконтактным подводом питания.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математические модели источника бесконтактной передачи энергии в системе тягового электропривода, используемые для анализа влияния величины воздушного зазора на динамику транспортного средства.

2. Обоснование алгоритмов управления тяговым электроприводом автономного ТС, дающее возможность выбора необходимых контуров регулирования.

3. Использование искусственных нейронных сетей для расчёта переменных состояния системы тягового электропривода, позволяющее построить бездатчиковую многоконтурную систему управления.

4. Синтез нейрорегулятора момента в системе тягового электропривода автономного ТС, отличающейся от существующих наличием контура момента.

5. Выбор бортового накопителя энергии и разработка регуляторов для его управления с целью уменьшения бросков тока и снижения потерь энергии, а также для его использования при исчезновении напряжения питания.

6. Анализ динамических свойств синтезированной системы тягового электропривода с комбинированной энергоустановкой с целью подтверждения проведенных расчетов и необходимости применения бортового накопителя энергии.

7. Результаты использования элементов технического зрения для задания управляющих сигналов на систему тягового электропривода в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

**Достоверность полученных в работе результатов** подтверждена структурным, имитационным и физическим моделированием исследуемой

системы.

**Публикации и апробация работы.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 научных работах, среди которых: публикаций в журналах из перечня ВАК РФ – 4; публикаций в журналах, индексируемых базой Scopus – 1; свидетельств о регистрации программы для ЭВМ – 1.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на II Международной научно-технической конференции «*Smart Energy Systems 2021*» (SES-2021, Казань), открытой лекции для студентов университета Цзинганшань (Китай, 30.11.2022), XI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (2017, Новосибирск), XXVI региональной научной студенческой конференции «Интеллектуальный потенциал Сибири» (2018, Новосибирск), научных сессиях НГТУ (Новосибирск, 2020-2023).

**Личный вклад автора.** Представленные в работе исследования были проведены автором лично или под его непосредственным руководством. Автор участвовал в постановке задач, выборе методов и обосновании их применения, а также анализировал и интерпретировал полученные результаты.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Текст работы написан на 153 страницах, содержит 69 рисунков и 10 таблиц. Список литературы включает 219 наименований.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

## 1.1 Проблема повышения энергетической эффективности

Продажи электрического транспорта растут с каждым годом. В 2022 на мировом рынке было продано более 10 млн электромобилей, включая как чисто электрические, так и гибридные ТС с возможностью подзарядки от электрической сети [62]. Данный показатель на 55% превышает количество проданных единиц техники в 2021 году. Согласно прогнозам в 2023 году продажи увеличатся еще на 35% и составят 14 млн штук. Крупнейшими рынками электромобилей являются Китай, Европа и США. На их долю приходится 95% всех проданных авто в 2022 году. Самым крупным потребителем электротранспорта является Китай, где на данный момент в эксплуатации находится 13,8 млн единиц техники (рисунок 1.1). В России в 2022 году было продано 2998 электрических транспортных средств, что на 33% больше, чем в 2021 [63]. По прогнозам Международного энергетического агентства количество эксплуатируемых электрических ТС в мире к 2030 году достигнет 145 млн. штук [64].

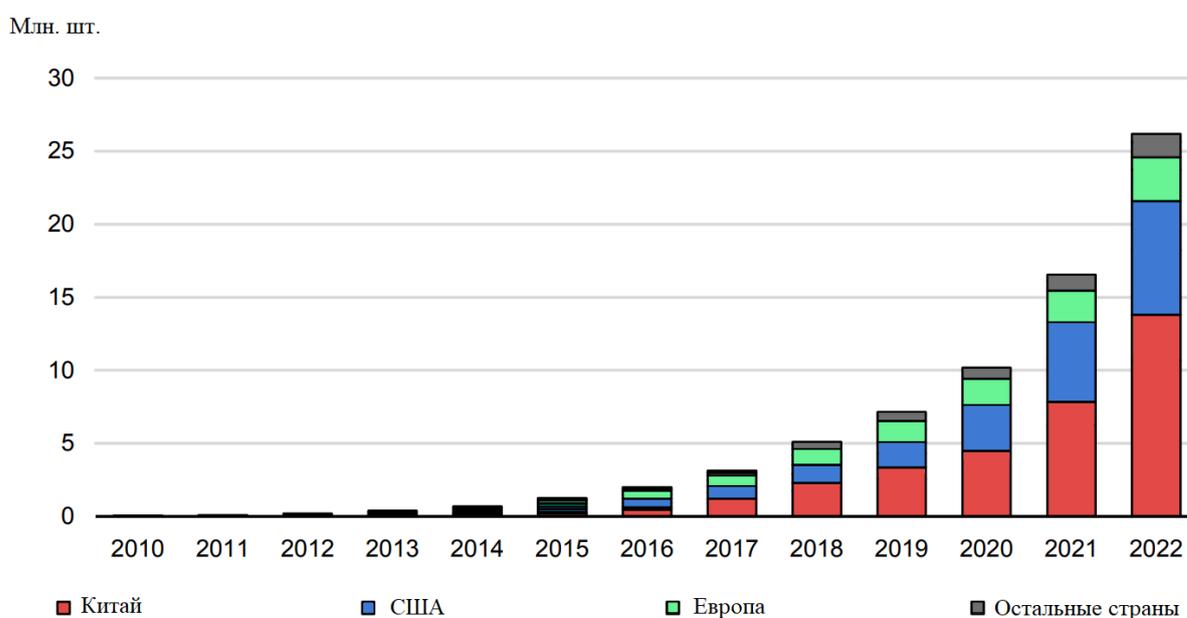


Рисунок 1.1 – Количество эксплуатируемых электромобилей в мире [62]

Стремительные темпы роста продаж электромобилей на российском и

мировом рынках свидетельствуют о том, что на данный продукт есть спрос среди потребителей. За этим следует огромный интерес со стороны ученых и инженеров по совершенствованию характеристик выпускаемых машин.

Работа, проведенная экспертной группой Института транспортных исследований США [65], показала, что для пользователей одним из важнейших требований к электрическому транспортному средству (ТС) является наличие большого запаса хода. Повышение дальности пробега существенно упрощает планирование поездок на работу, домой или за покупками.

Другое исследование, проведенное в Европе, установило, что 30% европейских потребителей, которые задумываются о покупке электромобиля, хотели бы, чтобы его зарядка происходила не более одного раза в сутки и длилась не более шести часов.

Таким образом, одним из основных требований к характеристикам электротранспорта является большой запас хода.

Помимо прочих методов, увеличения дальности пробега можно добиться с помощью повышения энергетической эффективности транспорта.

Одним из способов повышения энергоэффективности является применение рекуперативного торможения. Суть процесса заключается в том, что часть кинетической энергии, которой обладает движущаяся машина, при торможении превращается в электрическую и запасается в аккумуляторной батарее (АБ). Это достигается за счет того, что тяговый электродвигатель, работая в генераторном режиме, создает тормозной момент, тем самым вырабатывая электрическую энергию. За счет рекуперативного торможения удается вернуть от 8% до 25% от общей затраченной энергии [66]. В работе [67] предлагается усовершенствованная система управления рекуперацией энергии торможения, основанная на алгоритме нечеткой логики. Данная система определяет оптимальный процесс рекуперативного торможения в зависимости от температуры аккумуляторной батареи, величины текущего заряда батареи, скорости автомобиля и усилия нажатия на педаль тормоза. За счет применения данного алгоритма управления рекуперацией удалось достичь увеличения энергоэффективности на 22%, что в

условиях реального эксперимента проявилось в увеличении пройденного расстояния электромобилем со 163 км до 205 км на одном заряде.

Выбор типа АБ является непростым ввиду того, что необходимо удовлетворить требования, связанные с дальностью автономного хода, ускорением, быстрой зарядкой, сроком службы, массы. Аккумуляторные батареи должны сочетать в себе высокую мощность, а также высокую удельную энергоёмкость. Для обеспечения этих требований предлагается использование гибридной АБ, состоящей из батарей двух типов [68]. Литий-никель-марганец-кобальт-оксидный аккумулятор обладает высокой удельной емкостью, а литий-титанатный аккумулятор обеспечивает высокую плотность тока. Результаты исследования показали высокую эффективность гибридного блока аккумуляторов, авторам работы также удалось достичь увеличения срока службы батареи и скорости ее зарядки.

Другим узлом электромобиля, за счет совершенствования которого можно добиться увеличения энергоэффективности, является тяговый электрический двигатель. Существует множество различных типов электродвигателей, отличающихся конструкцией и типом магнитного поля. В работе [69] проводится исследование, которое направлено на выявления наиболее оптимальных параметров: числа пазов, полюсов, индуктивности, осевой длины и числа витков обмотки статора для синхронных двигателей с постоянными магнитами. Результаты исследования показали, что увеличение количества полюсов исследуемого электрического двигателя позволяет снизить энергопотребление на 13,3%. В работе [70] проводится исследование комбинаций расположения постоянных магнитов на поверхности ротора. Внесение изменений в привычную конструкцию ротора, заключающееся в добавлении барьеров магнитного потока (рисунок 1.2 г), препятствующих гармоническому магнитному полю, привело к увеличению крутящего момента и снижению потерь на вихревые токи, что в общем позволило увеличить энергоэффективность машины на 5% [71].

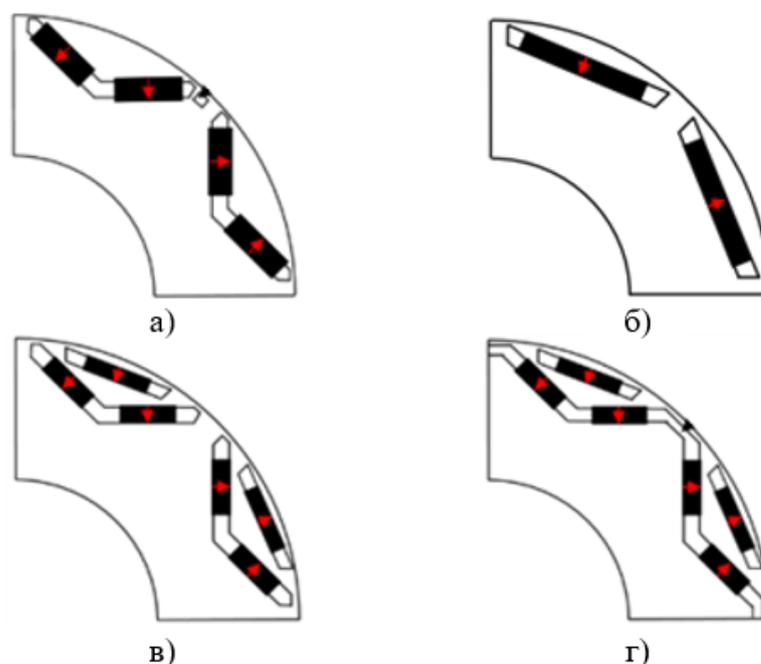


Рисунок 1.2 – Варианты расположения постоянных магнитов ротора (а – V-образное расположение; б – тангенциальное расположение; в – дельтовидное расположение; г – дельтовидное расположение с барьерами магнитного потока)

[71]

В работе [72] предлагается повышать энергоэффективность электромобиля за счет совершенствования механического дифференциала. Путем имитационного моделирования получены результаты, показывающие, что уменьшение передаточного числа дифференциала с 4,3 до 3,54 непосредственно влияет на экономию энергии в стандартных циклах движения *NEDC (New European Driving Cycle)*, *WLTP Class 2 (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)* и *WLTP Class 3*. Экономия энергии варьировалась от 3 до 8%.

Для уменьшения количества механических узлов в электротранспорте в работе [50] предложено заменить механический дифференциал электронным. Принцип работы электронного дифференциала состоит в том, что при совершении поворота система управления изменяет сигналы задания скорости приводных двигателей мотор-колес. Величина изменения сигналов задания зависит от скорости движения ТС и угла поворота рулевого колеса. Благодаря применению электронного дифференциала удастся избавиться от потерь энергии в механическом дифференциале, а также снизить массу транспортного средства. За

счет этого удастся уменьшить энергопотребление на 1,46%, а мгновенное значение КПД повысить на 5,1%.

Повышение энергоэффективности электромобилей за счет применения новых алгоритмов управления рассматривается в работе [73]. В данном исследовании предлагается интегрированная стратегия управления динамикой ТС и оптимизации энергопотребления. Движение транспортного средства разделяется на два вида: продольное движение и движение в поворотах. Причем в первом случае приоритетным является повышение энергоэффективности, а во втором – повышение управляемости и устойчивости электромобиля. За счет применения предложенного алгоритма управления продольные и поперечные усилия и крутящие моменты на шины передаются, исходя из желаемых целевых показателей. Результаты исследования показывают, что предложенный алгоритм обеспечивает требуемые показатели динамики и управляемости транспортного средства, а также позволяют снизить потребление энергии.

В современных электрических ТС на борту установлено множество систем, повышающих комфорт и безопасность водителя и пассажиров. К таким системам относят системы активной и пассивной безопасности, систему отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, освещение, индикация, мультимедийная система и др. На данный момент в электромобилях данные системы никак не связаны между собой, каждая из них имеет собственную систему управления, а питание получает от бортового источника питания. В работе [74] предлагается использовать контроллер, основанный на нечеткой логике, для централизованного управления всеми бортовыми системами. Данный контроллер реализован в виде единого интерфейсного устройства мультимедийным экраном, с которым взаимодействует водитель. Сигналы и запросы анализируются контроллером на основе состояния аккумуляторной батареи и важности запроса. По сравнению с децентрализованным управлением бортовыми системами предложенное централизованное управление позволяет сэкономить до 15% потребляемой энергии.

В работе [75] авторы предлагают использовать алгоритм управления

моментом, который делится на два уровня. В зависимости от скорости транспортного средства и сигнала управления верхний уровень строит схему предварительного распределения крутящего момента на основе энергоэффективной модели. Далее значение распределенного момента передается на нижний уровень, где сначала рассчитывается коэффициент проскальзывания шин относительно дорожного полотна, далее на основе полученного значения коэффициента проскальзывания подаются сигналы задания крутящего момента на каждый из четырех приводных двигателей электромобиля. За счет применения данного алгоритма снижается потребление энергии в режиме разгона от 0 до 120 км/ч на 1,1% и на 2,3% в режиме движения по циклу *NEDC*.

Для повышения энергоэффективности за счет использования накопителя энергии в работе [76] предложено использование суперконденсаторов, которые работают совместно с тяговыми АБ. Для оптимизации энергопотребления данных накопителей энергии предложено использование нейронной сети, способной прогнозировать некоторые стратегии движения ТС на основе данных, полученных в процессе обучения нейронной сети по заранее синтезированной модели. Результаты эксперимента показали, что применение суперконденсаторов позволило увеличить дальность автономной езды на одном заряде на 5,3%. А при добавлении в данную систему нейрорегулятора, оптимизирующего энергопотребление, дальность хода увеличилась на 8,9%.

## **1.2 Использование комбинированных энергоустановок**

По типу источника энергии транспортного средства (ТС) можно выделить следующие группы [77]:

1) Автономные транспортные средства, питание которых осуществляется от источников, размещенных непосредственно на ТС. Таким источником является перезаряжаемая на стационарной зарядной станции или сменная АБ. Согласно ГОСТ Р 59078-2020 [78] такие транспортные средства относят к категории «Электромобиль».

2) ТС с централизованным источником питания, особенностью которых является наличие токоприемных частей, через которые передается энергия от

тяговых электрических сетей. Такие транспортные средства теряют способность передвижения при потере электрического контакта с питающей сетью (пример: троллейбусы, трамваи).

3) ТС с комбинированной энергоустановкой (КЭУ), имеющие в своей конструкции как АБ, которая способна обеспечить длительное время езды без подзарядки, так и какой-либо другой источник питания.

Среди описанных выше ТС, различающихся по типу источника питания, наиболее гибким и универсальным является вариант с комбинированной энергоустановкой, так как за счет его применения удастся добиться как увеличения запаса хода, так и свободы перемещения транспортного средства независимо от наличия тяговой сети.

Область эффективного использования грузовых и пассажирских транспортных средств различного типа показана в работе Оганесяна Р. М. (рисунок 1.3) [79].

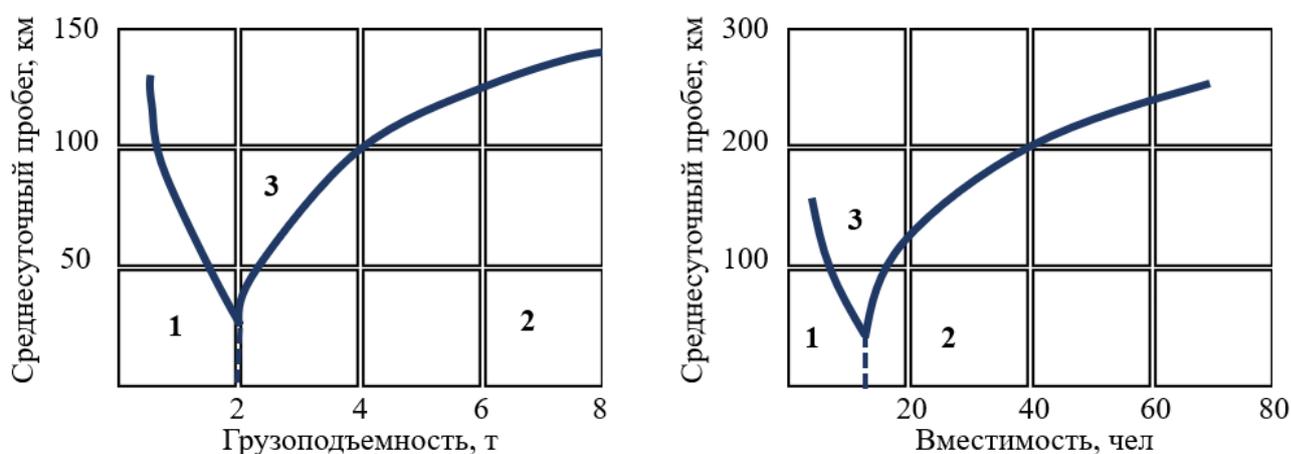


Рисунок 1.3 – Область эффективного использования грузовых и пассажирских транспортных средств (1 – аккумуляторные электрические ТС; 2 – ТС с комбинированными энергоустановками; 3 – автомобили с ДВС)

Анализируя представленные графики, можно сделать вывод, что при увеличении грузоподъемности и среднесуточного пробега целесообразно использовать ТС с комбинированной энергоустановкой либо автомобили с ДВС. Однако ввиду того, что грузовые автомобили с ДВС производят большой объем выхлопных газов, предпочтительнее использовать ТС с комбинированной

энергоустановкой. Данный пример показывает преимущества использования ТС с КЭУ по сравнению с аккумуляторными экземплярами.

Среди электромобилей с КЭУ выделяют транспортные средства, включающие в себя двигатель внутреннего сгорания и тяговую АБ. Такие ТС принято называть гибридными. В зависимости от компоновки различают следующие виды гибридных автомобилей (рисунок 1.4):

1. Последовательные.
2. Параллельные.
3. Последовательно-параллельные.

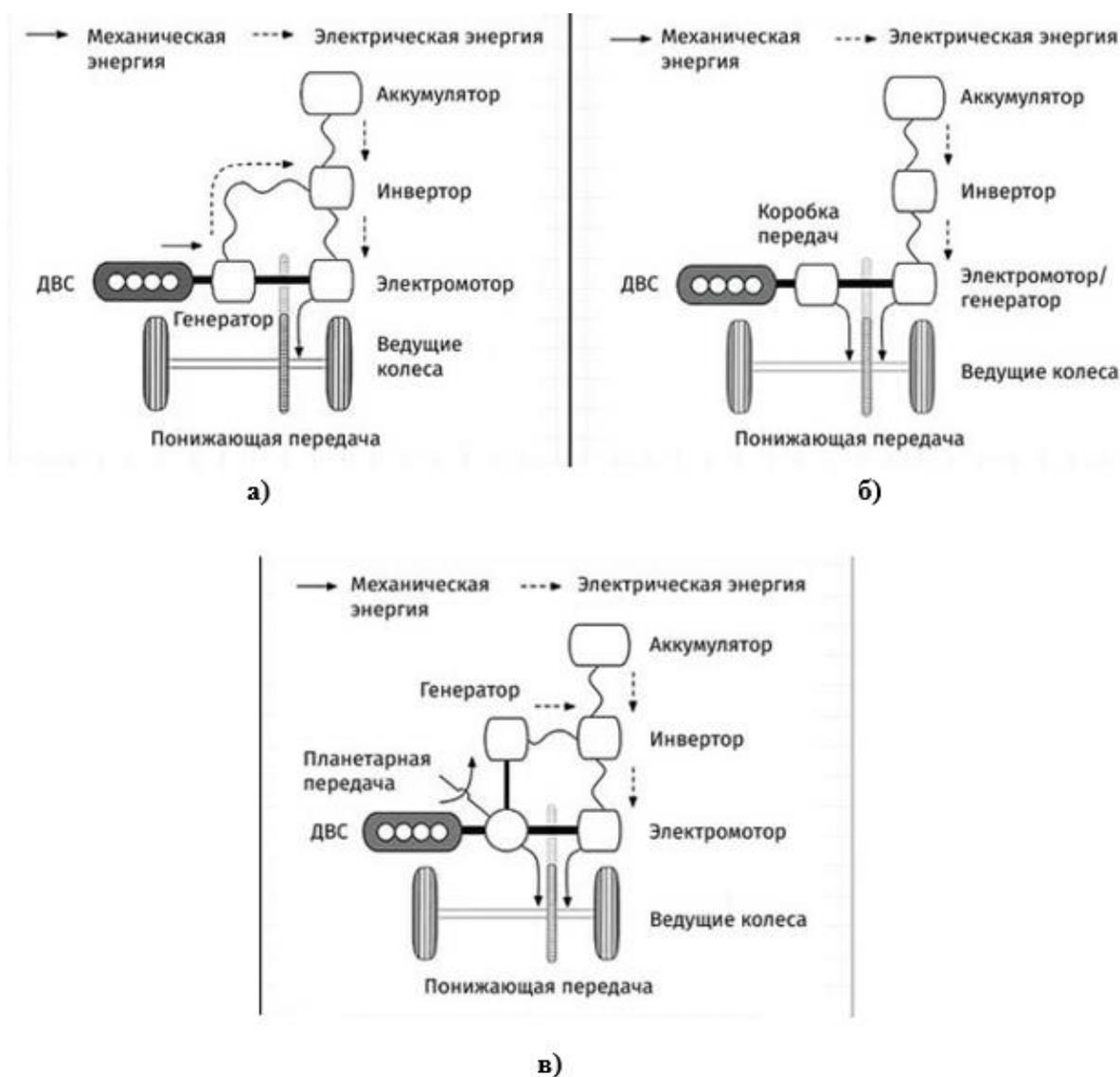


Рисунок 1.4 – Разновидности гибридных автомобилей

(а – последовательная гибридная схема, б – параллельная гибридная схема, в – последовательно-параллельная гибридная схема)

Последовательная гибридная схема является самой первой гибридной схемой. Принцип ее работы заключается в том, что колеса приводятся во вращение только электрическим двигателем. В свою очередь ДВС приводит во вращение генератор, заряжающий АБ и питающий электрический двигатель. При использовании данной схемы отсутствует необходимость в коробке передач, однако КПД схемы снижается за счет двойного преобразования энергии.

Параллельная гибридная схема появилась позднее. При такой компоновке электрический двигатель помогает ДВС при разгоне и в ситуациях, когда необходим повышенный крутящий момент, например, при движении в гору. В этой схеме электрический двигатель преобразует механическую энергию в электрическую. В качестве коробки передач чаще всего используется планетарная передача или вариатор, что сказывается на массогабаритных показателях и добавляет еще одно звено системы, требующее дополнительного внимания и технического обслуживания.

Наибольшее распространение получила последовательно-параллельная гибридная схема, сочетающая в себе решения вышеописанных двух схем. ДВС механически связан с колесами и может являться источником их привода. Электродвигатель также приводит во вращение колеса, получая питание как от генератора, связанного с ДВС, так и от аккумуляторных батарей. Такое решение позволило добиться высокой энергетической эффективности гибридной схемы, при этом сохраняя простоту и надежность конструкции.

Однако, несмотря на все преимущества гибридных автомобилей, их применение все еще не позволяет полностью избавиться от вредных выбросов выхлопных газов. Вместо них можно рассматривать ТС, использующие в качестве источника питания как АБ, так и тяговую питающую сеть. К тому же такие электромобили обладают существенно меньшим уровнем шума по сравнению с гибридными автомобилями с ДВС.

Благодаря своей гибкости, заключающей в себе большой запас хода и свободу перемещения, в данной работе рассматривается транспортное средство с комбинированной энергоустановкой.

### 1.3 Виды источников энергии

На данный момент в России и мире наиболее распространенными источниками энергии для электромобилей являются общедоступные зарядные станции, на которых зарядка осуществляется путем передачи электрической энергии через подключаемый напрямую кабель. Несмотря на широкое распространение, простоту и доступность такого способа, он имеет ряд недостатков, к которым относятся:

1. Длительное время зарядки. Чтобы зарядить АБ требуется существенно большее время, чем это требуется для заправки автомобилей с двигателем внутреннего сгорания. Для передачи энергии, достаточной для длительной поездки электромобиля, требуется от нескольких десятков минут до нескольких часов. В некоторых случаях данный недостаток является существенным аргументом, чтобы отказаться от покупки электрического ТС.

2. Деградация батареи от быстрой зарядки. Процесс заряда электрического ТС может быть ускорен с использованием станций быстрой зарядки [80]. На таких станциях время полной зарядки электромобиля, например *Tesla Model X*, составляет от 40 до 75 минут. Однако быстрая зарядка подразумевает использование больших зарядных токов, что негативно сказывается на длительности жизни аккумуляторных батарей. Исследование [81] показало, что увеличение зарядного тока приводит к значительному снижению емкости батареи и увеличению ее температуры во время заряда, что впоследствии приводит к ускоренному выходу из строя АБ электромобиля.

Проблему длительного времени ожидания зарядки батареи может решить технология сменных батарей [82]. Она подразумевает создание обширной сети станций, на которых производится замена разряженных аккумуляторов на заряженные. Несмотря на такое очевидное достоинство данная технология не получила свое развитие из-за следующих недостатков:

1. Унификация конструкции электромобилей. Для быстрой замены АБ на зарядной станции необходимо обеспечить легкий доступ к аккумулятору. Для достижения этого всем производителям автомобилей требуется внесение

существенных изменений в конструкцию транспортных средств, что приведет к их существенному удорожанию.

2. Деградация батарей. При установке заряженной на станции батареи нет гарантии, что она имеет удовлетворительное состояние. Одновременно с качественной ячейкой батареи может быть установлена ячейка, которая имеет существенно меньший ресурс.

3. Экологический ущерб от утилизации батарей. Создание сети зарядных станций со сменными АБ подразумевает большой запас аккумуляторов, которые в данный момент не используются, а находятся на станциях. Такое увеличение производства батарей приведет к значительному росту отработанных батарей, требующих утилизации, которая наносит существенный экологический вред.

Помимо классических широко распространенных зарядных станций для электромобилей существуют альтернативные данному способы зарядки аккумуляторных батарей.

В работе [83] предлагается использование зарядной станции на солнечных батареях, благодаря которым повышается экологичность эксплуатации электрического ТС, имеется возможность подзарядки батареи прямо во время движения, а также возможность заряда независимо от местонахождения в данный момент.

Однако несмотря на кажущуюся привлекательность и универсальность данного способа зарядки батарей электромобиля он имеет некоторые критические недостатки, такие как:

1. Ограниченная мощность зарядной панели. Данный недостаток заключается в том, что каким бы большим ни было транспортное средство, площадь солнечной панели, которую на нем можно разместить, ограничена площадью поверхности его корпуса. Отсюда следует, что такая солнечная панель может вырабатывать строго ограниченное количество энергии, которой может не хватить для полноценной зарядки аккумуляторных батарей при движении на большие расстояния и при неблагоприятных погодных условиях.

2. Зависимость от погодных и городских условий. Очевидно, что

количество вырабатываемой энергии солнечной панелью зависит от количества попадающего на нее солнечного света. К снижению эффективности солнечных панелей приводит пасмурная погода. В условиях движения в городе эффективность солнечных панелей снижается за счет теней, отбрасываемых от высоких зданий и крон деревьев. Также эффективность солнечных панелей существенно снижается в зимний период, когда солнце находится невысоко над горизонтом, а возможность установить солнечную панель перпендикулярно солнечным лучам отсутствует.

3. Высокая стоимость. Солнечные панели дороги в изготовлении и установке, данный факт может значительно увеличить стоимость электромобиля. Эти затраты могут не компенсироваться экономией затрат на топливо в течение всего срока эксплуатации транспортного средства.

Приведенные выше недостатки не позволяют рассматривать солнечные панели в качестве источника питания электрического транспорта.

В качестве ИП для электромобиля также можно рассматривать систему «двигатель внутреннего сгорания – электрический генератор», которая получила название «параллельный гибрид» [84]. Её преимуществами являются уменьшение потребления топлива за счет снижения мощности двигателя и, как следствие, массогабаритных показателей ТС в целом, что понижает силы сопротивления движению и аэродинамическое сопротивление. Проведенные исследования [85] показали, что преимущества «параллельных гибридов» различаются в зависимости от области применения и местности (например, плоской, холмистой или гористой) и могут варьироваться от 1% на шоссе до 50% при движении по городу.

Однако такое решение противоречит основной концепции электрического транспорта – полному исключению выбросов вредных газов в атмосферу. К тому же применение бензинового или дизельного двигателя не исключает необходимость использования аккумуляторных батарей.

Еще один значительный недостаток – усложнение конструкции. Двигатель внутреннего сгорания и электродвигатель требуют различного технического обслуживания, что существенно увеличивает стоимость эксплуатации транспортного средства.

Недостатки технологий, описанных выше, может перекрыть использование источников бесконтактного подвода электрической энергии для электромобиля.

На замену существующей в городах сети, предназначенной для троллейбусов и трамваев, которая существенно ограничивает мобильность транспортных средств, предлагается использование бесконтактного способа передачи энергии, суть которого заключается в передаче энергии от источников питания, расположенных в дорожном полотне. С помощью различных физических законов в ТС, на котором установлена ответная часть – приемник, переданная энергия различных видов преобразуется в электрическую, которая далее запасается в АБ и расходуется на работу электроприводов.

Данная технология обладает значительными преимуществами:

1. Удобство использования. Технология бесконтактной передачи энергии позволяет отказаться от использования токосъемников или контактных колец [86], благодаря чему достигается высокая мобильность транспортных средств.

2. Уменьшение габаритов АБ. Благодаря тому, что при движении транспортного средства по дорогам электрическая энергия всегда находится в доступе, отсутствует необходимость использования батарей большой емкости для прохождения больших дистанций пути [87]. Это позволит уменьшить стоимость производства и обслуживания электромобилей.

3. Независимость от погодных условий. Технология бесконтактной передачи энергии основывается на физических законах, позволяющих не зависеть от погодных условий. Таким образом обеспечивается одинаковая эффективность передачи энергии.

4. Выравнивание нагрузки на питающую сеть. Исследование [88] показывает, что в настоящее время водители электромобилей чаще всего пользуются стационарными домашними зарядными устройствами. В таком случае зарядка происходит после окончания рабочего дня, что приводит к росту потребления электроэнергии между 18 и 19 часами, которое накладывается на уже существующий пик суточного потребления электрической энергии в этом промежутке времени. Использование бесконтактной зарядки позволяет сдвинуть

пики потребления электроэнергии электромобилями на время, когда водители находятся в пути с работы или находятся на городских парковках в течение рабочего времени [87]. На рисунке 1.5 показаны графики суточного потребления энергии для зарядки электротранспорта только на домашних стационарных зарядных устройствах и от бесконтактных городских зарядных станций. На графиках явно видно уменьшение пиковых значений потребления энергии при использовании бесконтактного способа передачи энергии.

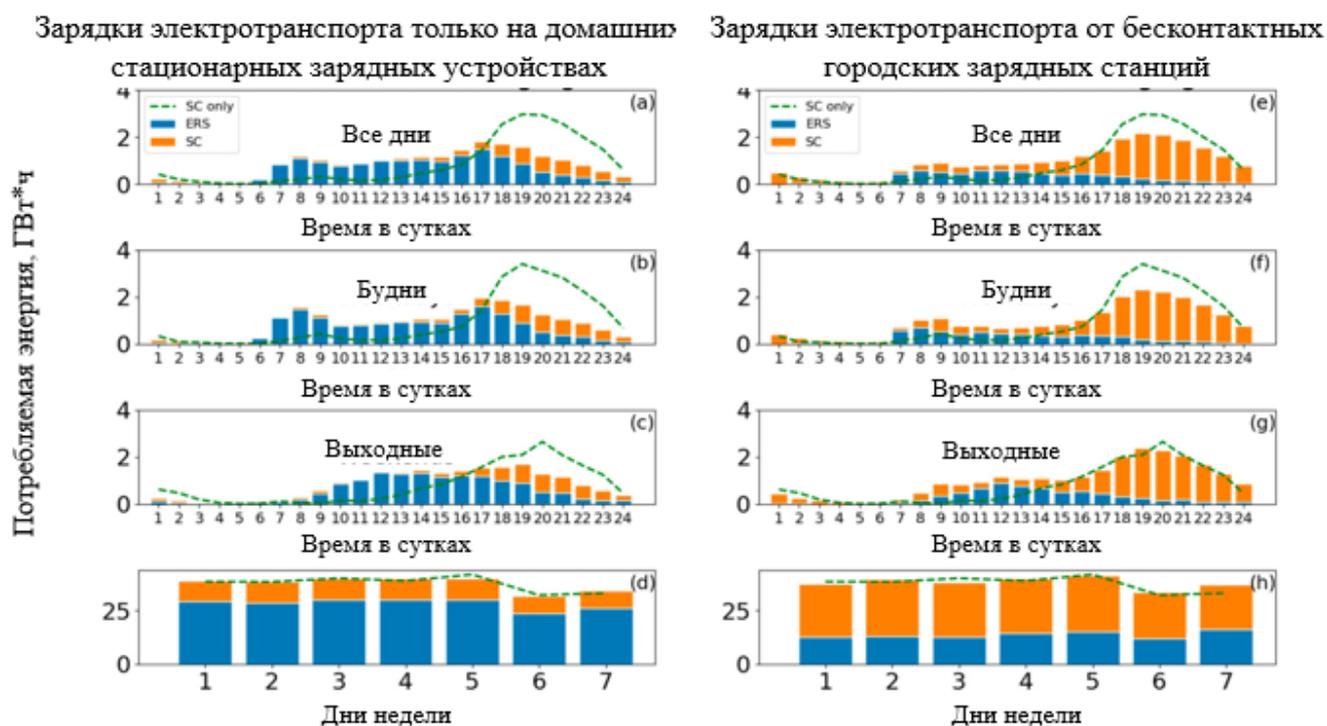


Рисунок 1.5 – Изменение пиковых значений потребляемой электроэнергии при использовании бесконтактной передачи энергии [88]

5. Эстетичный вид города. Для бесконтактного подвода энергии имеется возможность расположить передатчики энергии под поверхностью земли, что благоприятно влияет на внешний вид города. Положительный опыт переноса воздушных кабельных линий под землю имеет город Москва [89], где с начала 2015 г. осуществлялся масштабный проект по переносу электрических коммуникаций под землю. Опрос показал, что 71% местных жителей положительно оценили такие изменения городской инфраструктуры [90].

Существует несколько способов бесконтактной передачи энергии [91]:

1. Акустические.

2. Световые.
3. Ёмкостные.
4. Индукционные.

Световые или оптические системы работают аналогично электромагнитной или микроволновой передаче энергии. Однако в оптических системах длины волн лежат в видимом спектре или вблизи от него. В качестве источника оптического силового луча используются лазерные диоды, данный луч попадает на фотодиоды, которые преобразуют его в электрическую энергию (рисунок 1.6). Несмотря на то, что данная технология может передавать большое количество энергии, ее эффективность и практическое применение ограничиваются при использовании на больших расстояниях из-за дифракционных потерь. Величина передаваемой мощности варьируется от одного до нескольких десятков ватт, а КПД преобразования оптического сигнала составляет 20-30% [92]. Таким образом, области применения таких систем включают в себя в основном космические аппараты и некоторые наземные технологии [93].

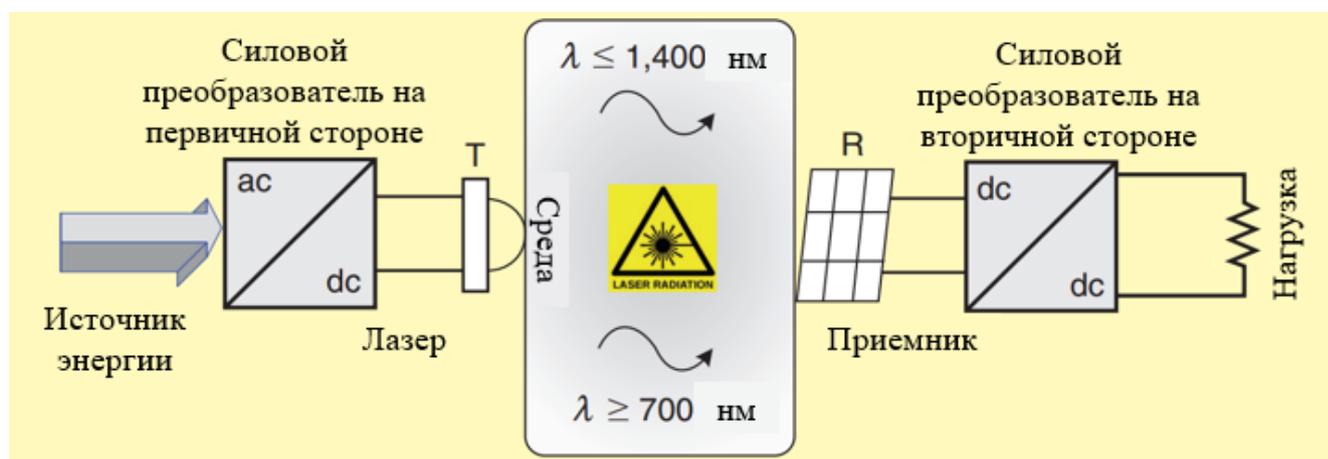


Рисунок 1.6 – Принцип работы оптической системы бесконтактной передачи энергии [91]

Принцип работы акустической системы показан на рисунке 1.7. Электрическая энергия передается от сети через силовую схему, далее преобразуется в звуковую волну, которая распространяется в некоторой среде (воздух, металл и т.д.). Приемник, расположенный вдоль пути прохождения звуковой волны, производит обратный процесс преобразования звуковой волны в

электрическую энергию. Обычно в качестве передающих и приемных преобразователей используются пьезоэлектрические элементы [94]. Такие системы могут использоваться там, где электромагнитное излучение недопустимо. Область применения акустических систем беспроводной передачи энергии обычно включает в себя биомедицинские технологии (диапазон передаваемой мощности до 100 мВт и КПД до 40%), технологии передачи энергии через стены (например датчики в ядерных системах, вакуумных камерах, газовых баллонах), мощность передачи которых достигают 1 кВт при КПД 84% [95]

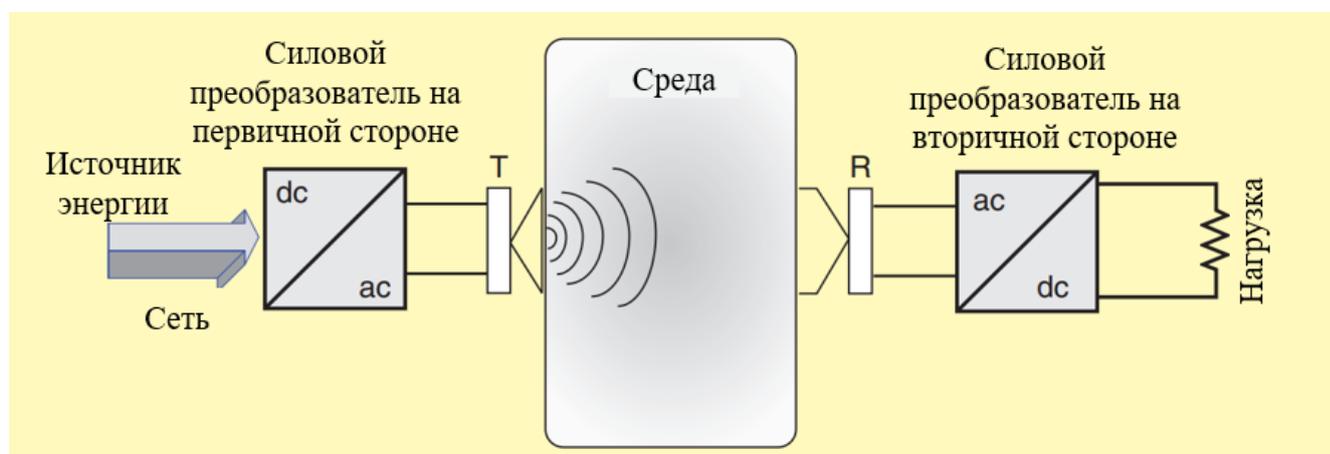


Рисунок 1.7 – Принцип работы акустической системы бесконтактной передачи энергии [91]

На рисунке 1.8 показана емкостная система бесконтактной передачи энергии. Ее принцип заключается в том, что электрический ток, проходя через высокочастотный силовой преобразователь, подается на две первичные металлические пластины. При размещении вторичных пластин напротив первичных между пластинами возникает изменяющееся электрическое поле, появляется ток смещения. В результате чего возможна бесконтактная передача энергии из цепи первичных пластин в цепь вторичных. Для обеспечения электрической изоляции и увеличения емкости поверхности пластин покрываются диэлектрическим материалом [96]. Благодаря тому, что энергия передается посредством электрического поля, металлические заграждения и другие элементы окружающей среды не создают помех для передачи энергии. Кроме того, такие системы, в отличие от индукционных, создают меньше электромагнитных помех

[97]. Передаваемая мощность таких систем составляет 5-50 Вт, а КПД – 50-80%. Область применения: питание светодиодных ламп, мобильных телефонов, роботов, датчиков систем измерения биопотенциала дыхательных аппаратов и др. [98].

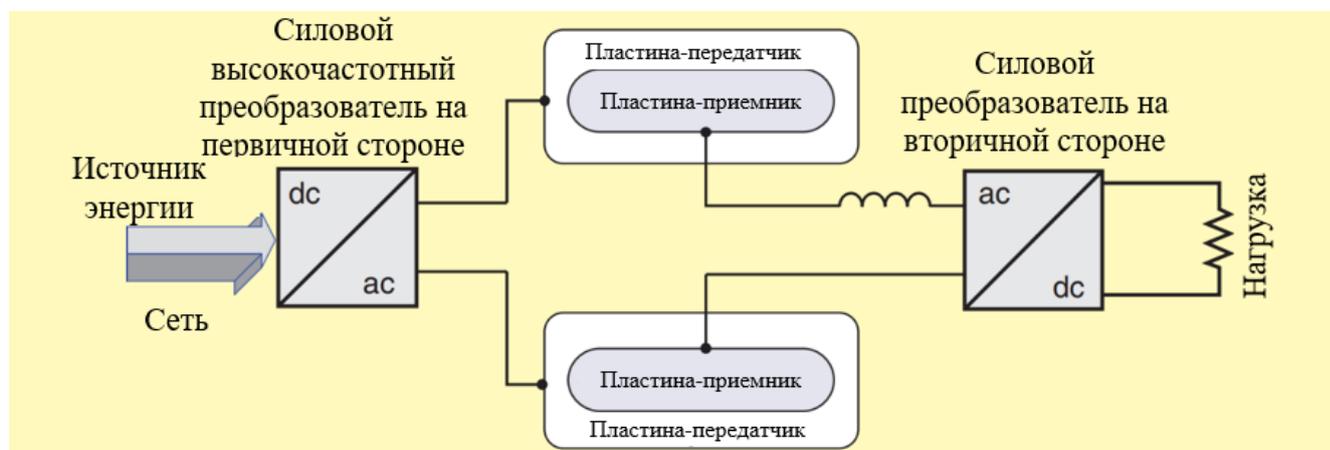


Рисунок 1.8 – Принцип работы емкостной системы бесконтактной передачи энергии [91]

Принцип работы индукционной системы бесконтактной передачи энергии показан на рисунке 1.9. На первичной стороне питающего узла устанавливается высокочастотный  $DC/AC$  преобразователь, в котором постоянный ток преобразуется в высокочастотный переменный ток.

Переменный ток высокой частоты (десятки килогерц), проходя через первичную обмотку, создает магнитное поле, которое в свою очередь способствует возникновению ЭДС взаимной индукции и электрического тока во вторичной обмотке. Вторичная обмотка может совершать перемещение относительно первичной: линейное либо вращательное. На вторичной стороне питающего узла устанавливается понижающий  $AC/DC$  преобразователь, позволяющий использовать полученную энергию для питания устройств и узлов, работающих как на постоянном, так и на переменном токе.

Принципиально индукционная система бесконтактной передачи энергии может быть описана как трансформатор с воздушным зазором, вторичная обмотка которого подвижна в пространстве [99].

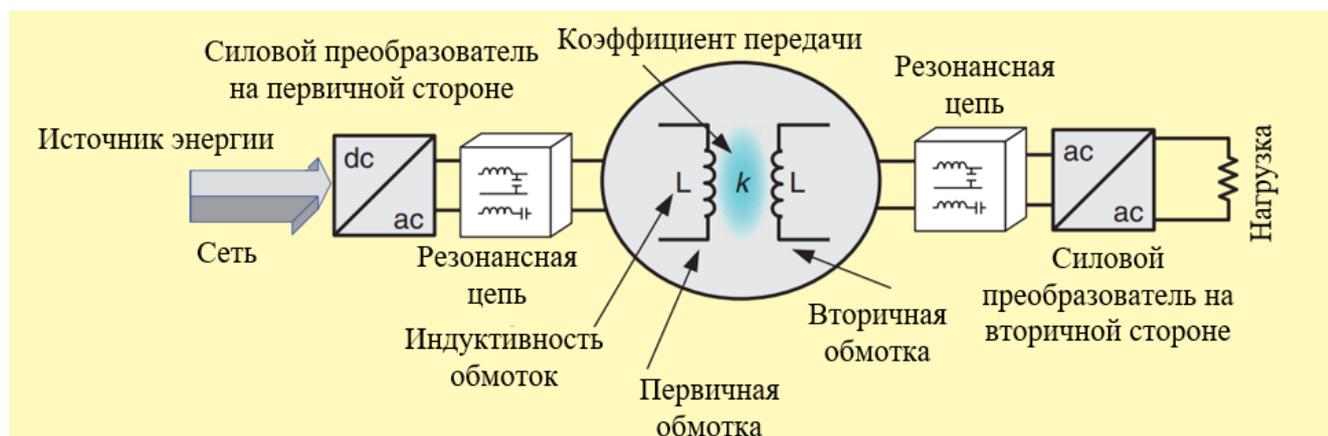


Рисунок 1.9 – Принцип работы индукционной системы бесконтактной передачи энергии [91]

В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики четырех описанных систем бесконтактной передачи энергии. Анализируя достоинства и недостатки приведенных систем, можно сделать вывод, что для питания электрических автономных транспортных средств наилучшим образом подходит система с индукционным подводом энергии.

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики различных систем бесконтактной передачи энергии

Технология	Рабочая частота (кГц)	Мощность (Вт)	Расстояние (мм)	КПД (%)	Свойства
Акустические (звук)	20 – 100	$0.01 - 10^3$	0.2 – 300	1 – 80	Строго направленный
Световые (свет)	$10^{12}$	1 – 100	Несколько километров	20 – 30	Лазер. Есть нагрев
Ёмкостные (электрическое поле)	100 кГц – несколько МГц	1 – 50	0.1 – 0.5	50 – 80	Чувствителен к металлу. Слабое магнитное излучение
Индукционные (магнитное поле)	20 кГц – несколько МГц	$1 - 2 \cdot 10^5$	$0.2 - 2 \cdot 10^3$	80 – 90	Не чувствителен к металлам. Сильное магнитное излучение

В зависимости от необходимого диапазона изменения передаваемой мощности и длины воздушного зазора могут использоваться различные сердечники трансформатора: отличия могут быть как в части материалов, из которых изготовлены изделия, так и в их форм-факторе.

Метод передачи электрической энергии от заложенного в дорожное полотно кабеля с приёмником в виде ферромагнитного сердечника представляет собой компромисс между величиной воздушного зазора и передаваемой мощностью, необходимыми для использования в системе тягового электропривода транспортных средств.

На рисунке 1.10 показана зависимость передаваемой мощности от величины воздушного зазора для различных типов сердечников трансформатора [100].

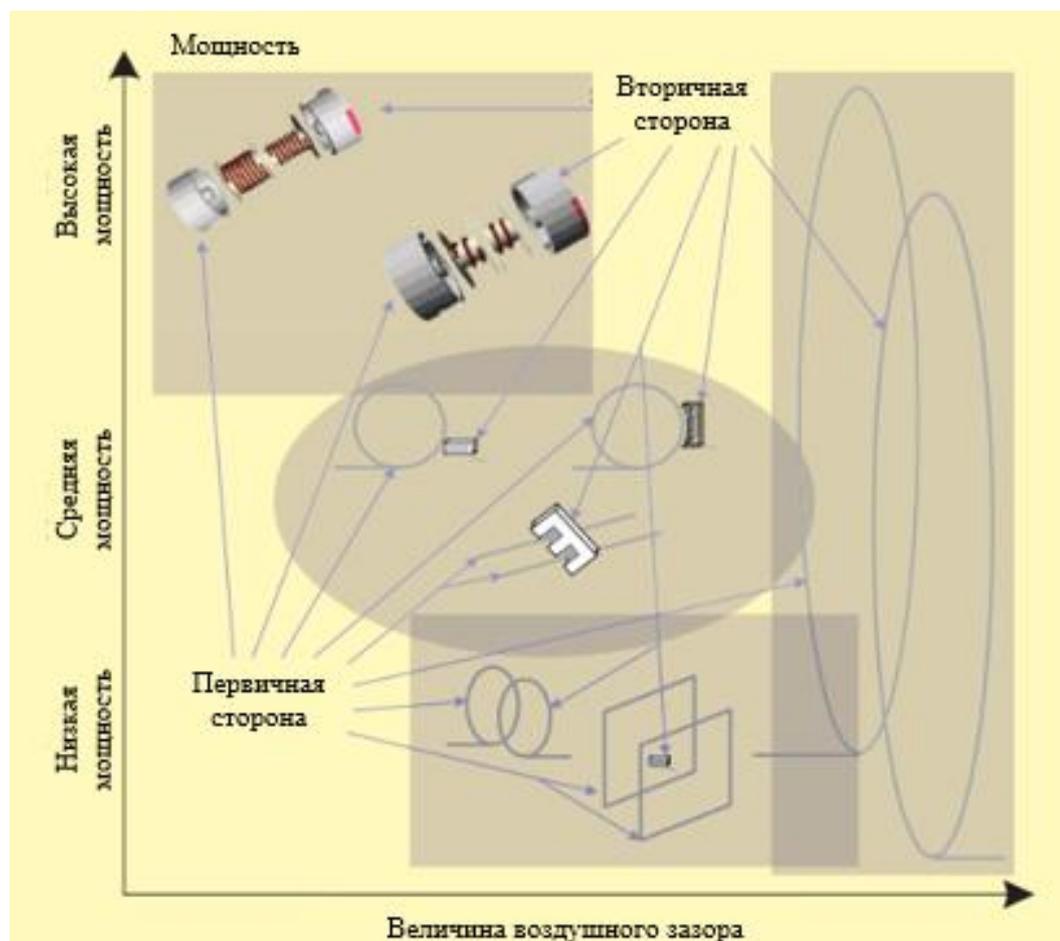


Рисунок 1.10 – Зависимость передаваемой мощности от величины воздушного зазора для трансформаторов с различным типом сердечников [91]

В мире проводится множество успешных экспериментов по внедрению индукционных систем беспроводной передачи энергии.

Еще в 1943 году советский электротехник, лауреат Сталинской премии, доктор технических наук Г. Бабат построил электромобиль с питанием от высокочастотного беспроводного источника энергии (ВЧ-мобиль) [11]. В 1944 году состоялся экспериментальный запуск ТС такого типа мощностью 2 кВт на Московском станкостроительном заводе имени Орджоникидзе. Эффективный радиус передачи электрической энергии от заложенных в дорожное полотно медных трубок с протекающим через них током частотой 50 кГц составлял 2 метра, однако КПД процесса передачи энергии для питания электропривода составлял лишь 4%. В 1947 году испытания продолжились на базе Научно-исследовательского автомобильно-моторного института (НАМИ) под Москвой. В 1958 году была запущена первая промышленная ветка рельсового высокочастотного транспорта на одной из шахт Донбасса.

В 2007 году учеными из Массачусетского технического института были проведены эксперименты по беспроводной передаче энергии с помощью резонансной индукционной связи [101]. В эксперименте энергия передавалась от первичной катушки, которая имела радиус 30 см. В цепи вторичной катушки находилась лампочка, яркость свечения которой показывала мощность бесконтактной передаваемой энергии. Частота тока в первичной катушке составляла 9,9 МГц. Меняя расстояние между катушками, исследователи получили зависимость КПД передачи от расстояния между катушками. На расстоянии 75 см был достигнут КПД передачи 93%. При этом стоит отметить, что ученым удалось передать несколько десятков ватт на расстояние более 2 м, добившись свечения лампочки мощностью 60 Вт, в этом случае КПД передачи составил 40%.

Ученые института Беркли (США) совместно с компанией *Systems Control Technology* провели экспериментальное исследование конфигурации индукционной передачи энергии от кабеля, заложенного в дорожное полотно [102]. Энергоприемник располагался над дорожным полотном на расстоянии 5-10 см (рисунок 1.11).

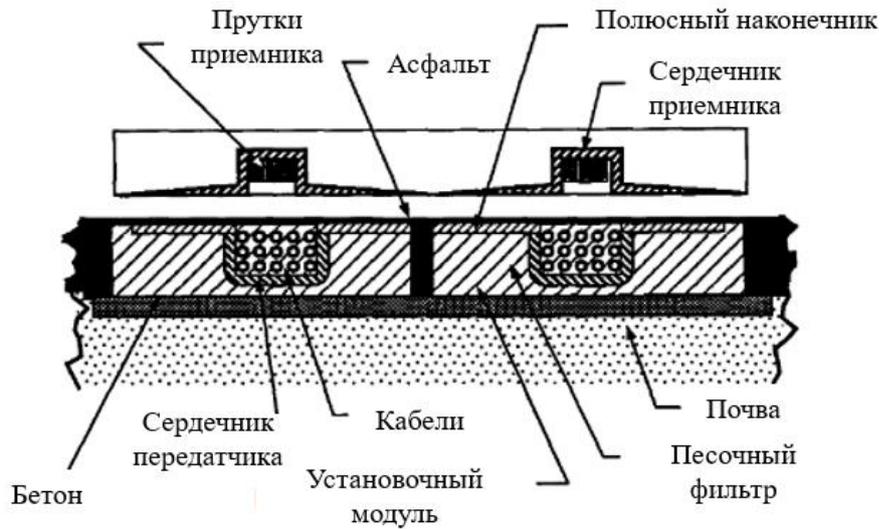


Рисунок 1.11 – Поперечное сечение энергоустановки эксперимента университета Беркли [102]

Исследования производились на дорожном участке длиной 210 метров, 60 метров из которого были электрифицированы (рисунок 1.12).

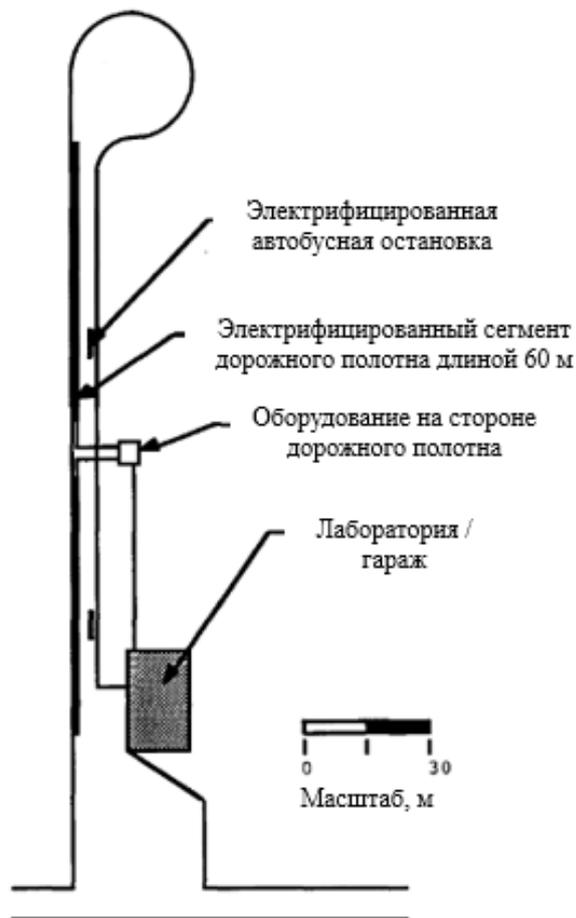


Рисунок 1.12 – Трек исследовательского полигона для испытания энергоустановки университета Беркли [102]

Первичная линия питается от трехфазной электрической сети с напряжением 480 В и частотой 60 Гц. С помощью преобразователя на первичной обмотке достигаются и удерживаются показатели тока – 1200 А частотой 400 Гц. Энергоприемник был установлен на автобусе весом порядка 12 тонн, разгоняющемся до скорости 60 км/ч. Данное транспортное средство приводилось в движение тяговым электроприводом постоянного тока мощностью 48 кВт и номинальным питающим напряжением 128 В. В результате проведенной работы доказывается, что КПД передачи энергии достигает 60% на обычной дороге и 80% в закрытом помещении.

Ученые из Корейского института науки и технологий (*KAIST*) с 2009 года проводят эксперименты по внедрению индукционных систем беспроводной передачи энергии. Они усовершенствовали описанную выше систему с использованием резонансных явлений [103]. Их система бесконтактной передачи энергии на частоте 20 кГц, мощности питания 100 кВт, величине воздушного зазора 20 см и скорости транспортного средства 85 км/ч показывает эффективность более 80%, передавая при этом мощность 15 кВт [104]. С этого времени им удалось создать несколько поколений концептуальных транспортных средств, начиная от небольшого гольфкара, заканчивая автобусами и поездами.

В работе [105] описана беспроводная зарядка для квадрокоптера, также основанная на технологии беспроводной резонансной связи. Были исследованы четыре возможные конфигурации первичных и вторичных цепей, в которых емкость и индуктивность включаются последовательно либо параллельно (рисунок 1.13).

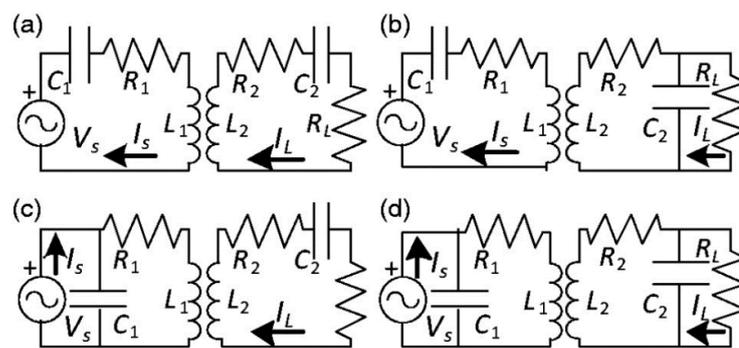


Рисунок 1.13 – Четыре возможных резонансных конфигурации [105]

Были получены графики, показывающие зависимость передаваемой мощности и КПД передачи от частоты для четырех конфигураций (рисунок 1.14). Наиболее приемлемым соотношением между передаваемой мощностью и КПД передачи обладает схема с последовательным соединением емкости и индуктивности в первичной и вторичной катушках и схема с последовательным соединением в первичной катушке и параллельным во вторичной. Однако, исследование не дает строгих рекомендаций по выбору частоты, т. к. резонансная частота зависит от величины емкости и индуктивности, которые в свою очередь зависят от размеров катушки, необходимой для конкретной задачи беспроводной передачи энергии. В [105] приводятся результаты успешных экспериментов с различными размерами катушек на различных частотах тока. Исследователям удалось добиться зарядки квадрокоптера на расстоянии 4 см от зарядной станции за время 26 минут.

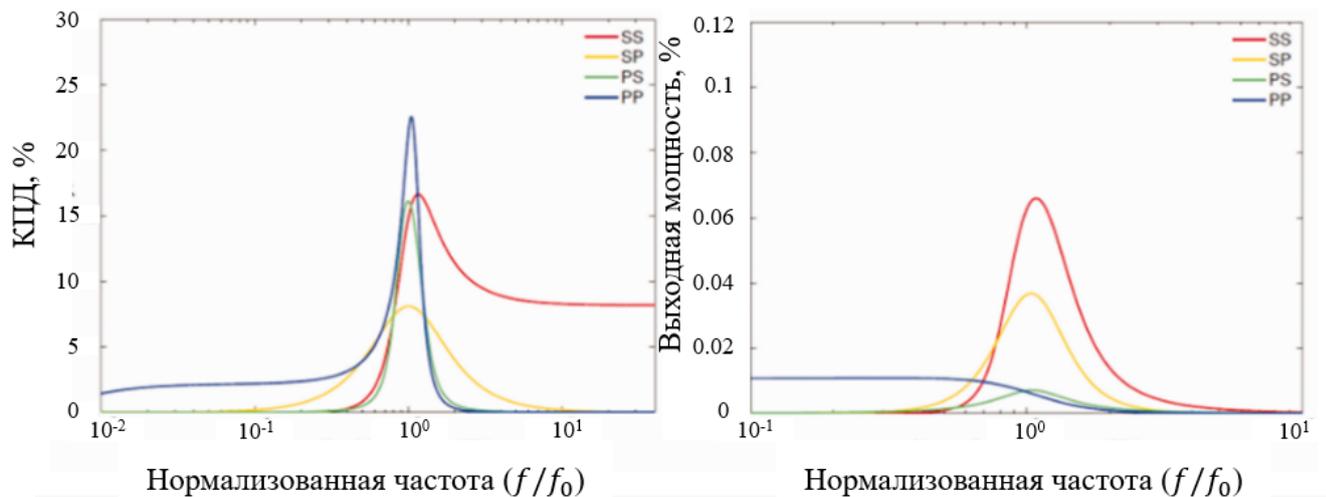


Рисунок 1.14 – Зависимость КПД и величины передаваемой мощности от частоты тока [105]

В работе [106] описываются эксперименты по беспроводной передаче энергии в реальных условиях, проведенные французскими разработчиками. В районе Сатори, коммуна Версаль, на протяжении всего дорожного полотна длиной 100 м были уложены катушки-источники в лотках шириной 80 см и глубиной 20 см, частота тока сети составляла 85 кГц. Приемники были установлены в серийный автомобиль *Renault Kangoo*, мощность тягового привода которого составляет

20 кВт. Воздушный зазор между дорожным полотном и приемником энергии в автомобиле составлял 175 мм. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.15.

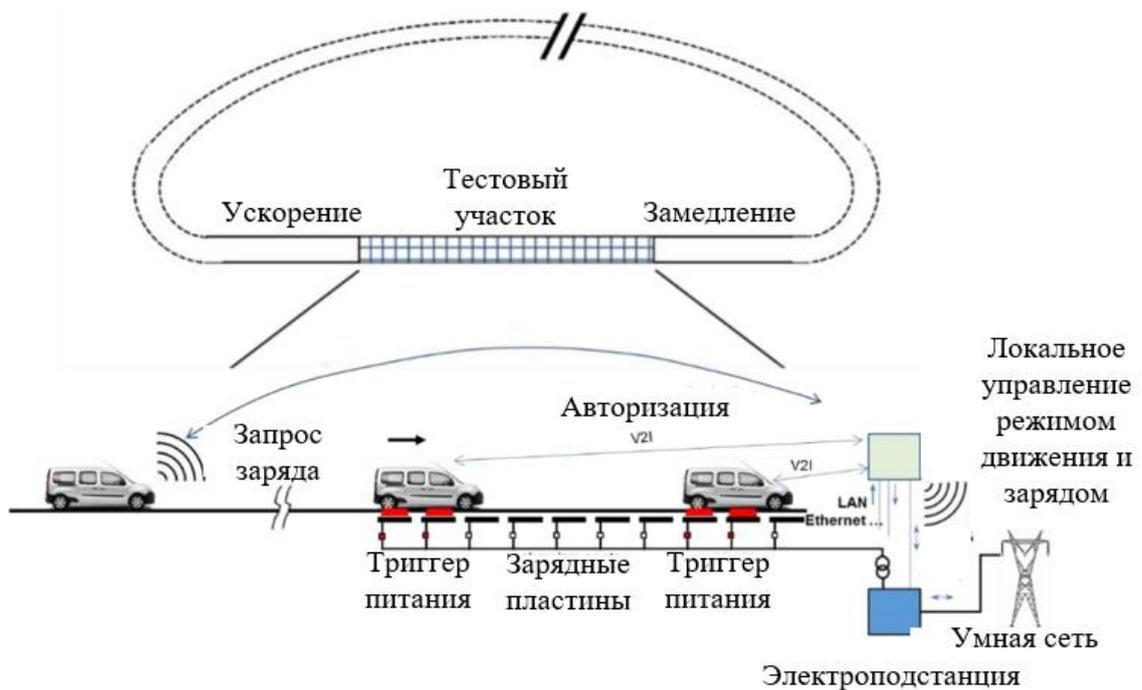


Рисунок 1.15 – Схема экспериментальной установки в Версаль-Стори [106]

Проведено 54 тестовых замера, в результате которых был достигнут КПД передачи энергии от сети к батарее транспортного средства 70% при различных величинах скорости движения, достигавшей 100 км/ч [107]. Разработчики отмечают, что данный показатель относительно невысокий ввиду инновационности и несовершенности данной технологии, однако в дальнейших исследованиях ожидаемый КПД передачи должен достигнуть 90%.

Индукционный способ передачи энергии от заложенного в дорожное полотно кабеля активно применяется коммерческими структурами. В частности, компания *SEW Eurodrive* предлагает решение *Movitrans* [108]. Производитель заявляет эффективность передачи энергии более 90% при воздушном зазоре менее 20 см. Также активно продвигаются подобные разработки компаний *Electreon* (Израиль) [109], *PRIMOVE* (Германия) [110], *Vedecom* (Франция) [111], *Conductix* (США) [112].

Таким образом, основываясь на достоинствах и недостатках существующих

систем бесконтактного подвода энергии и на результатах экспериментальных исследований, описанных в литературе, предлагается в данной работе для передачи энергии от сети к электромобилю использовать индукционную систему бесконтактного подвода энергии посредством кабеля, заложенного в дорожное полотно.

#### 1.4 Типы тяговых электроприводов

Типовая конфигурация тяговой системы автономных транспортных средств включает в себя следующие элементы: электрические двигатели, преобразователи энергии, энергетические установки. В зависимости от места расположения электрических двигателей тяговые системы электрического транспорта могут быть разделены на [113]:

1. Централизованные (один двигатель через систему редукторов приводит в движение колёса).
2. Распределенные (несколько двигателей управляются отдельно).

Схематическое изображение одной из версий централизованной тяговой системы представлено на рисунке 1.16. Для плавного и безударного переключения передач используется механическое сцепление.

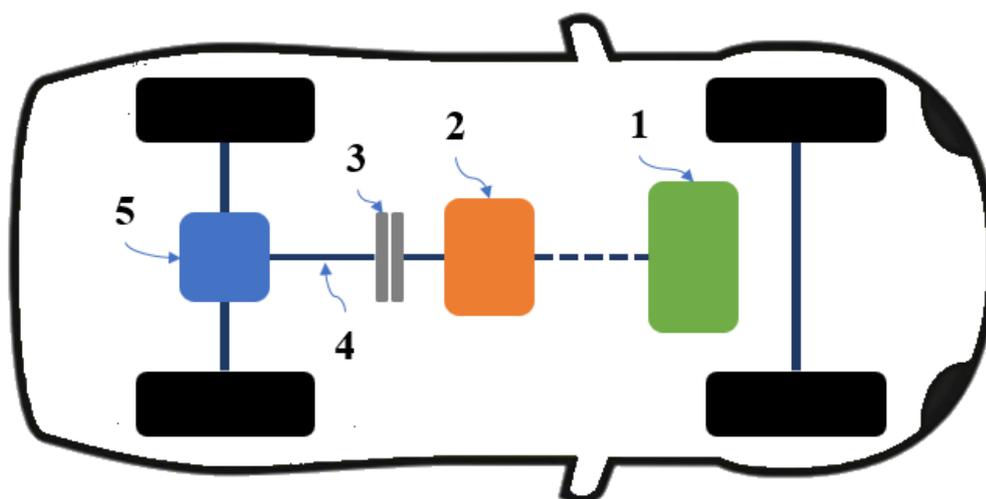


Рисунок 1.16 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с централизованным приводом (1 – источник электропитания; 2 – электрический двигатель; 3 – сцепление; 4 – редуктор; 5 – дифференциал)

Для функционального переоборудования классического автомобиля в электрический необходимо заменить двигатель внутреннего сгорания и топливный резервуар на электрический двигатель и источник электрической энергии. В такой конфигурации в конструкции сохраняется множество механических узлов, каждый из которых имеет свой КПД и влияет на потери энергии: редуктор, дифференциал, карданный вал, система переключения передач и прочие. Каждый из перечисленных узлов имеет значительные вес и габариты, что приводит к дополнительным затратам энергии.

Описанная конфигурация может быть усовершенствована путём замены блока сцепления на редуктор с фиксированным передаточным числом, который, в свою очередь, напрямую присоединяется к двигателю (рисунок 1.17). Это позволяет снизить массогабаритные показатели и, в свою очередь, обеспечить более экономный расход энергии.

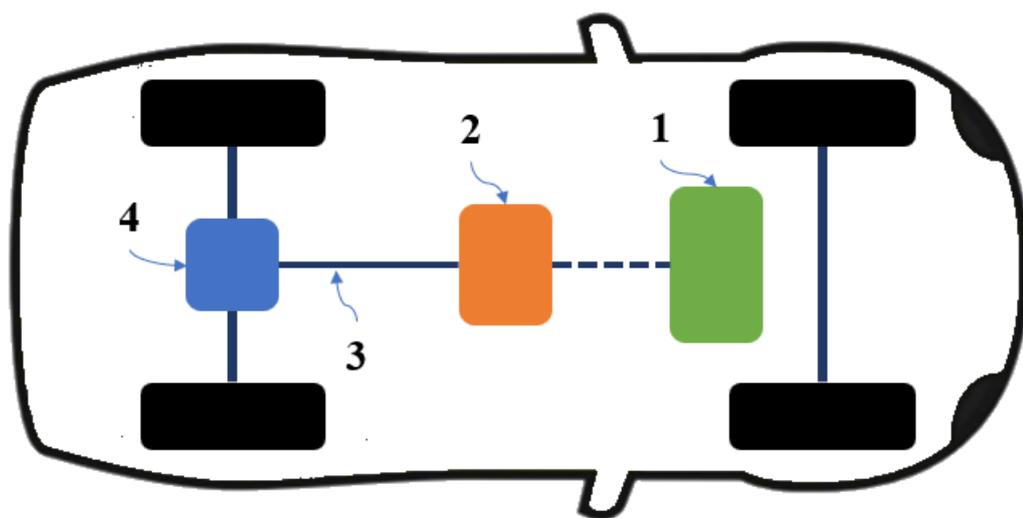


Рисунок 1.17 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с централизованным приводом без сцепления (1 – источник электропитания; 2 – электрический двигатель; 3 – редуктор с фиксированным передаточным числом; 4 – дифференциал)

Более энергоэффективным вариантом конструкции является присоединение тягового электрического двигателя напрямую к осевому дифференциалу (рисунок 1.18). Такой способ реализации позволяет снизить массогабаритные показатели транспортного средства за счет отсутствия редуктора, а также открывает

возможность реализовать систему распределенного привода при условии подключения второго двигателя на другую ось. Недостатком данной системы является необходимость подбора тихоходного тягового электродвигателя, что повышает риск возникновения проблемы обеспечения остаточного для быстрого старта запаса мощности.

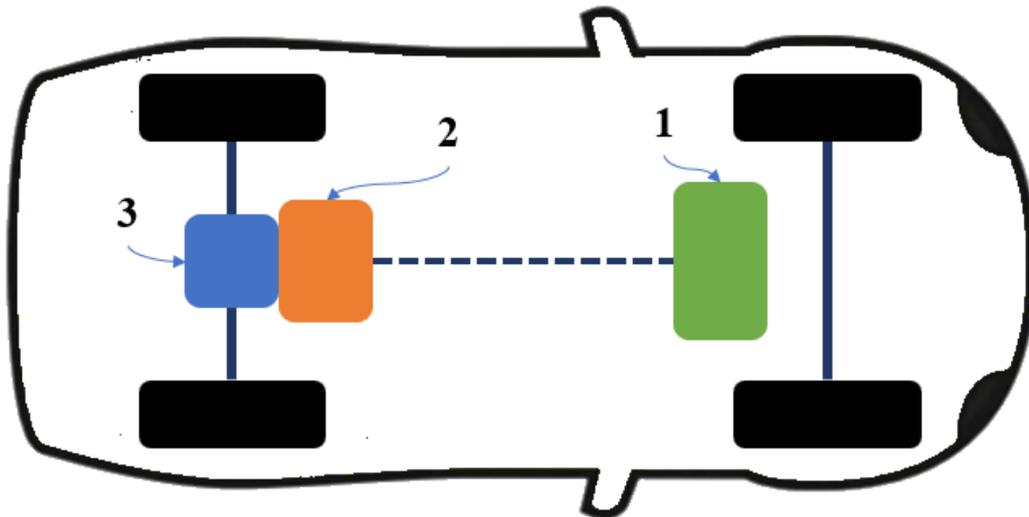


Рисунок 1.18 –Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с централизованным приводом, подключенным к осевому дифференциалу (1 – источник электропитания; 2 – электрический двигатель; 3 – дифференциал)

Распределенный привод колёс является одной из наиболее гибких в управлении компоновок тяговой системы транспортного средства, т.к. обеспечивается возможность независимого управления частотой и моментом вращения каждого колеса в отдельности. Это достигается за счет одновременного управления несколькими электрическими двигателями. Таким образом, надёжность системы и эффективность передачи механической энергии от двигателя к колесу повышаются за счёт сокращения цепи передачи и устранения потерь механической энергии за счёт исключения сцепления, редуктора, дифференциала и полуоси. В трансмиссии потери при передаче вращения достигают 20% от общей вырабатываемой мощности [114]. Одним из вариантов реализации распределенной системы тягового привода является использование мотор-колёс (рисунок 1.19). Это реализуется посредством помещения

электродвигателя, тормозной системы и подвесок непосредственно внутрь колеса. Помимо увеличения управляемости, важным преимуществом использования мотор-колёс является выигрыш в габаритных показателях: из-за отсутствия ряда конструктивных составляющих освобождается место для расположения на борту транспортного средства дополнительного оборудования и пассажиров.

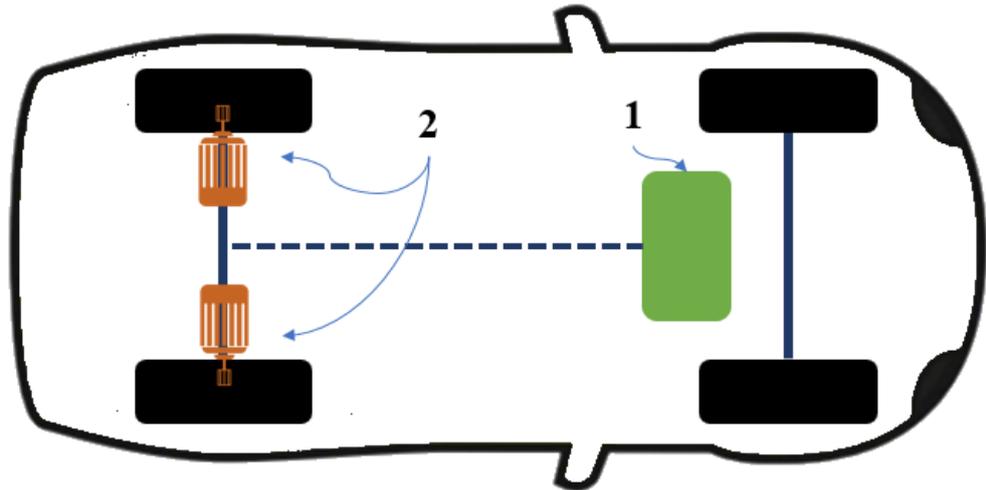


Рисунок 1.19 – Расположение тяговой системы в автономном электрическом транспортном средстве с мотор-колесами (1 – источник электропитания; 2 – мотор-колесо)

Мотор-колёса всё чаще встречаются в практике [114, 115], причём используют эту конструкцию не только для ровных поверхностей и близкого к идеальному дорожному покрытию, но и для бездорожья [116]. При этом одним из главных недостатков данной конструкции является слишком большая неподрессоренная масса, оказывающая негативное влияние на подшипники и другие элементы подвески, ускоряя их износ и передавая на кузов транспортного средства больше вибраций [117]. В работе [118] было проведено моделирование, в котором сравнивались нагрузки, приходящиеся на колесо стандартного автомобиля и мотор-колесо электромобиля. Исследование показало, что при воздействии неровностей дорожного полотна сила, действующая на неподрессоренную массу транспортного средства с мотор-колесами, ненамного превышает силу, приходящуюся на стандартное колесо. Также в исследовании сравнивались частоты вибраций, издаваемых стандартным колесом и мотор-колесом при вращении на различных скоростях. Результаты исследования говорят о том, что

частоты вибраций, издаваемых мотор-колесом, находятся в пределах допустимых диапазонов, обеспечивающих комфорт и безопасность водителя и пассажиров транспортного средства.

Для снижения влияния негативных факторов от использования мотор-колес, одним из которых является большая неподрессоренная масса, ведутся успешные разработки новых конфигураций подвески [119], которые способствуют снижению динамической нагрузки на шины и кузов электромобиля, что говорит о том, что применение мотор-колес является перспективным направлением для исследования.

### 1.5 Алгоритмы управления

Для достижения наилучших показателей регулирования координат электропривода необходимо выбрать наиболее подходящий тип регуляторов.

На этапах зарождения автоматизации применение ставших на данный момент классическими ПИД-регуляторов давало огромный экономический эффект, потому что на тот момент учет нелинейностей объектов управления не являлся критичным [120].

ПИД-регуляторы, появившиеся еще в 1910 году [121], являются наиболее распространенным типом регуляторов благодаря простоте реализации, малым требованиям к вычислительной мощности, а также доказанной годами надежности и эффективности.

Настройка ПИД-регулятора может осуществляться несколькими способами. Одним из них является метод Циглера-Николса. Данный метод является эвристическим и основывается на эмпирическом подборе коэффициентов. Сначала коэффициент пропорциональной составляющей  $K_p^*$  увеличивается до тех пор, пока система не достигнет границы устойчивости, т.е. в ней должны возникнуть незатухающие периодические колебания (автоколебания) [122]. Данный коэффициент фиксируется, далее определяется период автоколебаний  $T^*$ . Итоговые коэффициенты ПИД-регулятора определяются по соотношениям, представленным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Коэффициенты ПИД-регулятора по методу Циглера-Николса.

	$K_p$	$K_i$	$K_d$
П-регулятор	$0,5K_p^*$		
ПИ-регулятор	$0,45K_p^*$	$0,54 K_p^* / T^*$	
ПИД-регулятор	$0,6K_p^*$	$1,2 K_p^* / T^*$	$0,75 K_p^* / T^*$

Достоинством данного метода является то, что для настройки регуляторов не требуется математическое описание объекта управления, который может являться нелинейным и иметь высокий порядок. Также для настройки регуляторов по данному методу от наладчика не требуется глубокое знание теории автоматического управления.

Недостатком данного метода является необходимость выводить систему на границу устойчивости, что для некоторых объектов управления является нежелательным. Также настройка регуляторов может занять длительное время, так как при поиске необходимого пропорционального коэффициента первое приближение может оказаться далеким от необходимого. Помимо этого, САУ, рассчитанная данным способом, не обладает инвариантностью к изменениям внутренних параметров объекта управления.

Системы автоматического управления (САУ) современных приводов являются замкнутыми и строятся на основе принципа подчиненного регулирования. В качестве регулируемой величины принимается некоторая координата состояния объекта управления, которую необходимо регулировать в зависимости от требований технологического процесса: скорость вращения вала, положение рабочего органа, крутящий момент и т.д. [123].

Зачастую в задачах управления электроприводом помимо главной переменной необходимо управлять несколькими промежуточными, поэтому в САУ организуется несколько контуров управления со своими регуляторами.

Такая структура САУ позволяет производить расчет и оптимизацию параметров регуляторов каждого контура отдельно. Синтез регуляторов производится последовательно, достигая желаемых динамических свойств каждой

локальной части системы регулирования: начиная с внутреннего контура, далее – промежуточные контуры (при наличии) и внешний [124]. Регулятор рассчитывается таким образом, чтобы он:

1. Компенсировал наибольшую постоянную времени звена объекта управления, заключенного в данном контуре.
2. Обеспечивал астатизм системы по управляющему воздействию.
3. Обеспечивал оптимизацию процессов регулирования по выбранному критерию[125].

При использовании данного метода принимается ряд допущений:

1. Пренебрегается рядом магнитных и электрических явлений в двигателе, преобразователях и иных устройствах для упрощения их математической модели.
2. Характер изменения тока и сигналов управления принимается непрерывным.
3. Величина некомпенсируемой постоянной времени выбирается, исходя из требуемого быстродействия системы. Классически принято выбирать некомпенсируемую постоянную времени на уровне  $2 \cdot 10^{-3}$ .

Таким образом, каждый внешний контур зависит от действия внутреннего по отношению к нему контура, т. е. каждый внешний контур является подчиненным к внутреннему.

В зависимости от требований к качеству регулирования переменных состояния электропривода может быть проведена настройка на «модульный» или «симметричный» оптимум. Различия показаны в таблице 1.3:

Таблица 1.3 – Сравнение «модульного» и симметричного оптимумов [126]

Критерий	Модульный оптимум	Симметричный оптимум
Передаточная функция разомкнутого контура	$W_{MO}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}$	$W_{CO}(p) = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2p^2(T_{\mu}p + 1)}$
Передаточная функция замкнутого контура	$\Phi_{MO}(p) = \frac{k}{T^2p^2 + 2\varepsilon Tp + 1}$ где $k = 1, T = T_{\mu}\sqrt{2}, \varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{2}$	$\Phi_{CO}(p) = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^3p^3 + 8T_{\mu}^2p^2 + 4T_{\mu}p + 1}$

Продолжение таблицы 1.3

Перерегулирование	4.33%	43,4%
Время первого достижения заданного значения	$4.7T_{\mu}$	$3.1T_{\mu}$
Время регулирования	$4.15T_{\mu}$	$14.7T_{\mu}$
Преимущества	<p>Быстрота переходного процесса.</p> <p>Малое перерегулирование.</p> <p>Низкая чувствительность по отношению к изменению параметров регулятора и объекта управления.</p> <p>Простота расчета.</p>	<p>Очень быстрый переходный процесс.</p> <p>Отсутствие статической ошибки при любых объектах управления.</p> <p>Сравнительно низкая статическая ошибка при отработке возмущающих воздействий.</p>
Недостатки	<p>Высокая статическая ошибка для объектов управления с интегрирующим звеном.</p> <p>Относительно большая ошибка при отработке возмущающих воздействий.</p>	<p>Большое перерегулирование при отсутствии входного фильтра.</p> <p>Меньшее быстродействие при наличии входного фильтра.</p> <p>Более чувствителен к изменению параметров регулятора и объекта управления.</p>

К преимуществам САУ, построенных по принципу подчиненного регулирования, можно отнести то, что с их помощью возможно достижение оптимальных показателей качества переходных процессов, возможна разработка типовых систем регулирования и их простые методы расчета, простота настройки регуляторов, сокращающая время пуско-наладочных работ.

Недостатком таких систем является малое быстродействие, т.к. для корректной работы регуляторов внешний контур должен обладать меньшим быстродействием по сравнению с внутренним. Если регуляторы внутренних контуров будут настроены некорректно, то эти ошибки повлияют на работу

внешних контуров.

Как указывалось, большинство объектов управления в современной промышленности и технике представляют собой сложные нелинейные системы, к динамическим характеристикам которых предъявляются высокие требования. Применяя стандартные методы теории автоматического управления, не всегда удастся удовлетворить данные требования, так как математические модели данных объектов управления не всегда являются достаточно точными, а также имеют ряд допущений, а их внутренние параметры могут изменяться во время работы.

В последние годы все большее применение находит новое направление в регулировании координат электропривода — нейросетевые регуляторы, которые базируются на понятии искусственной нейронной сети (ИНС) [127]. Математические модели ИНС основаны по принципу, схожему с работой сетей нервных клеток живых организмов. Данный подход позволяет успешно решать задачи прогнозирования, распознавания образов, управления и др. [128].

Преимуществом нейронных сетей перед традиционными алгоритмами управления является их обучаемость. ИНС не программируются привычным способом, а обучаются на основе анализа входных и выходных данных. При успешном обучении ИНС может предсказать верный результат несмотря на отсутствие некоторых данных в обучающей выборке, а также при неполных или частично искаженных данных [129].

Выделяется различные типы обучения нейронных сетей [130]:

1. Обучение с учителем.
2. Обучение без учителя.
3. Комбинированное обучение, сочетающее в себе принципы обучений с учителем и без.
4. Обучение с подкреплением.

В данной работе используются методы обучения с учителем и с подкреплением.

Суть метода обучения с учителем заключается в тренировке ИНС на основе двух наборов данных: входном и целевом. Каждой строке входных данных

соответствует определенное целевое значение, определенное в процессе предварительной разметки.

Для обучения нейронной сети необходимо предоставить ей множество примеров размеченных наборов данных. В процессе обучения алгоритм пытается найти наиболее подходящий набор весов для каждого узла сети, чтобы минимизировать ошибку между предсказаниями и реальными значениями меток.

Процесс обучения нейронной сети с учителем включает следующие шаги:

1. Подготовка обучающих данных. Каждому входному набору данных должно соответствовать определенное значение на выходе. Например, если необходимо по величинам тока и напряжения определить потребляемую мощность электрической машины, в тренировочном наборе необходимо произвести подготовку данных «ток, напряжение» - «мощность».

2. Выбор архитектуры нейросети: необходимо выбрать архитектуру нейронной сети в зависимости от задачи. Например, для задач классификации можно использовать многослойный перцептрон, а для задач регрессии - рекуррентную нейронную сеть.

3. Обучение нейросети: после подготовки данных и выбора архитектуры, начинается процесс обучения нейронной сети. Для этого используются алгоритмы обратного распространения ошибки, которые позволяют оптимизировать веса узлов сети.

4. Оценка производительности: после завершения обучения, нейронная сеть должна быть оценена на тестовых данных (данные, которые не были проанализированы алгоритмом в процессе обучения). Это позволяет оценить ее производительность и определить, насколько хорошо она справляется с задачей, которую мы пытаемся решить.

5. Обновление параметров: если производительность нейронной сети на тестовых данных низкая, то параметры нейросети (веса узлов) могут быть обновлены для улучшения ее работы. Рекомендуется остановить процесс тренировки вовремя во избежание эффекта переобучения – ситуации, когда веса нейронной сети подбираются таким образом, что математическая модель как бы

заучивает ответы из тренировочного набора и теряет способность к генерализации, давая некорректные предсказания на новых наборах данных.

В целом, обучение нейронной сети с учителем — это процесс, который требует большого объема данных и вычислительных ресурсов, но при правильном подходе может привести к созданию эффективных алгоритмов машинного обучения.

Суть метода обучения с подкреплением заключается в том, что агент (*agent*), представляющий собой нейронную сеть (или совокупность нейронных сетей), итеративно методом проб и ошибок, совершая действия (*actions*) в рабочей среде (*environment*), пытается максимизировать значение целевой функции (*reward*) [131]. При обучении с подкреплением агент получает обратную связь в виде значения целевой функции с оценкой, насколько успешно он выполнил действие. В отличие от обучения с учителем, где агент обучается сопоставлять входные данные и правильные ответы, в данном методе целевая функция только оценивает текущее решение агента, но не предлагает путей его улучшения. Методом проб и ошибок, совершая выбранные алгоритмом из заранее заданного набора возможных действия, агент оказывает влияние на рабочую среду, стремясь максимизировать (или минимизировать) значение целевой функции. Получив обратную связь от окружающей среды, агенту необходимо определить следующее действие, которое наилучшим образом повлияет на значение целевой функции. Выученная последовательность действий (стратегия), которая применяется агентом для принятия решения о следующем действии на основе текущего состояния, называется политикой (*policy*). Политика определяет, следует ли агенту, когда он будет в следующий раз находиться в данном состоянии, предпринять действие, которое оказало наилучшее влияние на значение целевой функции в прошлый раз, либо попробовать другое действие, которое потенциально может дать более позитивный результат.

Обучение с подкреплением, по сути, является алгоритмом поиска. Очевидно, что чем больше состояний, в которых может оказаться агент, тем больше времени займет поиск наилучшего решения. Таким образом, пространство состояний, в

которых может оказаться агент, необходимо выбирать из расчета сокращения времени поиска решения, но не слишком его сужать. Таким образом, правильное формулирование целевой функции является одной из важнейших задач успешного обучения с подкреплением, так как ее изменение может сильно изменить поведение агента.

Основная идея формулирования целевой функции заключается в том, чтобы стимулировать действия, приносящее максимальное положительное влияние, и пресекать действия, негативно влияющие на состояние объекта управления в рабочей среде. Целевая функция несет информацию о цели агента, а не о методе ее достижения.

Оптимальное решение поставленной задачи является реализацией политики, которая была сформирована в результате итеративного обучения нейросетевого агента.

По сравнению с классическими регуляторами у нейрорегуляторов можно выделить следующие преимущества:

1. Тренировка происходит на реальных измеренных данных модели и приводит к более точному управлению каждого конкретного объекта управления.
2. Отсутствует необходимость участия специалиста в процессе настройки, его внимание требуется только при запуске обучения и контроле полученных результатов обучения.
3. Настройка может вестись специалистами, у которых отсутствуют знания теории автоматического управления.

Однако данные регуляторы не являются совершенными и имеют некоторые недостатки:

1. Требование больших вычислительных мощностей в процессе обучения.
2. Требование тщательно проработанной модели объекта управления.
3. Невозможность донастройки в ручном режиме. Однако, возможен запуск дотренировки.

В настоящее время в системах управления электротранспорта наиболее часто

используются ПИД-регуляторы. Однако, нейронные сети, при всех своих достоинствах, могут использоваться как для подбора их коэффициентов, так и служить полноценной заменой ПИД-регуляторов [128]. В литературе описано множество различных применений нейронных регуляторов в системах управления электроприводом.

В статье [132] используются ИНС для оценки и регулирования скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Цель работы состояла в том, чтобы добиться точного регулирования скорости по заранее заданной кривой, при том, что параметры двигателя и нагрузки заранее неизвестны. Система нейронного управления состояла из двух частей. Одной из них является нейронный наблюдатель, который используется для оценки скорости двигателя. Другой – нейронный регулятор, формирующий сигнал управления преобразователем. Работоспособность регулятора проверена моделированием при разных задающих сигналах скорости и разных нагрузках. Результаты моделирования показали преимущества, эффективность и хорошую производительность нейрорегулятора по сравнению с обычным ПИ-регулятором.

В работе [133] рассматривалась задача регулирования скорости электропривода прокатного стана в условиях изменения его механических параметров и влияния внешних возмущений. Для регулирования использовались регулятор нечеткой логики и нейронный регулятор, эффективность которых сравнивалась с помощью моделирования. Нейронный регулятор состоял из двух ИНС, одна из которых вычисляла коэффициенты ПИД-регулятора, другая определяла, в какие моменты и с какой скоростью производить обучение нейронной сети. Основным возмущением на прокатном стане является заклинивание валков, которое было смоделировано в виде ступенчатого возмущения. В случае возникновения данного возмущения нейронный регулятор изменял коэффициенты ПИ-регулятора. По сравнению с регулятором нечеткой логики это позволило снизить максимальное отклонение скорости привода от заданной на 18%, а время компенсации возмущения на 30%.

Для регулирования частоты выходного напряжения бесконтактного

синхронного генератора, входящего в состав электромашинного преобразователя в работе [134] применялись и сравнивались штатный регулятор, регулятор нечеткой логики и нейронный регулятор. При подключении нагрузки частота напряжения синхронного генератора меняется. Для повышения качества регулирования частоты предложены нейронный и нечеткий регуляторы. Результаты экспериментальных исследований показали, что при подключении нагрузки провалы частоты с нечетким регулятором уменьшаются в среднем в 1,7 раза, а с нейронным регулятором — в 3,3 раза по сравнению со штатным регулятором. В переходных процессах нечеткий регулятор превосходит по быстродействию штатный в 1,5 раза, а нейронный регулятор превосходит штатный в 1,84 раза. Таким образом, можно сделать вывод, что нейронный регулятор позволяет добиться лучшего качества регулирования по сравнению с нечетким регулятором.

Для повышения производительности и улучшения энергоэффективности в работе [135] предложено применение нейронных регуляторов для изменения коэффициентов ПИ-регулятора в зависимости от количества загружаемого материала в электрическую печь. Коэффициенты ПИ-регулятора изначально рассчитаны для пустой печи, однако в зависимости от количества загруженного материала в печь, меняются внутренние параметры системы, поэтому она уже не может считаться линейной, в таком случае рассчитанный для пустой печи ПИ-регулятор не обеспечивает требуемые динамические характеристики переходного процесса. Предложенный нейросетевой регулятор изменяет коэффициенты ПИ-регулятора в режиме реального времени в зависимости от количества загруженного материала в печь. Результаты исследования показывают, что предложенный нейросетевой регулятор обеспечивает сокращение времени протекания технологического процесса на 5-12%, а также экономию энергопотребления на 7-13%.

Для определения оптимальных коэффициентов ПИ-регулятора скорости отдельных колесных двигателей электромобиля в работе [136] предлагается использование нейрорегулятора. Кроме этого, в работе исследуется способность нейрорегулятора компенсировать изменение внутренних параметров объекта

управления. Для этого при моделировании сопротивления обмоток статора и ротора увеличили на 15%, имитируя их нагрев. Подстраивая параметры ПИ-регулятора, нейрорегулятор успешно компенсировал изменение внутренних параметров объекта управления. Результаты моделирования показали, что применение нейрорегулятора для определения оптимальных коэффициентов ПИ-регулятора позволяет уменьшить пусковые токи и скачки крутящего момента, тем самым увеличивая срок службы электродвигателя и механических компонентов. Помимо этого, увеличивается энергоэффективность электропривода благодаря уменьшению потерь на 36%.

### **Выводы по главе 1**

1. На основании обзора научно-технической литературы установлена целесообразность использования бесконтактного подвода энергии к автономному ТС, которая обеспечивает снижение габаритов транспортного средства, независимость от погодных условий и эстетичный внешний вид рабочего пространства.

2. Доказано преимущество применения нейросетевого управления тяговым электроприводом, что приводит к увеличению энергоэффективности электропривода благодаря уменьшению потерь.

3. Показаны преимущества применения комбинированной энергоустановки с буферным накопителем энергии, который можно использовать в качестве основного источника питания при переезде с одной линии на другую или при исчезновении питающего напряжения.

4. Предложено использование четырехколесного ТС с двумя ведущими мотор-колёсами на базе *BLDC*-двигателей для повышения надёжности системы и эффективности передачи энергии от двигателя к колесу.

## ГЛАВА 2 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В качестве объекта исследования принято транспортное средство массой 3 тонны (автомобиль марки «Газель» [137]) и габаритами: ширина 2,067 м, высота 2.137 м, колесами *175/35R15* диаметром 0.47 м.

Предполагаемая среда использования – пассажирские перевозки в городской черте и на территории предприятий, где маршруты и скорость движения транспортных средств строго регламентированы [138].

### 2.1 Выбор испытательного цикла движения

Движение транспортного средства имеет циклический характер. Цикл движения ТС может включать различные этапы, такие как:

1. Пуск транспортного средства.
2. Разгон: увеличение скорости ТС.
3. Установившееся движение: движение ТС без ускорения или замедления.
4. Подтормаживание: кратковременное торможение для изменения скорости или направления движения.
5. Торможение: снижение скорости или остановка автомобиля.

Реальный цикл движения ТС может быть более сложным и разнообразным, чем просто последовательность этапов пуска-установившегося движения-торможения. В частности, движение в городской среде имеет большее число разгонов и торможений, а также более низкие скорости по сравнению с быстрыми загородными циклами, характеризующимися большей продолжительностью движения в установившемся режиме. Это необходимо учитывать при разработке систем управления и оптимизации движения ТС.

Для обеспечения удобства теоретических исследований и проведения стандартизированных испытаний ТС используются определенные ездые циклы [139-142]. В настоящее время в литературе отсутствует консенсус относительно выбора предпочтительных циклов движения: в ряде исследований используют стандартизированные ездые циклы, в других проводят расчёты на данных о

мгновенных значениях, записанных в ходе реальных экспериментов [143-145].

Для исследований динамических показателей и расчёта параметров энергопотребления лёгкого транспорта созданы несколько групп испытательных циклов, разделенных по территориальному признаку.

В США стандартные испытательные циклы движения регламентируются Агентством по защите окружающей среды *EPA* (*United States Environmental Protection Agency*) [146]. Современная процедура включает в себя несколько испытаний, отличающихся по продолжительности, скорости и динамике вождения (рисунок 2.1):

1. Вождение по городу (*FTP-75*).
2. Вождение на шоссе (*HWFET*).
3. Динамичное вождение (*SFTP US06*).
4. Дополнительное испытание кондиционирования воздуха (*SFTP SC03*).

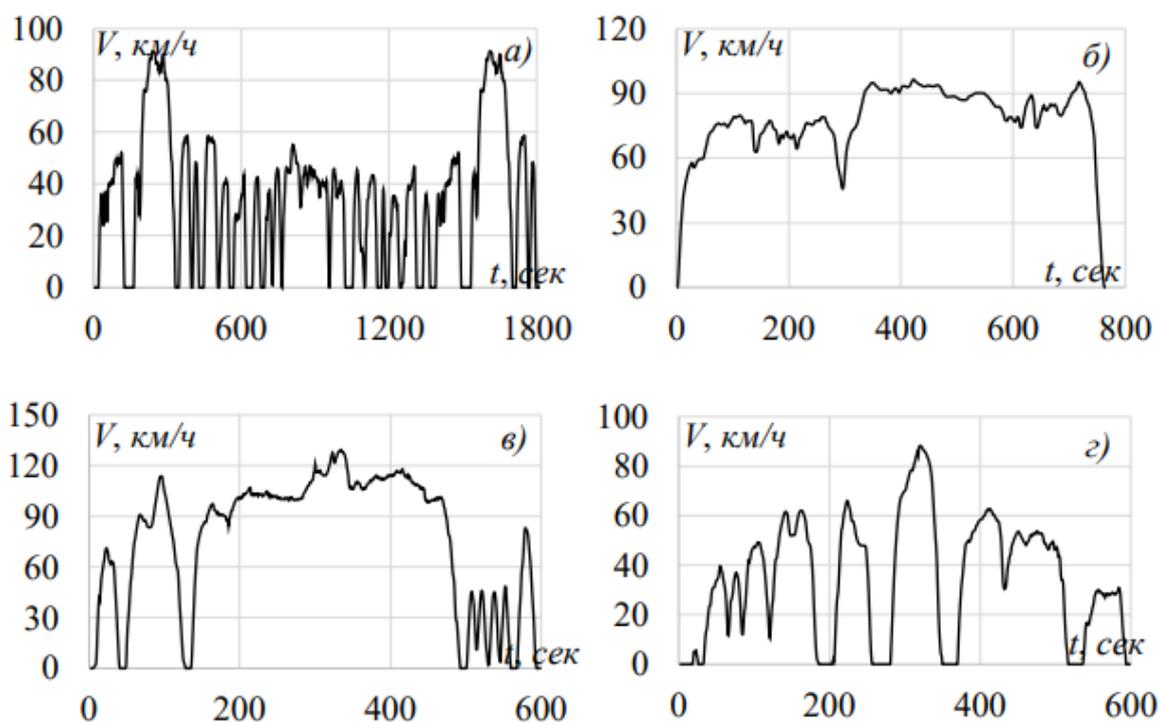


Рисунок 2.1 – Циклы испытаний, соответствующие процедуре *EPA*: а) *FTP-75*, б) *HWFET*, в) *SFTP US06*, г) *SFTP SC03*

В Японии регламентирование стандартных циклов движения осуществляется Национальным агентством технологий автомобильного и наземного транспорта

*NALTEC* (National Agency for Automobile and Land Transport Technology) [147]. Один из циклов – *JC08* (рисунок 2.2).

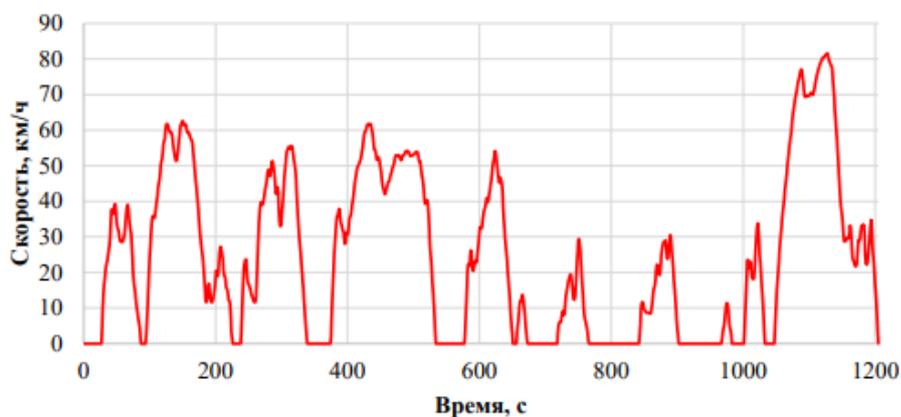


Рисунок 2.2 – Цикл испытаний *JC08*

Характер данного ездового цикла схож с американским циклом *FTP-75*, имитирующим интенсивный стиль вождения в городском потоке с частым чередованием ускорений и замедлений.

Длительность цикла 1205 секунд, максимальная скорость 81,6 км/ч, средняя скорость движения 24,4 км/ч. Относительно низкая средняя скорость цикла соответствует движению транспортных средств в крупных городах с учетом остановок на светофорах, перекрестках, а также пробок и других затруднений.

В Европе регламентирующим органом в отношении испытательных стандартов для транспортных средств выступает Еврокомиссия [148, 149]. В европейском цикле *NEDC* используется наиболее простая методика описания движения для оценки вредных выбросов автомобилей (рисунок 2.3). Этот цикл представляет собой типичный режим движения на европейских дорогах со средней скоростью 33,6 км/ч и максимальной – 120 км/ч.

Методика расчёта *NEDC* была разработана в 1970 году и применялась для испытаний транспортных средств вплоть до 2017 года. Данная методика не позволяет получить объективные оценки запаса хода для электромобилей, хотя вполне применима для транспорта на дизельном или бензиновом топливе.

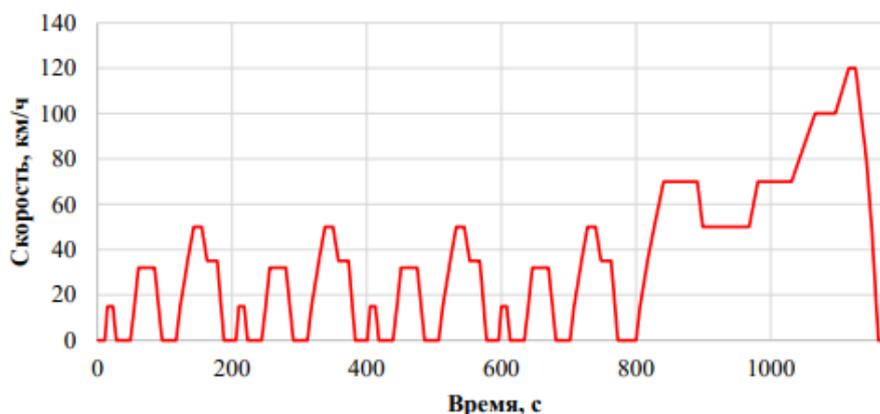


Рисунок 2.3 – Цикл испытаний *NEDC*

В силу этих факторов на смену *NEDC* пришел наиболее современный и приближенный к реальному поведению водителей европейский стандартизированный набор циклов движения *WLTP* (*Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure*). В основе этих циклов лежит обработка информации о поездках различных видов транспорта в разных погодных условиях и на различных типах дорог нескольких стран, общая длина которых составляет порядка 765 тысяч километров. Данный набор содержит три компонента, отличающиеся по соотношению Мощность, Вт / Масса, кг (*Power-to-Mass Ratio (PMR)*) и скоростными ограничениями:

1. *WLTP Class 1* –  $PMR \leq 22$ , максимальная скорость  $< 70$  км/ч.
2. *WLTP Class 2* –  $22 < PMR \leq 34$ , максимальная скорость  $< 90$  км/ч.
3. *WLTP Class 3* –  $PMR > 34$ , максимальная скорость  $< 135$  км/ч.

В России процесс оценки расхода топлива и сопутствующих выбросов регулируется регламентом «О безопасности колесных средств», в котором рекомендуется придерживаться правил №83 и №101 ЕЭК ООН, предусматривающих использование описанных ранее циклов [150]. В силу указанных выше преимуществ, энергетического расчёта из [151], а также соответствия поставленной задаче изучения режимов движения ТС в городской черте и на территории предприятий, для исследования в данной работе был выбран цикл *WLTP Class 1*, описывающий динамичную езду в городской черте и предусматривающий разгон до относительно невысокой максимальной скорости 64,4 км/ч (рисунок 2.4).

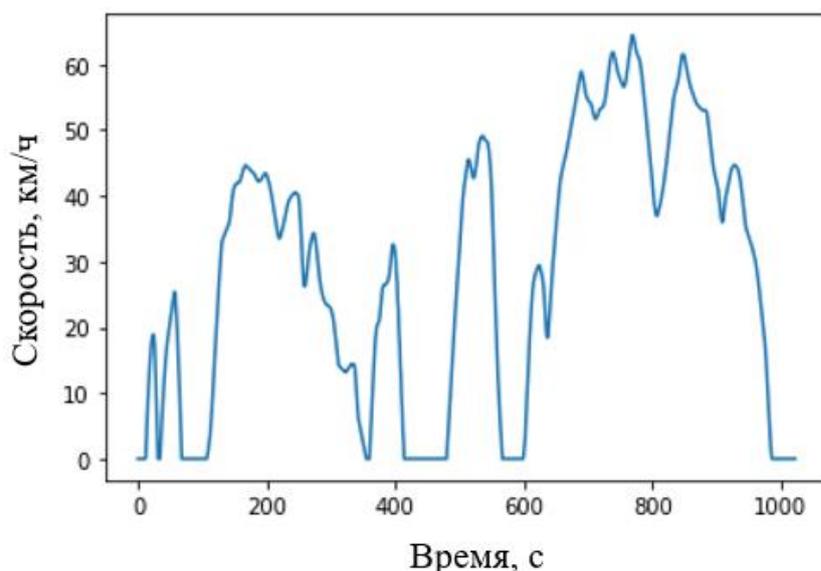


Рисунок 2.4 – Профиль стандартизированного цикла движения *WLTP Class 1*

## 2.2 Выбор элементов тягового электропривода

### 2.2.1 Расчёт тягового двигателя

Для определения необходимой мощности тягового электродвигателя на основе выбранного цикла движения ТС было использовано два различных по сути метода: метод среднеквадратичной мощности [152] и метод статистического анализа [153].

В основе обоих методов лежит система уравнений для определения требуемой механической мощности на ободе колеса:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_m = F_m * V_{\text{пуск}}^2 \\ F_m = (1 + \gamma) * m * a_{\text{пуск}} + W_o \\ W_o = W_{\text{кач}} + W_{\text{аэр}} \\ W_{\text{кач}} = m * g * f_{\text{удск}} \\ W_{\text{аэр}} = S * \alpha * V_{\text{пуск}}^2 \end{array} \right. ,$$

где  $P_m$  – требуемая механическая мощность на ободе колеса движущегося транспортного средства, Вт;

$F_m$  – тяговое усилие на ободе колеса, Н;

$V_{\text{пуск}}$  – скорость, измеренная для участка цикла, м/с;

$\gamma$  – дополнение к коэффициенту момента инерции вращающихся деталей автомобиля;

$m$  – масса ТС, кг;

$a_{\text{пуск}}$  – ускорение, измеренное для участка цикла,  $\text{м/с}^2$ ;

$W_0$  – основные силы сопротивления движению ТС, Н;

$W_{\text{кач}}$  – сила сопротивления качению ТС, Н;

$W_{\text{аэр}}$  – сила аэродинамического сопротивления движению ТС, Н;

$g$  – ускорение свободного падения, принято  $9,81$ ,  $\text{м/с}^2$ ;

$S$  – площадь миделевого авто, равная  $0,9 \cdot \text{высота} \cdot \text{ширина}$  ТС,  $\text{м}^2$ ;

$\alpha$  – коэффициент обтекаемости кузова ТС, принят  $0,3$ ,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$ .

Значения ускорения и необходимой механической мощности на ободу колеса рассчитаны для каждого отрезка цикла (рисунок 2.5).

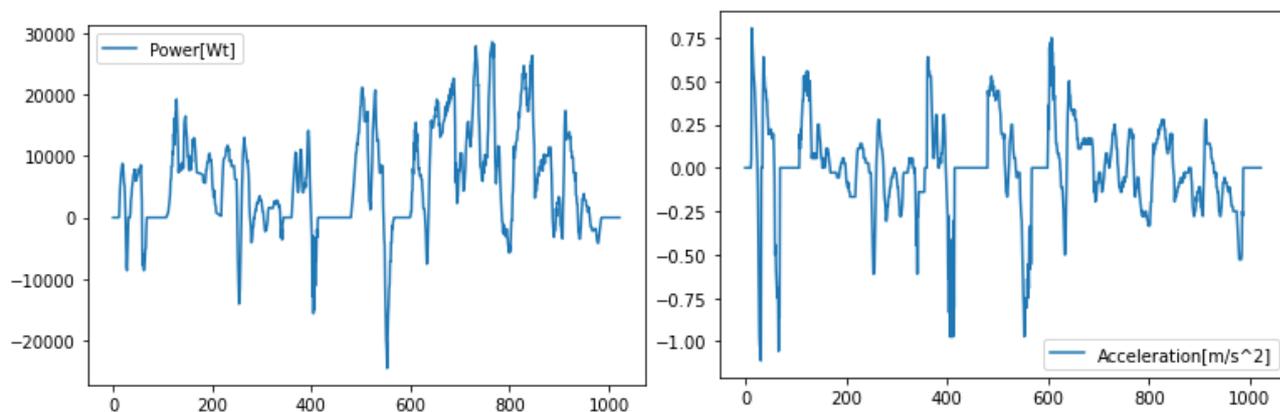


Рисунок 2.5 – Значения требуемой мощности и ускорения, рассчитанные для стандартного цикла движения *WLTP Class 1*

В случае использования метода среднеквадратичной мощности требуемая величина определяется на основе следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{дв.ном}} \geq P_{\text{ср.кв.}} * \sqrt{\frac{B_{\text{дл}}}{B_0} * K_{\text{н}} * K_{\vartheta} * K_3} \\ P_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^T (P(t))^2 dt} \end{array} \right. ,$$

где  $P_{\text{ср.кв.}}$  – среднеквадратичное значение требуемой мощности, Вт;

$\frac{B_{\text{дл}}}{B_0}$  – соотношение теплоотдач (для двигателей с самовентиляцией или независимым охлаждением принимается 1);

$K_n$  – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между двигателями. В данной работе принят равным 1.

$K_g$  – температурный коэффициент. В данной работе принят равным 1, т.к. влияние температуры окружающей среды на работу тягового электропривода выходит за рамки проводимого исследования.

$K_3$  – коэффициент запаса мощности. В данной работе принят 3 в соответствии с паспортными данными *BLDC*-двигателей серии *HPM*;

$T_{ц}$  – время цикла, с.

Метод расчета среднеквадратичной мощности позволяет увидеть усредненную картину для всего цикла. При исследовании тягового электропривода со значительными колебаниями переменных состояния на длинных отрезках времени данный метод отсекает информацию об экстремальных значениях и не дает объективной картины.

Методы статистического анализа, напротив, позволяют учесть изменения координат исследуемого электропривода. Они особенно необходимы для понимания закономерностей таких случайных процессов, какие показаны на рисунке 2.5.

При использовании статистических методов необходимо прежде всего доказать стационарность и эргодичность случайного процесса изменения мощности при движении исследуемого ТС по выбранному циклу.

Доказательство стационарности процесса изменений мощности исследуемого ТС при прохождении стандартного цикла *WLTP Class 1* было произведено методом дополненного теста Дики-Фуллера [154].

Временной ряд считается стационарным, если он не содержит тренда, имеет постоянную дисперсию, а также постоянную структуру автокорреляционной функции.

Тест Дики-Фуллера основан на двух гипотезах:

1. Нулевая гипотеза: временной ряд нестационарен.
2. Альтернативная гипотеза: временной ряд стационарен.

Оценка производится на основании следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \Delta y_t = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \delta_1 \Delta y_{t-1} + \dots + \delta_{p-1} \Delta y_{t-p+1} + \varepsilon_t \\ DF_\tau = \frac{\hat{\gamma}}{SE(\gamma)} \end{cases},$$

где  $\alpha$  – константа,  $\beta$  – коэффициент временного тренда,  $p$  – порядок запаздывания процесса авторегрессии,  $\gamma$  – переменный коэффициент. Величины  $\alpha, \beta, p$  варьируются в соответствии с выбранным подходом к исследованию.

Затем проводится тест на единичный корень при нулевой гипотезе  $\gamma = 0$  против альтернативной гипотезы  $\gamma < 0$ . После того как значение статистического показателя теста  $DF_\tau$  рассчитано, его можно сравнить с соответствующим табличным критическим значением теста Дики-Фуллера. Если вычисленная тестовая статистика меньше (имеет большее по модулю отрицательное значение), чем критическое значение, то нулевая гипотеза  $\gamma = 0$  отвергается и единичный корень отсутствует.

Значение статистики расширенного теста Дики-Фуллера представляет собой отрицательное число. Чем она меньше, тем более вероятен отказ от гипотезы о наличии единичного корня при определенном уровне достоверности. Для размера выборки  $T_B > 500$  критические значения на различных уровнях Дики-Фуллера представлены в таблице 2.1 [154]:

Таблица 2.1 – Критические значения на различных уровнях Дики-Фуллера

1%	5%	10%
-3.437	-2.864	-2.568

В результате проведенного анализа с использованием [155, 156] значение статистического показателя теста  $DF_\tau = -3.741$  для исследуемого процесса, следовательно, отвергнув нулевую гипотезу с уровнем значимости менее 1%, можно утверждать, что исследуемый процесс является стационарным.

Эргодичность подобных процессов была доказана в [48]. В связи с этим в данной работе сделано допущение об эргодичности исследуемого процесса.

При проведении статистического анализа необходимо определить закон распределения случайного процесса, который используется для решения

поставленных задач. Расчётами установлено, что закон распределения исследуемого случайного процесса близок к нормальному.

С использованием инструментов языка программирования *Python* была рассчитана функция распределения нормального случайного процесса изменения требуемой мощности на ободу колеса ТС (рисунок 2.6).

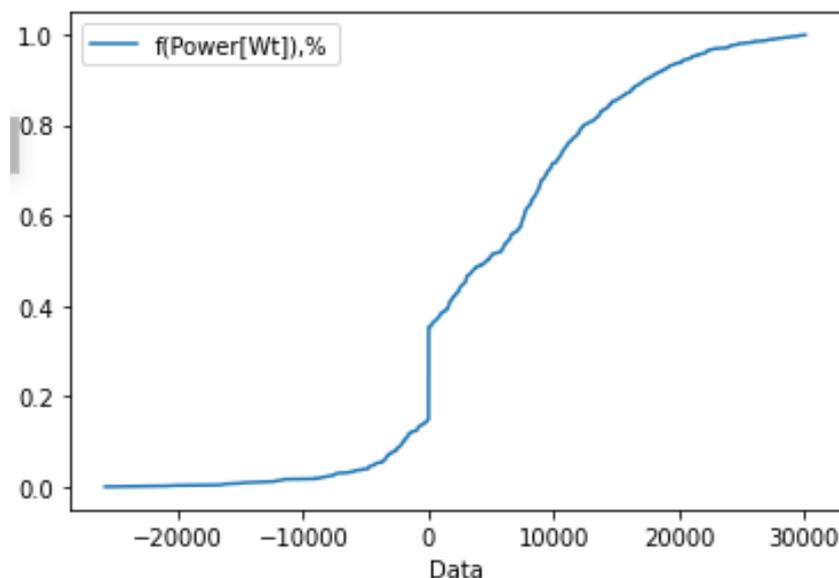


Рисунок 2.6 – Функция распределения изменения мощности во время прохождения ТС цикла WLTP Class 1

По данной функции с 95%-ным доверительным уровнем статистической значимости было определено, что для движения выбранного ТС необходима суммарная мощность тяговых двигателей более 30 кВт.

### 2.2.2 Выбор типа двигателя

Мотор-колеса могут иметь в своем составе электрические двигатели различного вида. Среди основных разновидностей выделяют двигатели постоянного тока (ДПТ), асинхронные двигатели (АД), синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) и бесщеточные двигатели постоянного тока (*BLDC – Brushless DC electric motor*).

В подавляющем большинстве электромобилей в качестве источника питания используется аккумуляторная батарея. Использование ДПТ существенно упрощает регулирование скорости вращения, и до прорыва в области силовой электроники и преобразования энергии ДПТ повсеместно использовались в электрических

транспортных средствах [157]. Однако данный тип двигателей обладает существенными недостатками, такими как высокие массогабаритные показатели, низкий КПД, дорогостоящее техническое обслуживание и низкая надежность ввиду наличия щеточно-коллекторного узла, который также накладывает ограничения на максимальную скорость вращения. Данные недостатки ограничивают использование ДПТ на современных электрических ТС.

В некоторых случаях предпочтение отдается асинхронным электродвигателям. Данный тип двигателей успешно используется в промышленных моделях *Tesla Model S*, *Tesla Roadster sport*, некоторых моделях электромобилей *Audi*, *BMW* и *Renault* [158]. Эти двигатели отличаются простотой конструкции, высокой надежностью и долговечностью, меньшими требованиями к техническому обслуживанию и низкой стоимостью. Благодаря развитию преобразовательной техники и систем векторного управления достигается большой диапазон регулирования скорости АД и высокая точность регулирования. Однако не самый высокий КПД, большие потери и низкий коэффициент мощности заставляют для электромобилей рассматривать другие типы электродвигателей.

Электродвигатели *BLDC* и СДПМ в конструкции ротора имеют постоянные магниты, благодаря чему достигается снижение массогабаритных показателей по сравнению с АД. Также в СДПМ и *BLDC* из-за отсутствия потерь в обмотках ротора существенно повышается КПД [159].

Между двигателями типов *BLDC* и СДМП существуют два ключевых различия:

- 1) Различия конструкции статора, а именно в способе намотки (рисунок 2.7). *BLDC* имеет сосредоточенную обмотку, т.е. каждая обмотка занимает один полюс магнитопровода, а СДПМ имеет распределенную обмотку, т.е. витки уложены в пазы так, что витки разных фаз перекрываются [160]. Распределенная обмотка *BLDC* проще и технологичнее в изготовлении, за счет чего цена изготовления двигателя – ниже.



**Распределенная обмотка**



**Сосредоточенная обмотка**

Рисунок 2.7 – Конструкции статорных обмоток

2) Способ управления. Питание *BLDC* осуществляется от источника, формирующего трапецидальное напряжение. Питание СДПМ осуществляется от источника синусоидального напряжения. Таким образом, реализация преобразователя для *BLDC* является более простой по сравнению с преобразователем для СДПМ [161]

Для регулирования работы *BLDC* двигателей можно использовать скалярный и векторный способы управления [162]. В случае со скалярным управлением (управляющие сигналы подаются дискретно в соответствии с таблицами коммутации) имеются значительные пульсации момента, которые существенно возрастают при увеличении нагрузки, что связано с ростом тока. Это объясняется переходными процессами при коммутации обмоток.

Системы векторного управления [163] обеспечивают возможность влияния на состояние магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами ротора. В случае использования векторного управления двигателем *BLDC* подаются синусоидальные управляющие сигналы, и пульсации момента незначительно снижаются относительно скалярного метода управления. Повышение вычислительной сложности в данной ситуации не соответствует получаемой выгоде в качестве управления, поэтому более простой скалярный метод управления двигателями *BLDC* более распространён.

В силу наличия пульсаций момента использование *BLDC*-двигателей рекомендуется для маломощных тяговых электроприводов (требуемая мощность

до 20 кВт на двигатель). В таком случае пульсации момента могут быть нивелированы за счёт инерции нагрузки. В тяговом приводе большей мощности целесообразно использовать СДПМ с векторным управлением.

На основе проведенного анализа преимуществ и недостатков различных типов двигателей можно сделать вывод, что для применения в мотор-колесе исследуемого объекта управления в силу относительно высокого коэффициента удельной мощности, низкой инерционности ротора, способности обеспечить большой крутящий момент при низких частотах вращения вала двигателя, возможности эффективно регулировать скорость в широком диапазоне, а также из экономической целесообразности наилучшим образом подходит *BLDC* двигатель.

Исходя из результатов проведённых выше расчётов из линейки стандартных *BLDC*-двигателей фирмы «Golden Motor» был выбран двигатель *HPM-20K* (рисунок 2.8).

	HPM-3000		HPM-5000				HPM-10K				HPM-20K		
	3000		5000				10000				20000		
Rated Power (W)	48	72	48	72	96	120	48	72	96	120	72	96	120
Voltage (V)	48	72	48	72	96	120	48	72	96	120	72	96	120
Rated Current (A)	80	50	125	85	60	48	260	170	130	95	330	245	
Max Phase Current (A)	240	220	300	260	200	160	600	500	400	300	1000	700	
Max Current Duration (s)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Rated Speed (rpm)	4000	3800	3500	3700	4000	4000	3500	3800	4000	4000	3600	3500	
Rated Torque (Nm)	7.5 - 8	7.5 - 8	14	14	16	16	27	27	26	26	55	55	
Stall torque (Rated torque x3)	22.5	22.5	42	42	39	39	81	81	78	78	165	165	
Interphase Resistance (mΩ)	9.6	21	5.2	12.4	20	29.8	3.8	5.3	10.5	15.2		10.5	
Inductance (μH)	112	258	85	154	310	420	48	104	182	240	182	182	
Types of Bearings (ISO)	Fan Side: 6304z Axle Side: 6006z		Fan Side: 6304z Axle Side: 6006z				Fan Side: 6205z* Axle Side: 6006z				Fan Side: 6307z Axle Side: 6307z		
Hall Electrical Angle	120°		120°				120°				120°		
Phase Angle Offset	-120		-120				-120				-120		
Number of Pole-Pairs	4		4				4				4		
Insulation Grade	H		H				H				H		
Insulation Level	IP54		IP54				IP54				IP54		
Temp. Sensor	КТУ-84/130		КТУ-84/130				КТУ-84/130				КТУ-84/130		
Cooling Type	Fan/Liquid		Fan/Liquid				Fan/Liquid				Liquid		
Weight (kg)	7.6		11				17				39		
Package Size (mm)	380x310x280		380x310x280				380x310x310				570x370x400		
Magnet Type NdFeB (Neodymium magnet)													

Рисунок 2.8 – Техническая спецификация *BLDC*-двигателей серии *HPM*

### 2.2.3 Мотор-колесо на базе *BLDC*-двигателя

Обмотки фаз статора *A*, *B*, *C* сдвинуты в пространстве на 120 градусов (рисунок 2.9). Каждая обмотка состоит из двух включенных встречно секций.

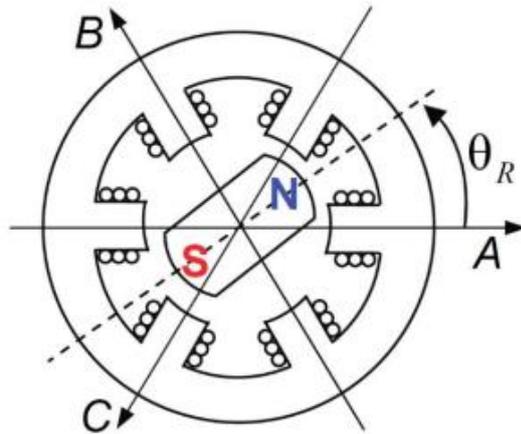


Рисунок 2.9 – Схема поперечного разреза *BLDC* двигателя с одной парой полюсов  
[162]

При протекании электрического тока в обмотке создаются разнонаправленные магнитные поля, вынуждающие магнитный ротор притягиваться в соответствующем положении. Подача электрического тока в обмотки в определенной последовательности провоцирует создание крутящего момента и вращение ротора вслед за магнитным полем.

Нулевым угловым положением ротора  $\theta_R$  принято считать такое направление, когда вектор потока ротора направлен в том же направлении, что и ось фазы *A* статора.

Уравнения равновесия обмоток статора в координатах *A, B, C* можно записать как:

$$\begin{cases} U_A = \frac{d\psi_A}{dt} + I_A R_\phi \\ U_B = \frac{d\psi_B}{dt} + I_B R_\phi \\ U_C = \frac{d\psi_C}{dt} + I_C R_\phi \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения;  $\psi_A, \psi_B, \psi_C$  – потокосцепления фазных обмоток;  $I_A, I_B, I_C$  – токи в фазах;  $R_\phi$  – активное сопротивление фазной обмотки.

Магнитный поток в каждой из обмоток зависит от:

1. Магнитного потока, создаваемого током текущей фазы статора.

2. Магнитного потока других фаз статора.
3. Магнитного потока, создаваемого магнитами ротора.

В математическом эквиваленте это выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \psi_A = L_A I_A + L_{AB} I_B + L_{AC} I_C + \psi_{fA} \\ \psi_B = L_B I_B + L_{AB} I_A + L_{BC} I_C + \psi_{fB}, \\ \psi_C = L_C I_C + L_{AC} I_C + L_{BC} I_B + \psi_{fC} \end{cases} \quad (2.2)$$

где  $L_A, L_B, L_C$  – индуктивности фазных обмоток;  $L_{AB}, L_{BC}, L_{AC}$  – взаимные индуктивности фазных обмоток;  $\psi_{fA}, \psi_{fB}, \psi_{fC}$  – потокосцепления, наводимые магнитом ротора.

В общем случае величины индуктивностей и взаимных индуктивностей фазных обмоток статора являются зависимыми от угла поворота поля  $\theta_e$ . При рассмотрении частного случая исполнения электрической машины с цилиндрическим ротором описанной зависимостью можно пренебречь.

Учитывая данное допущение, можно принять значения всех фазных обмоток идентичными между собой ( $L_A = L_B = L_C = L_\phi$ ). То же самое можно принять относительно взаимных индуктивностей фазных обмоток ( $L_{AC} = L_{BC} = L_{AC} = L_{\phi\phi}$ ). Таким образом, подставив уравнение (2.1) в уравнение (2.2), получим:

$$\begin{cases} U_A = L_\phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_C}{dt} + \frac{d\psi_{fA}}{dt} + I_A R_\phi \\ U_B = L_\phi \frac{dI_B}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_C}{dt} + \frac{d\psi_{fB}}{dt} + I_B R_\phi \\ U_C = L_\phi \frac{dI_C}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_B}{dt} + \frac{d\psi_{fC}}{dt} + I_C R_\phi \end{cases} \quad (2.3)$$

Учитывая, что производная потокосцепления магнита ротора от времени является ЭДС, уравнение (2.3) можно упростить до следующего:

$$\begin{cases} U_A = L_\phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_C}{dt} + E_A + I_A R_\phi \\ U_B = L_\phi \frac{dI_B}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_C}{dt} + E_B + I_B R_\phi \\ U_C = L_\phi \frac{dI_C}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_B}{dt} + E_C + I_C R_\phi \end{cases} \quad (2.4)$$

Для управления ЭДС на фазах статора *BLDC* двигателя используется принцип единичной функции. Суть его заключается во введении эквивалента ЭДС по форме, но имеющего максимальную амплитуду 1 В. Таким образом, связь между единичными функциями формы ЭДС  $E_{1A}, E_{1B}, E_{1C}$  и действительными значениями ЭДС в фазах  $E_A, E_B, E_C$  можно представить как:

$$\begin{cases} E_A = \psi_f \omega_e E_{1A} = \psi_f Z_p \omega_R E_{1A} \\ E_B = \psi_f \omega_e E_{1B} = \psi_f Z_p \omega_R E_{1B}, \\ E_C = \psi_f \omega_e E_{1C} = \psi_f Z_p \omega_R E_{1C} \end{cases} \quad (2.5)$$

где  $\psi_f$  – амплитуда потокосцепления ротора и фазной обмотки;  $\omega_e$  – скорость вращения поля;  $\omega_R$  – скорость вращения ротора;  $Z_p$  – число пар полюсов двигателя.

На рисунке 2.10 представлены единичные функции формы ЭДС для *BLDC* двигателей в зависимости от угла поворота поля статора.

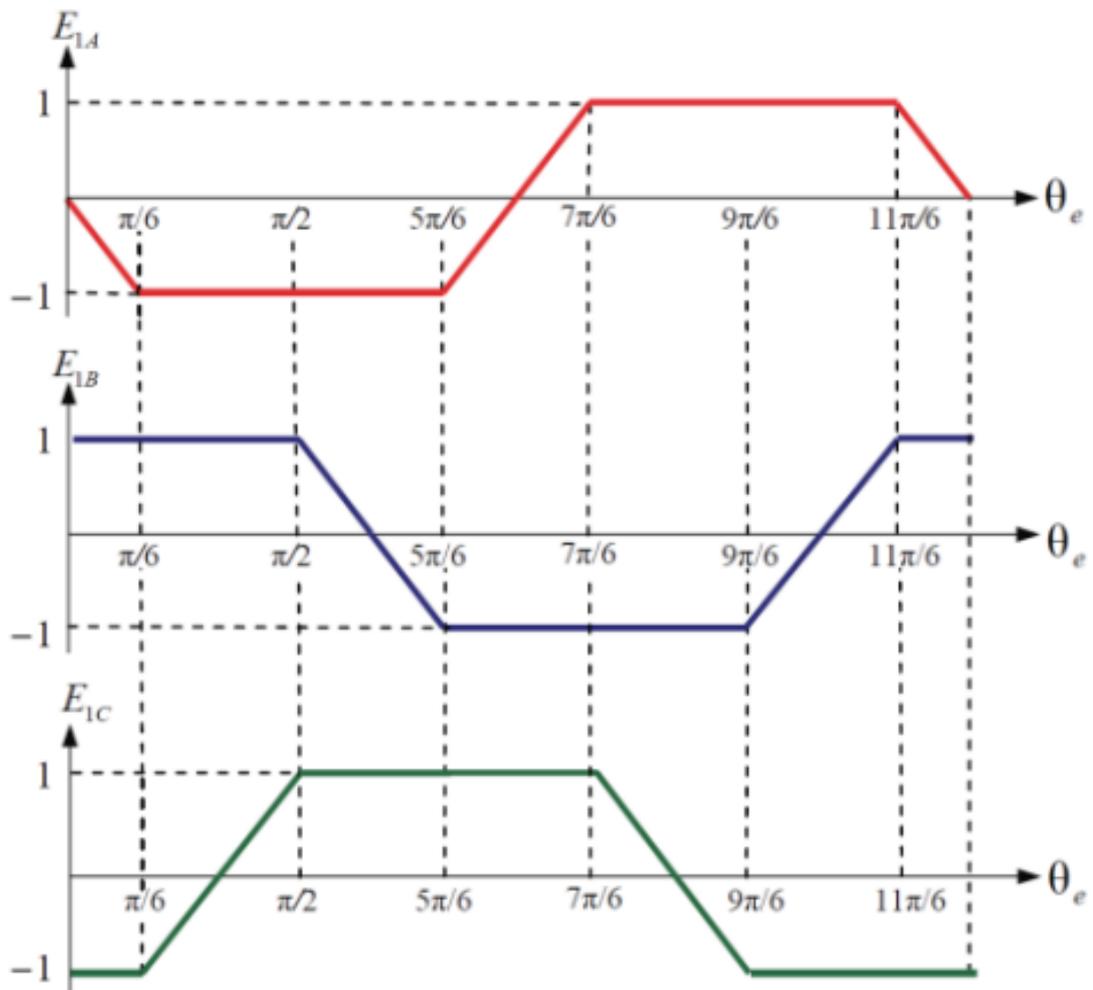


Рисунок 2.10 – Единичные функции формы ЭДС *BLDC* двигателей [162]

Решив систему уравнений (2.4) относительно производных фазных токов с учетом выражений системы уравнений (2.5) и добавив уравнение симметрии токов, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_A = \frac{d}{dt} I_B + \frac{1}{L_\phi + L_{\phi\phi}} (U_A - U_B - \psi_f Z_p \omega_R (E_{1A} - E_{1B}) - R_\phi (I_A - I_B)) \\ \frac{d}{dt} I_B = \frac{d}{dt} I_C + \frac{1}{L_\phi + L_{\phi\phi}} (U_B - U_C - \psi_f Z_p \omega_R (E_{1B} - E_{1C}) - R_\phi (I_B - I_C)) \\ \frac{d}{dt} I_C = \frac{d}{dt} I_A + \frac{1}{L_\phi + L_{\phi\phi}} (U_C - U_A - \psi_f Z_p \omega_R (E_{1C} - E_{1A}) - R_\phi (I_C - I_A)) \\ \frac{d}{dt} I_A + \frac{d}{dt} I_B + \frac{d}{dt} I_C = 0 \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Систему уравнений (2.6) можно привести в форму Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_A = \frac{1}{3(L_\phi + L_{\phi\phi})} (U_A - U_B + U_A - U_C + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1B} + E_{1C} - 2E_{1A}) - 3R_\phi I_A) \\ \frac{d}{dt} I_B = \frac{1}{3(L_\phi + L_{\phi\phi})} (-U_A + U_B + U_B - U_C + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1C} + E_{1A} - 2E_{1B}) - 3R_\phi I_B) \\ \frac{d}{dt} I_C = \frac{1}{3(L_\phi + L_{\phi\phi})} (-U_B + U_C + U_C - U_A + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1A} + E_{1B} - 2E_{1C}) - 3R_\phi I_C) \\ \frac{d}{dt} I_A + \frac{d}{dt} I_B + \frac{d}{dt} I_C = 0 \end{array} \right.$$

Уравнения равновесия статорной обмотки *BLDC* двигателя в неподвижных координатах *ABC* в операторном виде можно представить как систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_A = \frac{k}{Tp + 1} (2U_A - U_B - U_C + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1B} + E_{1C} - 2E_{1A})) \\ I_B = \frac{k}{Tp + 1} (-U_A + 2U_B - U_C + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1C} + E_{1A} - 2E_{1B})) \\ I_C = \frac{k}{Tp + 1} (-U_A - U_B + 2U_C + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1A} + E_{1B} - 2E_{1C})) \\ k = \frac{1}{3R_\phi} \\ T = \frac{L_\phi - L_{\phi\phi}}{R_\phi} \end{array} \right.$$

Учитывая, что  $L_\phi \gg L_{\phi\phi}$ , малой межфазной индуктивностью можно пренебречь и тогда  $T \approx L_\phi / R_\phi$ .

Тяговый момент двигателя создаётся суммарными усилиями его обмоток. Рассмотрим первое уравнение из системы (2.4):

$$U_A = L_\phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_C}{dt} + E_A + I_A R_\phi.$$

Для получения уравнения мгновенной электрической мощности обе части необходимо умножить на ток фазы  $A$ :

$$P_A = I_A \left( L_\phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_C}{dt} \right) + I_A^2 R_\phi + I_A E_A,$$

где  $I_A \left( L_\phi \frac{dI_A}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_B}{dt} + L_{\phi\phi} \frac{dI_C}{dt} \right)$  – реактивная мощность двигателя;  $I_A^2 R_\phi$  – активная мощность, рассеиваемая в виде тепла на обмотках;  $I_A E_A$  – мощность, создающая электромагнитный момент.

При допущении, что электрическая мощность преобразуется в механическую без потерь, справедливо выражение:

$$I_A E_A + I_B E_B + I_C E_C = M_{эм} \omega_R.$$

Откуда электромагнитный момент двигателя может быть найден как:

$$M_{эм} = \frac{I_A E_A + I_B E_B + I_C E_C}{\omega_R}.$$

Вычислить электромагнитный момент ротора можно по уравнению:

$$M_{эм} = \psi_f Z_p (I_A E_{1A} + I_B E_{1B} + I_C E_{1C}). \quad (2.7)$$

На основании приведенного выше математического описания может быть построена структурная схема *BLDC*-двигателя со скалярным управлением (рисунок 2.11).

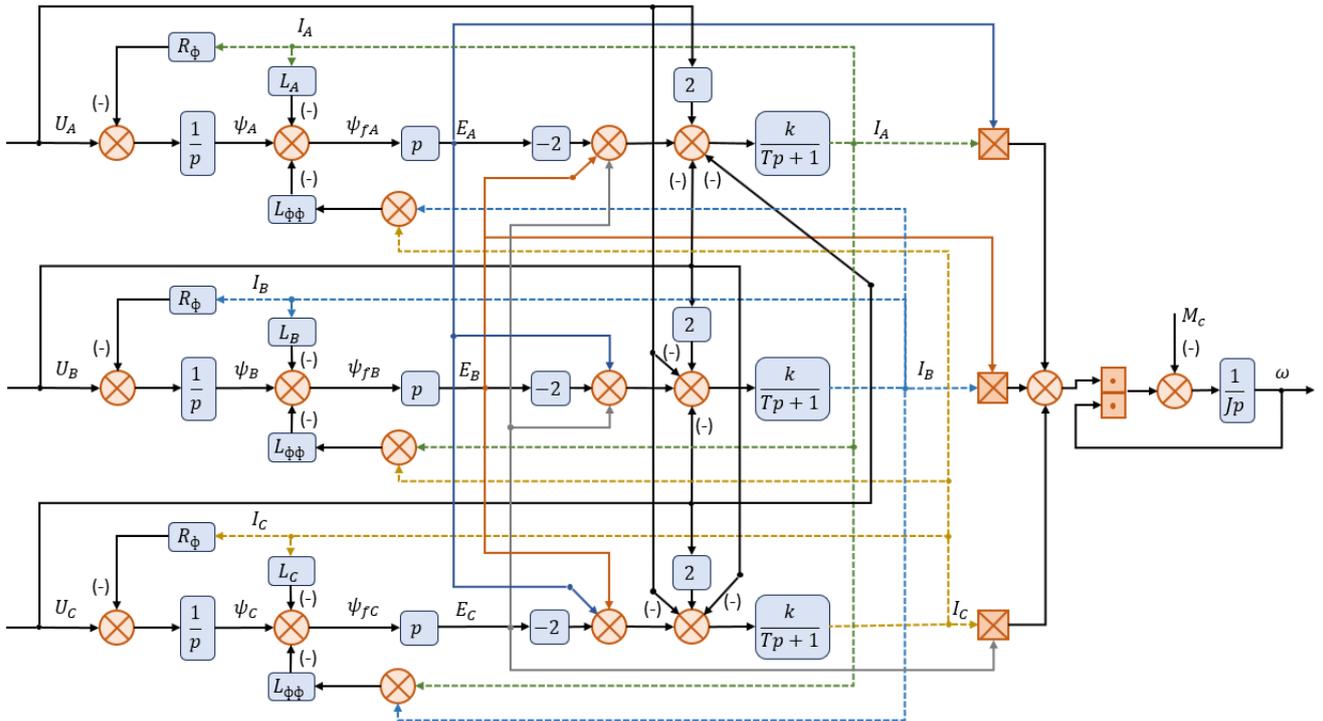


Рисунок 2.11 – Структурная схема *BLDC*-двигателя

### 2.2.4 Коммутация обмоток *BLDC* двигателя

Из уравнения (2.7) видна прямая пропорциональная зависимость между электромагнитным моментом ротора и суммой произведений токов фаз на соответствующие единичные функции формы ЭДС.

Максимальные значения ЭДС достигаются на меньших основаниях трапеции. Исходя из этого, можно предположить, что достижение максимального момента *BLDC* двигателя возможно при формировании на этих участках угловой траектории токов некоторой постоянной амплитуды, совпадающих по знаку с ЭДС.

Исходя из рисунка 2.10, при нулевом смещении фазы на участке траектории от  $\pi/6$  до  $\pi/2$  фаза *A* находится в максимальном по амплитуде отрицательном значении, а фаза *B* – в максимальном по амплитуде положительном значении. Таким образом, максимальное возможное значение момента на данном участке можно обеспечить, подавая на фазу *A* отрицательный ток, а на фазу *B* – положительный.

Для реализации описанного выше подключения необходимо к фазе *A* подключить отрицательный полюс источника постоянного напряжения  $U_{ЗПТ}$ , а к

фазе  $B$  – положительный. При этом обмотка фазы  $C$  отключена. Таким образом, величина напряжения формируется на основе значений прикладываемого напряжения, ЭДС и параметров обмоток.

Обеспечить такое переключение возможно при подключении  $BLDC$  двигателя к сети питания постоянного напряжения через трехфазный автономный инвертор.

Ключевую роль при формировании направления вращения  $BLDC$  двигателя играет последовательность переключения состояний инвертора.

Самым распространенным способом отследить текущее положение ротора двигателя для своевременной подачи управляющего импульса на инвертор является использование трёхканального датчика положения ротора на основе датчиков Холла, сдвинутых на 120 градусов относительно друг друга. На каждом из каналов формируется один управляющий импульс на один оборот двигателя, соответствующий половине периода вращения.

Логика коммутации обмоток  $BLDC$  двигателя для получения необходимого момента можно описать в виде таблицы 2.2:

Таблица 2.2 – Логика переключения обмоток  $BLDC$  двигателя

Подключение фаз		Положение ротора											
		...	30	...	90	...	150	...	210	...	270	...	330
<b>M&gt;0</b>	A	–	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–					
	B	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–			
	C		–	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–	
<b>M&lt;0</b>	A	–	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–					
	B	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–			
	C	$+U_{3ПТ}$	–	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–	$+U_{3ПТ}$	$+U_{3ПТ}$	–	$-U_{3ПТ}$	$-U_{3ПТ}$	–	

Такой алгоритм логической обработки сигналов с датчика положения ротора позволяет определить, в каком из шести выделенных секторов находится ротор (таблица 2.3). В каждый момент времени две фазы  $BLDC$ -двигателя подключены с полярностью одного знака и одна фаза – с полярностью противоположного знака.

Таблица 2.3. – Таблица соответствия сигналов датчика ротора положению ротора в одной из секций.

	... 30	... 90	... 150	... 210	... 270	... 330
<b>А</b>	1	1	0	0	0	1
<b>В</b>	0	1	1	1	0	0
<b>С</b>	0	0	0	1	1	0
<b>Сектор</b>	1	2	3	4	5	6

### 2.3 Буферный накопитель энергии

Во время эксплуатации транспортного средства с индукционным источником питания расстояние между источником напряжения и приёмником может измениться (особенности рельефа, объезд препятствий). Это приведет к изменению питающего напряжения и снижению качества управления транспортным средством.

Для предотвращения таких ситуаций предлагается использовать в системе буферный накопитель энергии (БНЭ), который будет заряжаться во время движения ТС над силовой линией и обеспечивать питание системы тягового электропривода в случае съезда с неё. Технический уровень накопителей энергии, в качестве которых чаще всего применяются аккумуляторные батареи, на сегодняшний день достаточно высок, чтобы обеспечить решение задачи в массовом масштабе и значительно улучшить характеристики транспортной энергетики [164, 165].

Оценка работоспособности аккумуляторной батареи производится на основе значения ее емкости, измеренной при разряде батареи в номинальном режиме работы. Таким образом, деградация батареи выражается в снижении ее энергоемкости, выражаемой в ампер-часах.

При увеличении тока разряда в большинстве случаев ёмкость аккумуляторной батареи снижается. Исследованиями было установлено [166], что режим разряда АБ постоянным током обеспечивает минимальный расход ее емкости при условии потребления тяговым приводом достаточной для движения ТС энергии. Структурная схема БНЭ с учетом разрядной характеристики была

разработана в [48].

С целью выбора буферного накопителя энергии на основании статистики, для каждого участка цикла было рассчитано значение необходимой энергоёмкости БНЭ в соответствии с уравнением:

$$A_{\text{БНЭ}_i} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (P_m - P_{\text{дв.ном}}) dt,$$

где  $t_i, t_{i+1}$  – время начала и конца участка цикла.

Затем была построена функция распределения значений необходимой энергоёмкости БНЭ при движении по заданному циклу *WLTP Class 1* (рисунок 2.12).

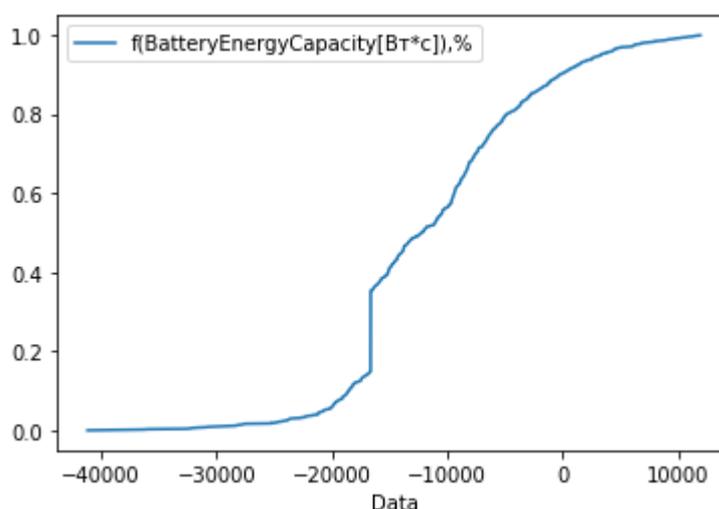


Рисунок 2.12 – Функция распределения изменения необходимой энергоёмкости БНЭ

Учитывая необходимость поддержания уровня энергии в БНЭ в любой момент времени в интервале  $[A_{\text{БНЭ.min}}, A_{\text{БНЭ.max}}]$ , требуемая энергоёмкость батареи  $A_{\text{БНЭ.треб}}$  для прохождения исследуемого цикла может быть определена исходя из доверительного уровня статистической значимости:

$$A_{\text{БНЭ.треб}} = A_{\text{БНЭ}}[f(0,95)] - A_{\text{БНЭ}}[f(0,05)].$$

Представленный выше алгоритм расчёта необходимых технических характеристик двигателей и БНЭ был описан в виде программного кода на языке программирования *Python* [167] и зарегистрирован в качестве объекта интеллектуальной собственности (приложение В).

В качестве БНЭ могут быть использованы как различные типы аккумуляторов [50], так и суперконденсаторы [168]. На основании сравнительного анализа различных типов накопителей энергии (таблица 2.4) в силу более высоких значений удельных характеристик, зарядного/разрядного тока, числа циклов заряда/разряда, низкой скорости саморазряда и отсутствия эффекта памяти, а также более доступной стоимости по сравнению с суперконденсаторами для использования в качестве БНЭ была выбрана литий-ионная батарея.

Таблица 2.4 – Сравнительный анализ типов накопителей энергии [50]

<b>Хар-ка</b>	<b>Свинцово-кислотные АКБ</b>	<b>Никель-кадмиевые АКБ</b>	<b>Никель-металл-гибридные АКБ</b>	<b>Литий-ионные АКБ</b>	<b>Суперконденсаторы</b>
<b>Номинальное напряжение, В</b>	2	1.2	1.2	3.7	2.7
<b>Удельная энергоёмкость, Вт*ч/кг</b>	30-40	40-60	30-80	90-140	5
<b>Удельная мощность, Вт/кг</b>	180	150	250-1000	1800	10000
<b>Среднее время заряда, ч</b>	>10	8	6	2	0.006
<b>Количество циклов заряда-разряда, шт.</b>	500-800	2000	800	20000	1000000
<b>Уровень саморазряда за месяц, %</b>	4	20	30	7	15
<b>Компактность</b>	-	+	+	+	-
<b>Быстрая зарядка</b>	-	+	+	+	+

Продолжение таблицы 2.4

Допустимый перезаряд	Высокий	Средний	Низкий	Очень низкий	Недопустим
Глубина разряда, %	50	50-80	50-85	80	100
Эффект памяти	-	+	+	-	-
Стоимость	Низкая	Низкая	Низкая	Средняя	Высокая

### Выводы по главе 2

1. Установлено, что для движения в городской черте и на территории предприятий наиболее приемлемым является цикл *WLTP Class 1*, описывающий динамичную езду и предусматривающий разгон до относительно невысокой максимальной скорости.

2. Доказана стационарность случайного процесса изменения мощности тягового электропривода и установлен закон распределения.

3. Составлен алгоритм и зарегистрирована соответствующая программа для расчета мощности тягового электродвигателя и энергоемкости БНЭ автономного ТС статистическими методами.

## ГЛАВА 3 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 3.1 Источник бесконтактного подвода энергии

Одно из перспективных решений в области энергоэффективных технологий для электрических ТС – это использование систем бесконтактного подвода энергии от провода, заложенного в дорожное полотно [169-171]. Источник питания таких транспортных средств расположен под дорогой, а приемник – на транспортном средстве с электрическим приводом (рисунок 3.1).

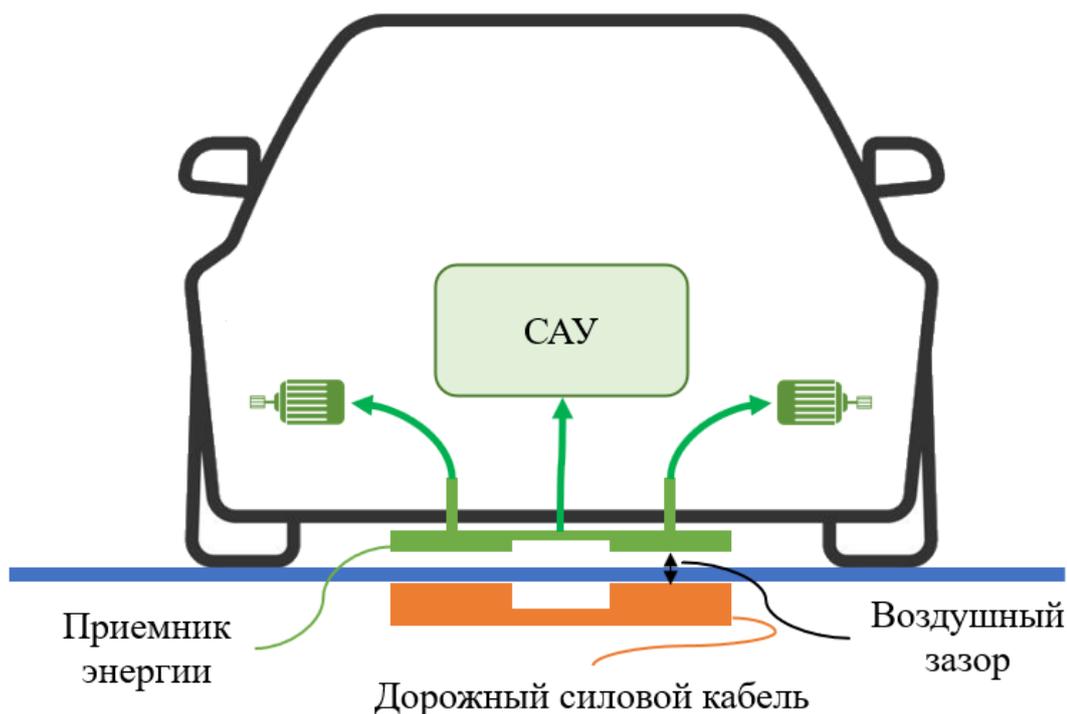


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение системы индукционного подвода энергии из дорожного полотна.

Устройство бесконтактного подвода энергии описывается в виде однофазного двухобмоточного трансформатора с воздушным зазором (рисунок 3.2). Величина воздушного зазора является основным фактором, определяющим магнитное поле. Магнитное сопротивление зазора значительно выше, чем у сердечника [172, 173]. Силовой кабель в дорожном полотне играет роль первичной обмотки трансформатора, а энергоприёмник на автомобиле – вторичной [174].

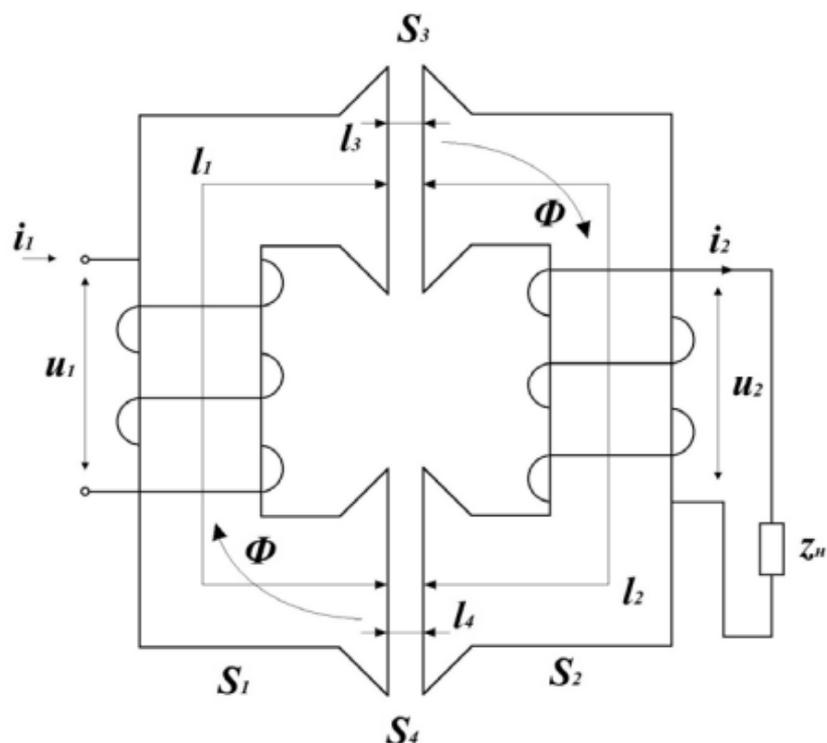


Рисунок 3.2 – Трансформатор с воздушным зазором

При изучении динамических характеристик системы необходимо создать математическую модель ее элементов, соответствующую общим целям исследования, и выбрать форму математического описания, которая позволит применять известные методы ТАУ.

Также наличие точной математической модели позволяет производить оценку динамических характеристик системы. Однако, при описании физических процессов важно избегать излишнего усложнения математических моделей, сохраняя при этом описание важных свойств и особенностей интересующего объекта исследования.

Математическое описание трансформаторов является объектом многих научных работ. В частности, авторы [175] исследуют вопросы построения схемы замещения однофазных и многофазных трансформаторов, в труде [176] представлена методика расчёта МДС для неразветвленных магнитопроводов с учетом воздушных зазоров, в публикации [177] представлены результаты имитационного компьютерного моделирования электропривода подводного беспилотного аппарата с индукционным подводом энергии.

Однако, в научной литературе недостаточно исследований, посвященных математическому описанию трансформатора с воздушным зазором как элемента автоматической системы управления.

Для описания классического однофазного двухобмоточного трансформатора можно воспользоваться следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + i_1 r_1 \\ U_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + i_2 r_2 \\ \sum_{i=1}^4 H_i l_i = i_1 w_1 + i_2 w_2 \end{cases}, \quad (3.1)$$

где  $\Psi_1, \Psi_2, i_1, i_2, r_1, r_2, w_1, w_2$  – потокосцепления, токи, активные сопротивления и числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;  $H_i$  – напряженности магнитного поля;  $l_i$  – длины средних линий магнитопровода.

Потокосцепление обмоток представлено двумя основными компонентами: основной магнитный поток  $\psi_\mu$  и поток рассеяния  $\psi_P$ :

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_{1\mu} + \psi_{1P} \\ \psi_2 = \psi_{2\mu} + \psi_{2P} \end{cases}$$

При этом основной магнитный поток определяется произведением количества витков обмотки  $w$  на протекающий через сердечник магнитный поток  $\Phi$ :

$$\begin{cases} \psi_{1\mu} = w_1 \Phi \\ \psi_{2\mu} = w_2 \Phi \end{cases},$$

а поток рассеяния определяется как произведение соответствующих индуктивностей рассеяния обмотки  $L_p$  на протекающий по ним ток  $i$ :

$$\begin{cases} \psi_{1P} = L_{1p} i_1 \\ \psi_{2P} = L_{2p} i_2 \end{cases}$$

Третье уравнение системы (3.1) можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^4 H_i l_i = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3(\xi) + H_4 l_4(\xi), \quad (3.2)$$

где  $H_1$  – напряженность магнитного поля на первом участке магнитопровода,  $H_2$  – напряженность магнитного поля на втором участке магнитопровода;  $H_3, H_4$  – напряженности магнитных полей в воздушных зазорах;  $\xi$  – случайный фактор, который зависит от положения ТС в пространстве и, соответственно, влияет на величину воздушного зазора.

Принимая во внимание неизменность напряженности магнитного поля в воздушных зазорах:

$$H_{34} = H_3 = H_4,$$

и суммируя величины всех воздушных зазоров с учетом допущения об одинаковости магнитных свойств в обоих зазорах [169], получим:

$$l_{34}(\xi) = l_3(\xi) + l_4(\xi),$$

Уравнение (3.2) может быть представлено как:

$$\sum_{i=1}^4 H_i l_i = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{34} l_{34}(\xi).$$

Важно учесть, что магнитный поток в неразветвленной магнитной цепи одинаков при любых сечениях и материалах магнитопровода:

$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_3 S_3 = B_4 S_4,$$

где  $B$  – это величины магнитной индукции, а  $S$  – площади поперечного сечения магнитопроводов и воздушных зазоров.

Для двух участков магнитной цепи, сделанных из ферромагнетика (рисунок 3.2), соотношения между значениями магнитной индукции и напряженности магнитного поля описываются в виде:

$$\begin{cases} B_1 = H_1 \mu_{01}(H) \\ B_2 = H_2 \mu_{02}(H) \end{cases}$$

Ферромагнитный сердечник имеет определенные магнитные свойства, которые могут быть выражены через кривую намагничивания  $B(H)$  и зависимость  $\mu_0(H)$ . Качественная картина этих свойств показана на рисунке 3.3.

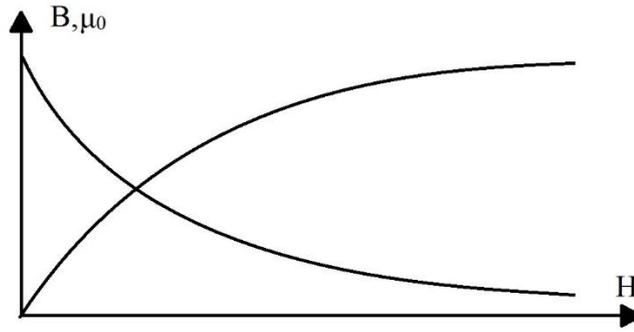


Рисунок 3.3 –Зависимость магнитных свойств ферромагнитных материалов

Магнитные свойства зазора в магнитопроводе при условии, что ферромагнетики разделены воздухом, могут быть описаны уравнением:

$$B_{34} = H_{34}\mu_0,$$

где  $\mu_0$  – значение магнитной проницаемости воздуха.

Таким образом, однофазный трансформатор с воздушным зазором может быть описан следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = w_1 S_1 \frac{db_1}{dt} + L_{p1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1 \\ u_2 = w_2 S_2 \frac{db_2}{dt} + L_{p2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 \\ F = \frac{l_{34}(\xi)}{S_{34}\mu_0} b_{34} + \sum_{i=1}^2 \frac{l_i}{S_i \mu_{0i}} b_i = i_1 w_1 + i_2 w_2 \\ \Phi = bS \\ h = \frac{b}{\mu_0} \end{array} \right. ,$$

где  $w_1, w_2$  – количество витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора,  $i_1, i_2$  – величины токов, протекающих через первичную и вторичную обмотки,  $r_1, r_2$  – активные сопротивления обмоток трансформатора,  $L_{p1}, L_{p2}$  – индуктивные сопротивления обмоток трансформатора,  $F$  – магнитодвижущая сила,  $h$  – напряженность магнитного поля в магнитопроводе или воздушном зазоре магнитной цепи,  $b$  – значения магнитной индукции в сердечнике и в зазоре.

Отличием от классической системы математических уравнений является учёт воздушного зазора, длина которого может изменяться при смещении ТС как по горизонтали, так и по вертикали.

Таким образом, исследуемый источник бесконтактной передачи энергии может быть представлен в виде структурной схемы и впоследствии использован для исследований в качестве элемента системы управления (рисунок 3.4). Такой способ отображения наглядно показывает состав элементов системы, их взаимодействие, а также облегчают анализ и синтез систем автоматического управления.

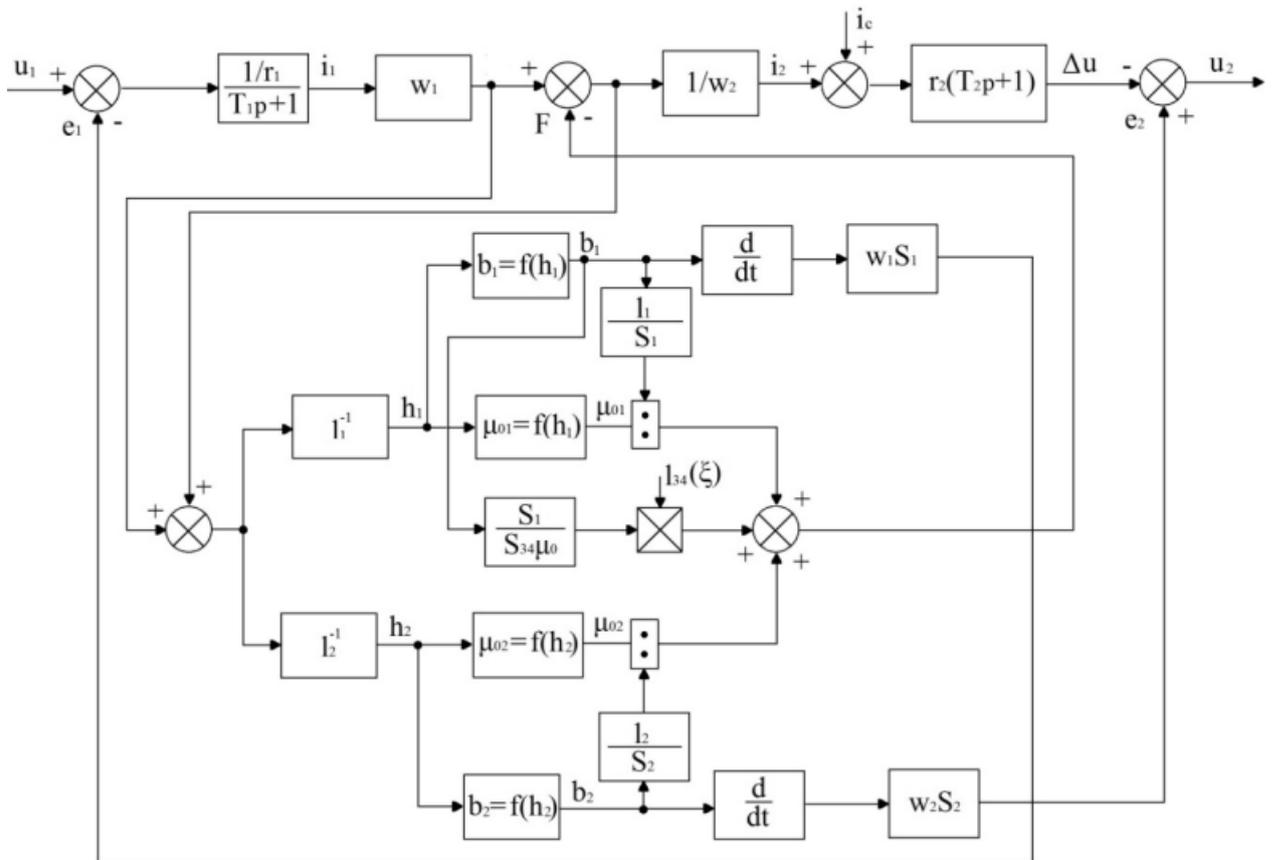


Рисунок 3.4 – Структурная схема трансформатора с воздушным зазором

Верификация математического описания была проведена путём исследования броска тока намагничивания при включении трансформатора в сеть в режиме холостого хода. Для этого сравнивались переходные процессы, полученные при экспериментальных исследованиях реального трансформатора [178-180] и при структурном и имитационном моделировании в среде *MATLAB Simulink*.

В режиме холостого хода вторичная обмотка трансформатора размыкается. Это приводит к изменению математического описания электромагнитных процессов:

$$\begin{cases} u_1 = w_1 \Phi p + i_0 r_1 (T_1 p + 1) \\ F = h_1 (l_1 + l_2) \\ F = i_0 w_1 \\ \Phi = b_1 S_1 \end{cases},$$

где  $u_1$  – напряжение питания на первичной обмотке трансформатора,  $i_0$  – ток холостого хода трансформатора,  $r_1$  – сопротивление первичной обмотки трансформатора;  $T_1 = L_1/r_1$  – постоянная времени первичной обмотки;  $L_1$  – индуктивное сопротивление первичной обмотки;  $F$  – МДС трансформатора.

Таким образом, структурная схема трансформатора в режиме холостого хода примет вид (рисунок 3.5):

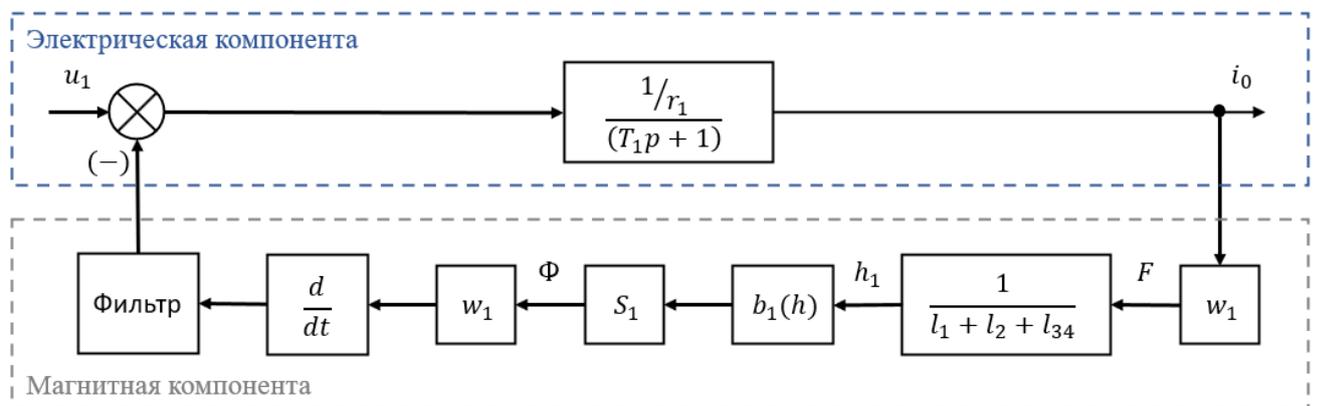


Рисунок 3.5 – Структурная схема модели трансформатора с воздушным зазором в режиме холостого хода

В представленной структурной модели зазор не учитывается, так как экспериментальные исследования проводились с трансформатором без воздушного зазора.

Полученная схема является нелинейной системой, которая позволяет изучать переходные режимы при включении трансформатора на холостом ходу. Электрическая компонента может быть описана апериодическим звеном первого порядка. Магнитная компонента включает нелинейность  $b_1(h)$ , обозначающую кривую намагничивания ферромагнитного материала сердечника на стороне первичной обмотки. Параметры звеньев структурной модели можно найти в справочных данных выбранного однофазного трансформатора.

Для моделирования используется решатель *Dormand-Prince (ode45)*, шаг

решателя – переменный [181].

Программный пакет *MATLAB* позволяет создавать математические модели различных систем, используя язык программирования *MATLAB*. *Simulink* является графическим интерфейсом, содержащим библиотеки для создания таких моделей, в том числе, и библиотеку *Simscape*, предназначенную для моделирования электрических и механических систем [182]. Элементы указанной библиотеки являются математическими моделями реальных устройств и компонентов, которые обеспечивают высокую точность моделирования процессов.

Для изучения переходных режимов при включении трансформатора в ненагруженном состоянии был использован блок нелинейного трансформатора из библиотеки *Simscape* [183].

Этот блок предоставляет различные возможности для моделирования магнитных компонентов трансформатора: линейная  $BH$ -характеристика, линеаризованная  $BH$ -характеристика с точкой насыщения, кривая  $\Phi(I)$ , нелинейная  $BH$ -характеристика, нелинейная  $BH$ -характеристика с учётом гистерезиса.

Имитационная модель однофазного трансформатора с нелинейной магнитной характеристикой ферромагнетика представлена на рисунке 3.6. Первичная обмотка подключена к источнику переменного напряжения, а вторичная – разорвана.

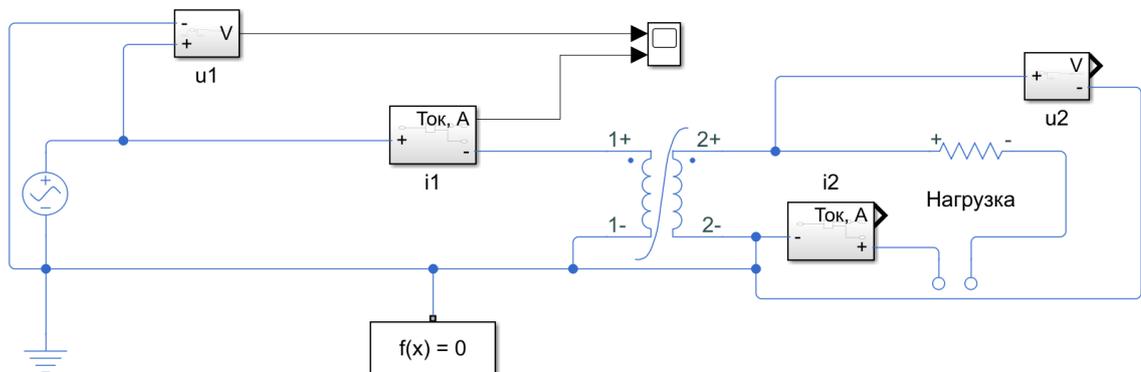


Рисунок 3.6 – Имитационная модель со стандартным блоком трансформатора с нелинейной магнитной характеристикой

Для измерения напряжения и тока в среде *Simscape* были созданы

подсистемы с необходимыми моделями датчиков и элементами согласования сигналов. В данном эксперименте интерес представляет только первичная обмотка, поскольку ток во вторичной обмотке равен нулю. Для моделирования использовался решатель *DAE* для *Simscape* [184].

При проверке адекватности результатов был использован однофазный трансформатор ТОСМ 1.5 кВА (рисунок 3.7), параметры которого представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные параметры трансформатора ТОСМ 1.5 кВА

Параметр	Обозначение	Значение
Мощность, ВА	$S_{nom}$	1500
Длина стержня, мм	$L_l$	160
Длина ярма, мм	$L_y$	80
Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	$S_l = S_y = S_1 = S_2$	2714
Длина обмотки, мм	$L_w$	89
Ширина обмотки, мм	$W_w$	59
Высота обмотки, мм	$h_w$	114
Толщина обмотки, мм	$T_w$	15
Номинальные напряжения, В	$U_1/U_2$	220/110
Число витков обмоток	$w_1/w_2$	290/154
Сопротивления обмоток, Ом	$r_1/r_2$	0.484/0.133
Сталь магнитопровода	Марка	2212 (M530-50A)
Магнитная проницаемость магнитопровода, Гн/м	$\mu$	$1.26 * 10^{-4}$
Магнитная постоянная, Гн/м	$\mu_0$	$4\pi * 10^{-7}$
Индукция в точке насыщения <i>ВН</i> -характеристики магнитопровода, Т	$b_{нас}$	0.7
Напряженность магнитного поля в точке насыщения <i>ВН</i> -характеристики магнитопровода, А/м	$h_{нас}$	96

Коэффициент обратной намагниченности стали	$c$	<b>0.7</b>
Коэффициент объемной связи, А/м	$k$	270
Коэффициент междоменной связи	$\alpha$	$1 \cdot 10^{-4}$
Безгистерезисный градиент $BH$ , когда $H$ равен нулю, м*Т/А	$\nabla b(0)$	$8.8 \cdot 10^{-3}$

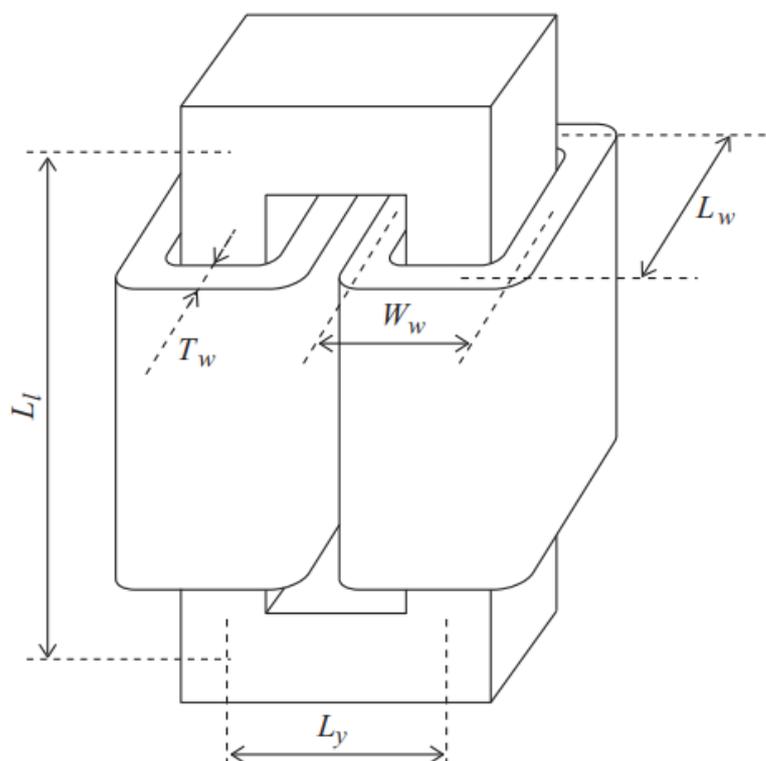


Рисунок 3.7 – Трансформатор ТОСМ 1.5 кВА [178]

Для проведения данного исследования принято допущение об эквивалентности длин магнитопроводов на сторонах первичной и вторичной обмоток:

$$l_1 = l_2 = L_l + L_y = 240 \text{ мм.}$$

Для получения корректных численных значений индуктивностей была использована система уравнений [185]:

$$d = \sqrt{L_w^2 + W_w^2}$$

$$L_1 = \frac{\mu_0 \omega^2 (L_w + W_w)}{\pi} \left( \ln \left( \frac{2L_w W_w}{h_w + T_w} \right) - \frac{1}{2} \right) * \frac{0.447(h_w + T_w) + 2d - W_w \ln(W_w + d) - L_w \ln(L_w + d)}{L_w + W_w}$$

Имитационная модель настраивалась на исследование переходных процессов с учетом гистерезиса в магнитной компоненте (рисунок 3.8).

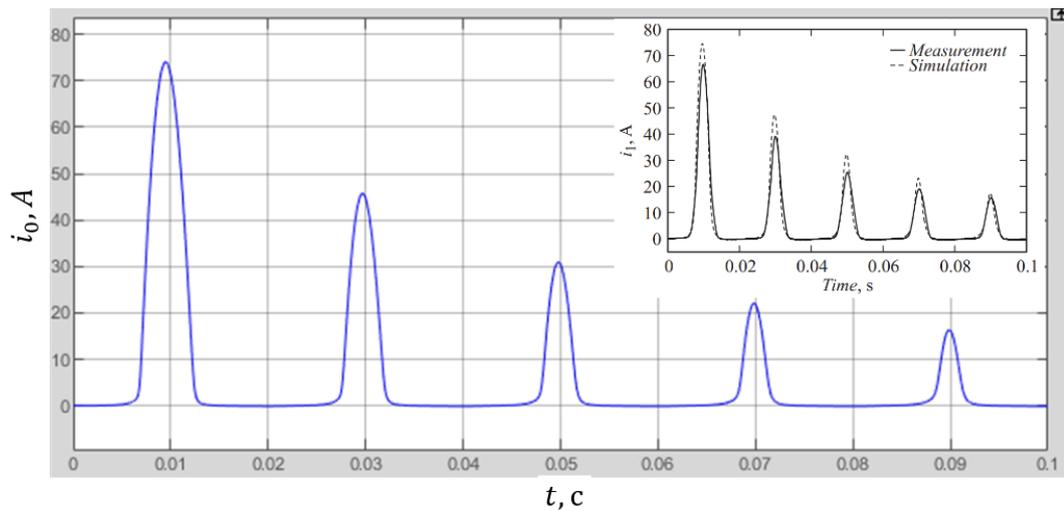


Рисунок 3.8 – Ток первичной обмотки трансформатора в режиме пуска на холостом ходу

Полученный в результате проведения имитационного моделирования переходный процесс качественно и количественно совпадает с результатами проведенного натурального эксперимента с указанным трансформатором (правый верхний угол рисунка). Таким образом, была доказана возможность использования созданной имитационной модели в качестве эталонного образца для дальнейших исследований.

В задаче автоматического управления транспортным средством гистерезис имеет незначительное влияние, так как система функционирует в течение длительного времени и сердечник успевает полностью намагнититься. Поэтому магнитная составляющая в качестве допущения может быть описана в виде кривой намагничивания. Данные о кривой намагничивания ферромагнитной стали марки 2212 были взяты из справочника [186].

На рисунке 3.9 приведена схема разработанной автором имитационной модели трансформатора с воздушным зазором. В результате испытаний показатели данной модели абсолютно совпали с результатами стандартной модели нелинейного трансформатора из *Simscape* с нелинейной *BH*-характеристикой без учета гистерезиса [187].

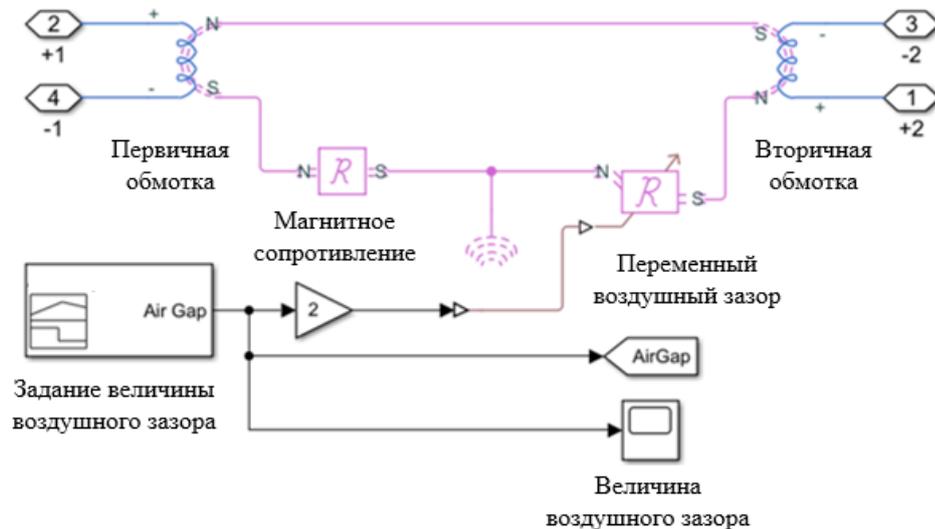


Рисунок 3.9 – Имитационная модель трансформатора с нелинейным сердечником для исследования в режиме холостого хода

Далее было проведено сравнение результатов моделирования в режиме пуска на холостом ходу однофазного трансформатора на имитационной и структурной моделях (рисунок 3.10).

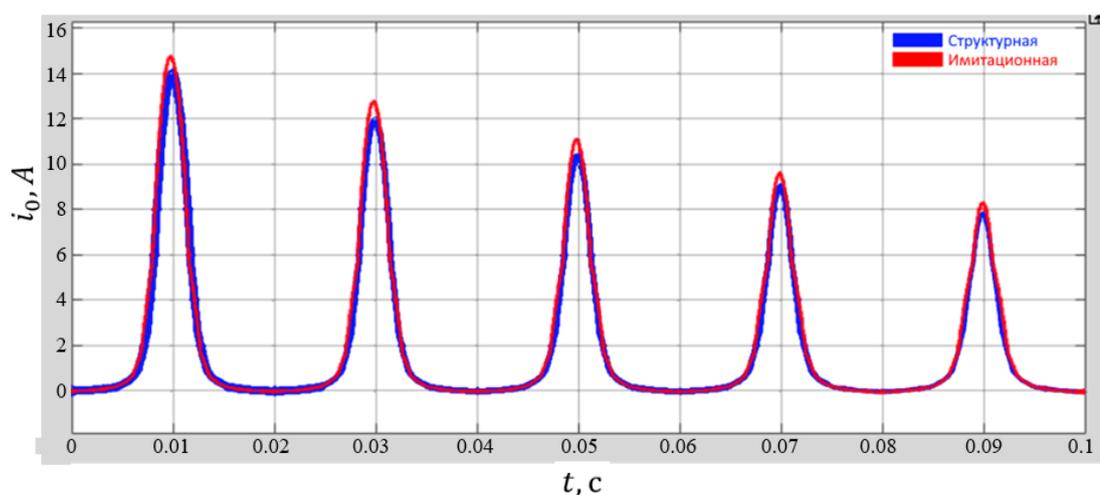


Рисунок 3.10 – Токи первичной обмотки трансформатора в режиме пуска на холостом ходу для структурной и имитационных моделей с магнитной компонентой без учёта гистерезиса

Полученные кривые переходных процессов оказались качественно и количественно идентичны для структурной и имитационной моделей.

Таким образом, можно сделать вывод о правильности созданных моделях однофазного трансформатора с воздушным зазором.

На разработанной имитационной модели проведено исследование изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора от величины воздушного зазора (рисунок 3.11). За основу был взят трансформатор мощностью 15 кВт с частотой питающего напряжения 60 кГц, геометрия сердечника которого рассчитана на основе габаритных показателей экспериментальной установки университета Беркли, США.

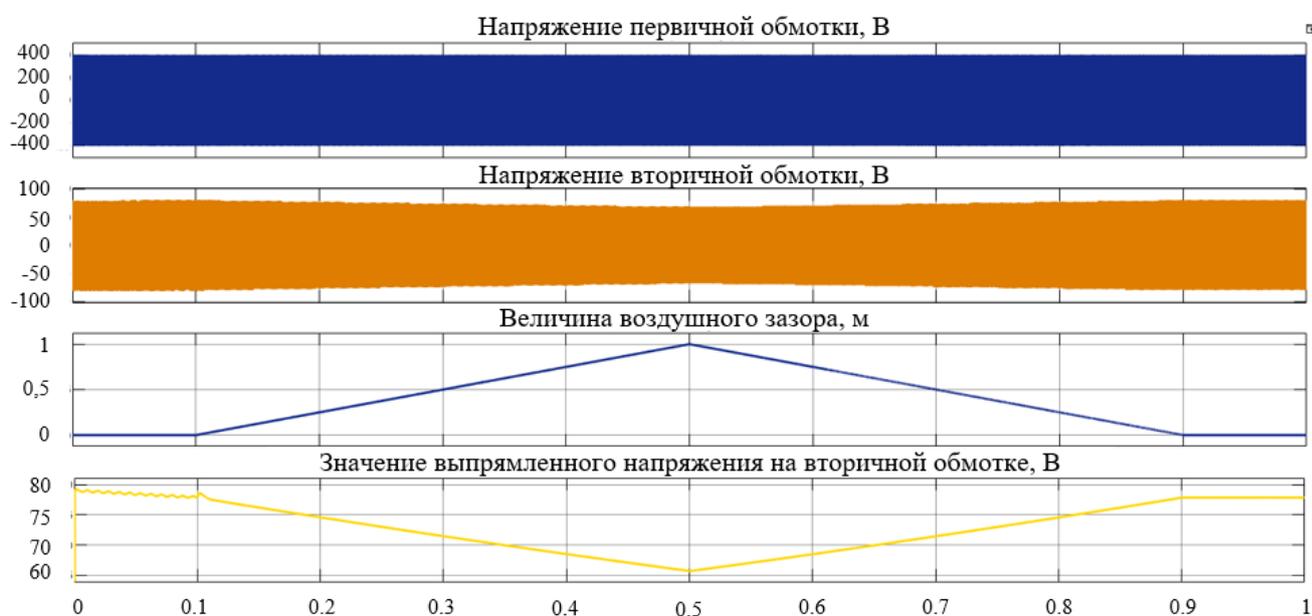


Рисунок 3.11 – Результаты исследования влияния величины воздушного зазора на величину напряжения на вторичной обмотке трансформатора

Результаты моделирования показали, что зависимость напряжения от длины воздушного зазора линейна и в данной конфигурации при изменении величины зазора от 0 до 1 метра темп падения напряжения составляет 12 В/м.

Полученные результаты подтверждаются техническими спецификациями производителей систем бесконтактной передачи энергии [173]. Следовательно, разработанная модель может быть использована в дальнейшем для анализа и синтеза систем тягового ЭП с индукционным подводом энергии.

### 3.2 Синтез системы автоматического управления тяговым электроприводом

В основе управления тяговым электроприводом лежит синтезированная САУ, позволяющая осуществлять оптимальное энергоэффективное управление в условиях неточности априорной информации о значениях переменных состояния объекта управления, а также возмущающих воздействиях.

Наибольшую эффективность управления нестационарными объектами обеспечивают системы с глубокими обратными связями. Они позволяют изменять не только статическую точность, но и показатели качества переходных процессов САУ.

Для данного объекта управления была использована трехконтурная САУ (рисунок 3.12). Математическое описание отдельных элементов рассмотрено в главе 2.

Регуляторы напряжения, момента и скорости были синтезированы методом СПР и настроены на модульный оптимум. Параметры этих регуляторов уточнялись при имитационном моделировании методом Циглера-Николса.

Функционально использование регулятора скорости необходимо в случае создания беспилотного автономного ТС; при наличии в кабине управления пилота, который управляет ТС, контур регулирования скорости теряет смысл и может быть отключен, при этом управляющее воздействие от пилота будет напрямую поступать на регулятор момента.

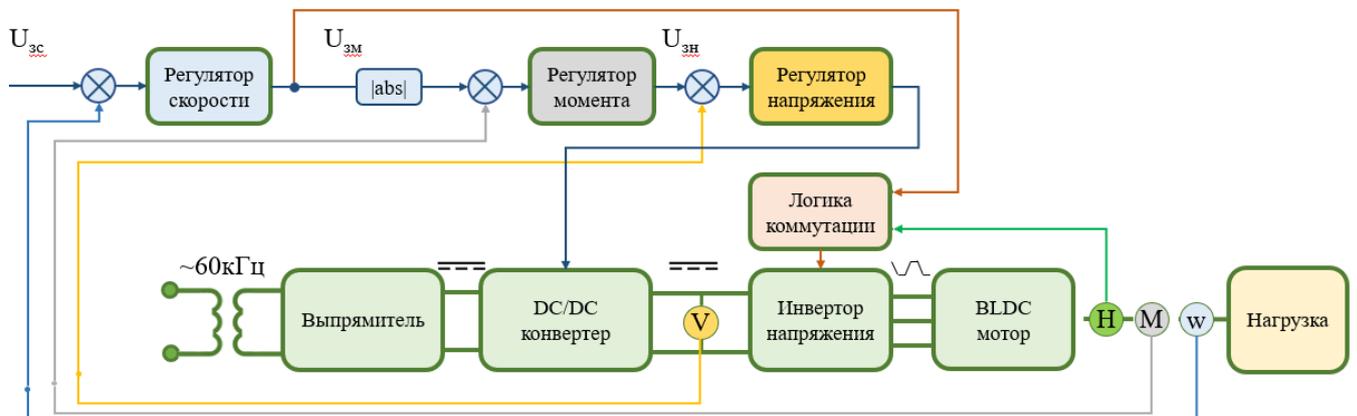


Рисунок 3.12 – Структурная схема САУ исследуемого объекта управления

Для обеспечения функционирования *BLDC*-двигателя при питании от рассчитанного источника бесконтактного подвода энергии в системе должны быть использованы еще несколько устройств, которые могут быть представлены в виде безынерционных звеньев:

1. Выпрямитель – для преобразования переданного от кабеля в дорожном полотне высокочастотного напряжения в постоянное.
2. *DC/DC* конвертер – для управления величиной напряжения, подаваемого на инвертор. Изменение длительности управляющего импульса на ключах *DC/DC*-преобразователя позволяет управлять выходным напряжением в абсолютном диапазоне от минимального значения выходного напряжения до питающего напряжения, подаваемого с выпрямителя.
3. Инвертор напряжения – для преобразования однофазного постоянного напряжения в трёхфазное напряжение трапецеидальной формы на основе подаваемых сигналов коммутации.

Внешний вид схемы имитационного моделирования в среде *MATLAB Simulink* показан на рисунке 3.13.

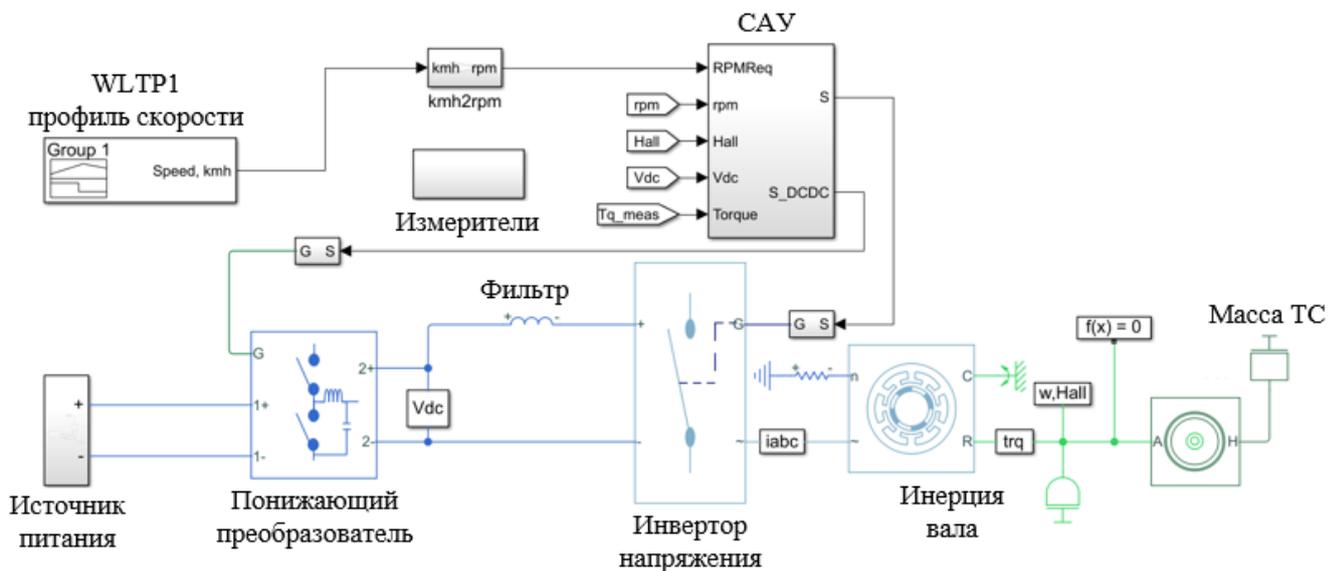


Рисунок 3.13 – Имитационная модель исследуемого объекта управления

### 3.3 Нейросетевой наблюдатель тягового момента двигателя

САУ с глубокими обратными связями требует наличия измерений текущих значений переменных состояния тягового ЭП. В частности, регулятор момента

требует измерения крутящего момента на валу.

Стоимость датчиков момента достигает нескольких сотен рублей, поэтому целесообразно рассмотреть возможность бездатчикового управления с косвенной оценкой на основании более легко и дешево измеряемых величин.

В качестве инструмента для оценки текущего значения момента предложено использование рекуррентной нейронной сети [188].

Обучение однослойной нейросети с 64 нейронами и 7 задержками было произведено по методике «с учителем», т. е. с наличием тренировочного размеченного датасета с прямым соответствием набора косвенных величин и целевых показателей (рисунок 3.14).

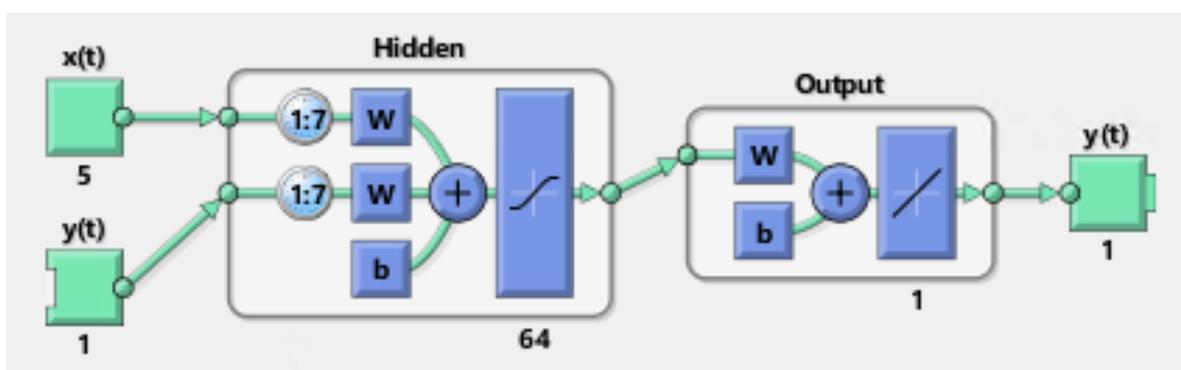


Рисунок 3.14 – Маска натренированной нейронной сети в интерфейсе *MATLAB Neural Networks*

Для доказательства работоспособности такой схемы был использован пакет *MATLAB Neural Networks*. Были получены характеристики тока, напряжения и частоты вращения колеса во время запуска созданной имитационной модели в соответствии с сигналами задания линейной скорости по участку цикла *WLTP Class 1*. В качестве целевых значений были использованы соответствующие измерения, полученные с датчика момента.

Результаты тренировки показаны на рисунках 3.15 и 3.16. Среднеквадратичная ошибка на тестовом датасете составила  $0.99 \text{ Н*м}$ , что составляет 2% от номинального момента двигателя.

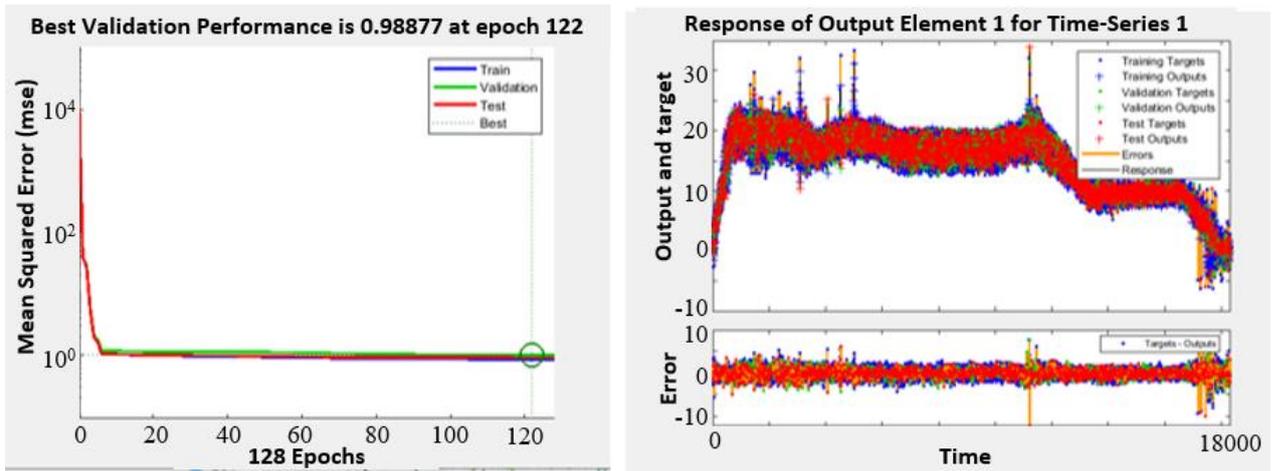


Рисунок 3.15 – Результаты процесса тренировки нейронной сети для оценки текущих значений момента двигателя. Скриншот из интерфейса *MATLAB Neural Networks*

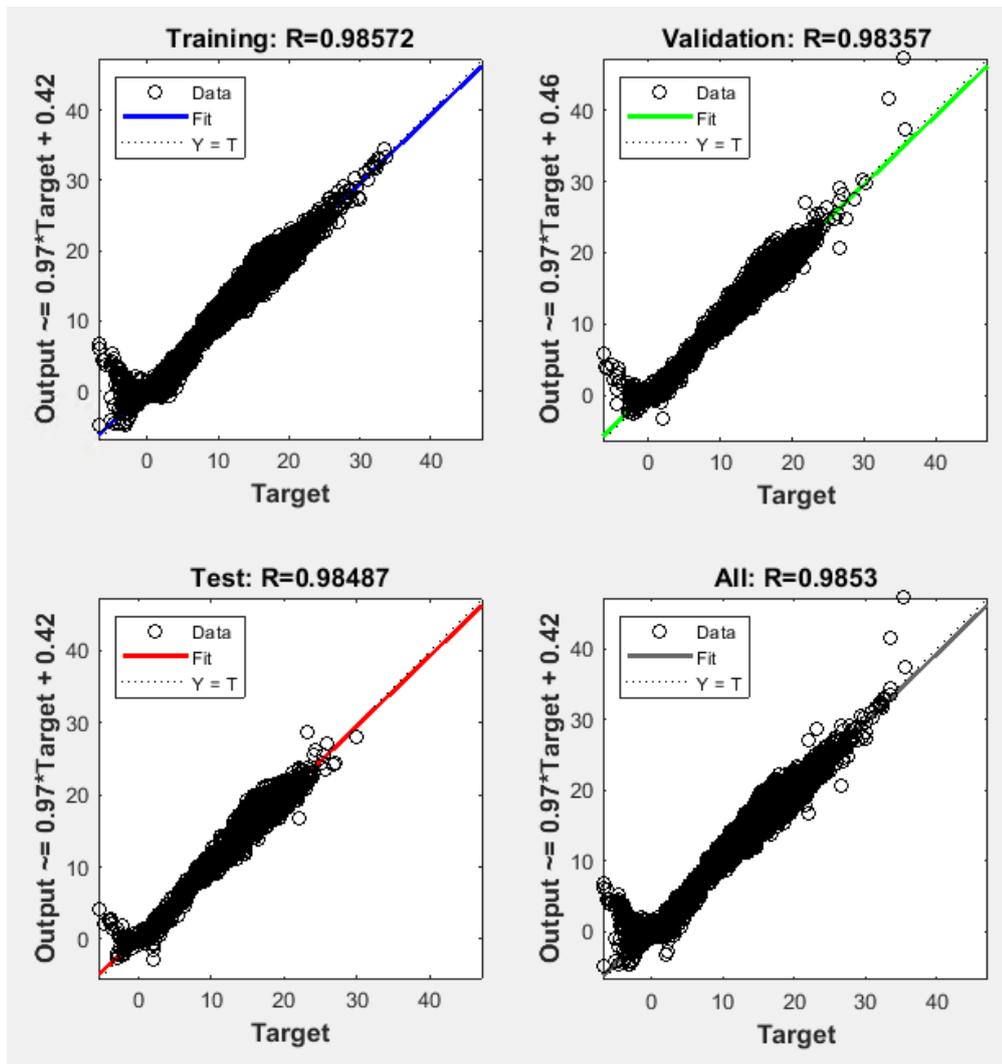


Рисунок 3.16 – Корреляция выходных данных натренированной ИНС и данных, используемых для тренировки и валидации

Таким образом, может быть сделан вывод о том, что данный метод позволяет производить оценку момента по косвенно измеренным характеристикам с достаточной точностью без вреда процессу регулирования.

### 3.4 Нейрорегулятор момента тягового двигателя

В рамках поиска энергоэффективных методов регулирования в системах тягового электропривода был разработан нейрорегулятор момента с применением технологии глубокого обучения нейронных сетей с подкреплением (рисунок 3.17).

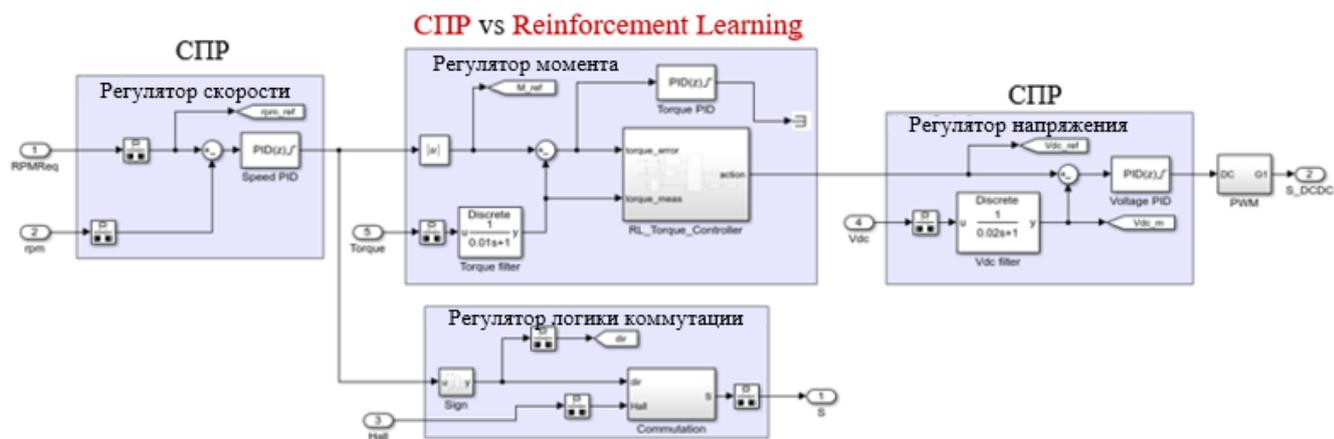


Рисунок 3.17 – Содержимое подсистемы *Control* имитационной модели

Преимуществами нейрорегуляторов по отношению к классическим являются:

1. Тренировка происходит на реальных измеренных данных модели и приводит к более точному управлению каждого конкретного объекта управления.
2. Требуется внимание только на этапах запуска тренировки и контроля результатов.
3. Может быть применена специалистами без знания ТАУ.

Соответствующие недостатки:

1. Требуется больших вычислительных мощностей.
2. Требуется тщательно проработанной модели объекта управления.
3. Невозможна донастройка в ручном режиме. Однако, возможен запуск дотренировки.

Суть методов обучения нейронных сетей с подкреплением, как указывалось ранее, состоит в том, что нейросетевой агент методом проб и ошибок оказывает

влияние (*action*) на рабочую среду, пытаясь максимизировать значение целевой функции (*reward*) с каждой итерацией [189].

Существует несколько типов нейросетевых агентов:

1. *Value-based* – используют только критика для выбора действий, т.е. полагаются на не прямое определение политики действий. Работают хорошо для дискретных сред.

2. *Policy-based* – используют только акторов для выбора действий, т.е. полагаются на прямое определение политики действий. Вычислительная сложность ниже, может применяться для непрерывных сред. Высокая чувствительность к помехам и вероятность схождения функции к локальному минимуму.

3. *Actor-Critic* – актор ведет поиск наилучших действий с обратной связью от критика, который корректирует действия актора (рисунок 3.18). Именно этот метод был применён в ходе проведенного исследования.

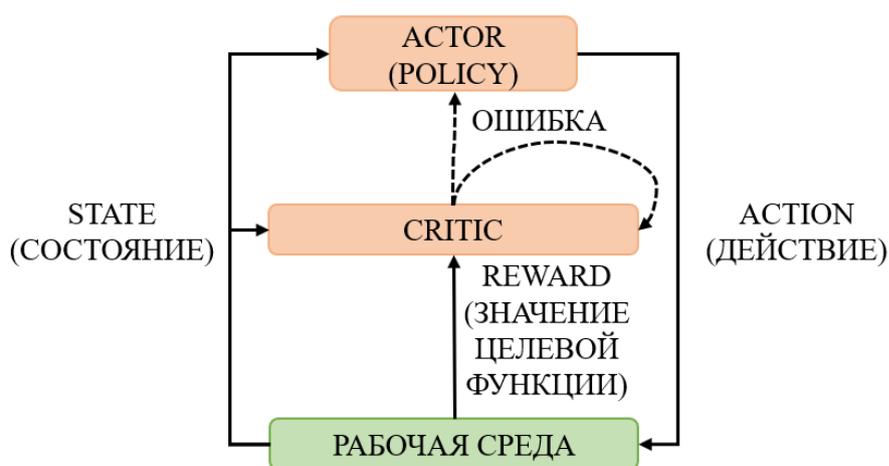


Рисунок 3.18 – Схематическое изображение метода *Actor-Critic*

Агент содержит два компонента: политику и алгоритм обучения.

Политика представляет собой сопоставление текущего наблюдения за окружающей средой с вероятностным распределением действий, которые необходимо предпринять. Внутри агента политика реализуется аппроксиматором функций с настраиваемыми параметрами и конкретной моделью аппроксимации, такой как глубокая нейронная сеть.

Обучение алгоритма происходит путем постоянного обновления параметров

политики на основе наблюдений, действий и значений целевой функции, чтобы достичь максимальной эффективности. Целью алгоритма обучения является нахождение такой политики принятия решений, при которой оптимизируется ожидаемая совокупная долгосрочная ценность целевой функции при выполнении поставленной задачи.

В зависимости от алгоритма обучения агент поддерживает один или несколько аппроксиматоров параметризованных функций для обучения стратегии. Актор принимает решение о наиболее подходящем действии. Критики сообщают актору, насколько хорош был шаг и как его исправить.

Для создания нейрорегулятора был выбран *Actor-Critic* метод для непрерывных сред *TD3*, являющийся усовершенствованной версией алгоритма *DDPG* [190, 191] (приложение А).

Обратная связь из рабочей среды представлена измеренным моментом, сигналом ошибки регулирования момента и накопительной ошибкой (рисунок 3.19).

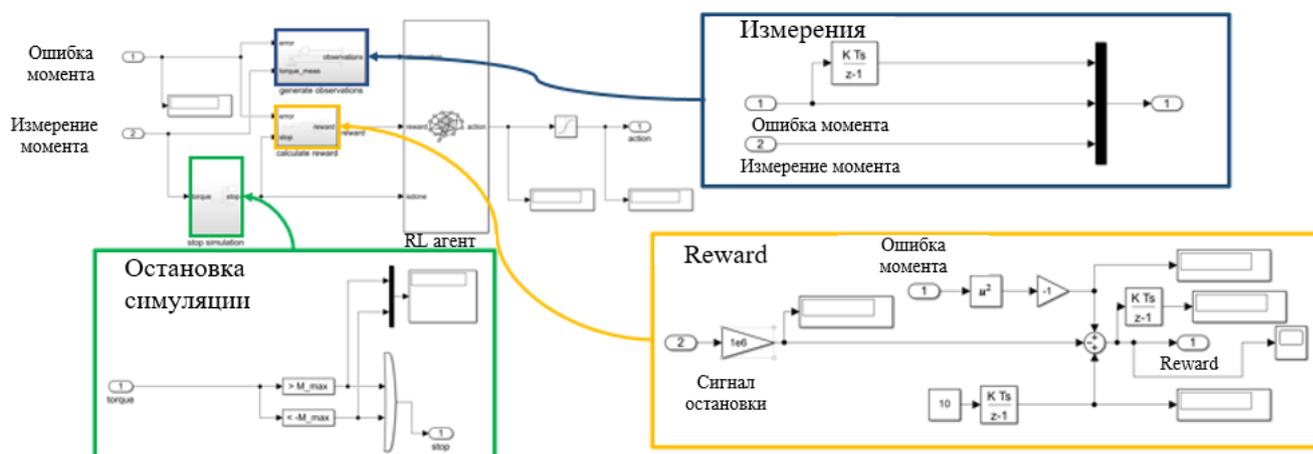


Рисунок 3.19 – Структура нейросетевого агента в имитационной модели

Целевая функция  $Q$  настроена на минимизацию среднеквадратичной ошибки и работу без аварийных прерываний, которые предусмотрены при превышении измеренного момента над максимальным моментом выбранного двигателя [192]:

$$Q = \int_0^T 10dt - error^2 - (10^6 \text{ if } stop > 0 \text{ else } 0).$$

Часть графика с увеличивающимся значением целевой функции

представлена на рисунке 3.20.

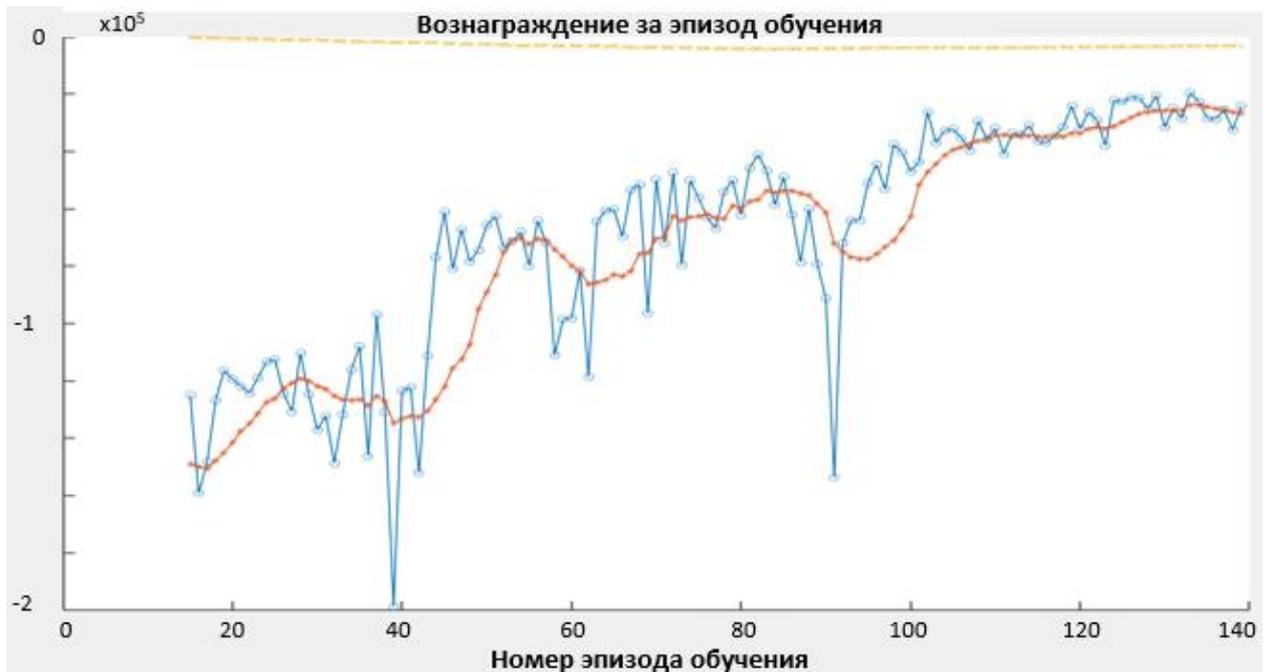


Рисунок 3.20 – Участок графика процесса тренировки

В результате исследования на участке стандартного цикла *WLTP Class 1* была произведена оценка качества регулирования момента методом измерения интегральной ошибки (рисунок 3.21).

В итоге интегральная ошибка регулирования момента с применением нейрорегулятора меньше на 30,4%, чем у регулятора, синтезированного методом СПР. При этом наблюдается выигрыш в потреблённой энергии на 25,8%.

СПР показал лучшие результаты при работе с прямым направлением вращения магнитного поля *BLDC* двигателя, но меньшую стабильность во время активных переключений направления вращения магнитного поля и подтормаживания ТС.

Большое качественное различие подачи управляющих сигналов синтезированных регуляторов можно наблюдать на графике переходного процесса заданного и измеренного напряжения. Сигнал задания на выходе классического регулятора стабилен, а нейрорегулятор подает управляющие воздействия с высокой частотой, т.к. ориентируется не на математическую модель объекта управления, а на его качественные характеристики, в частности, быстродействие.

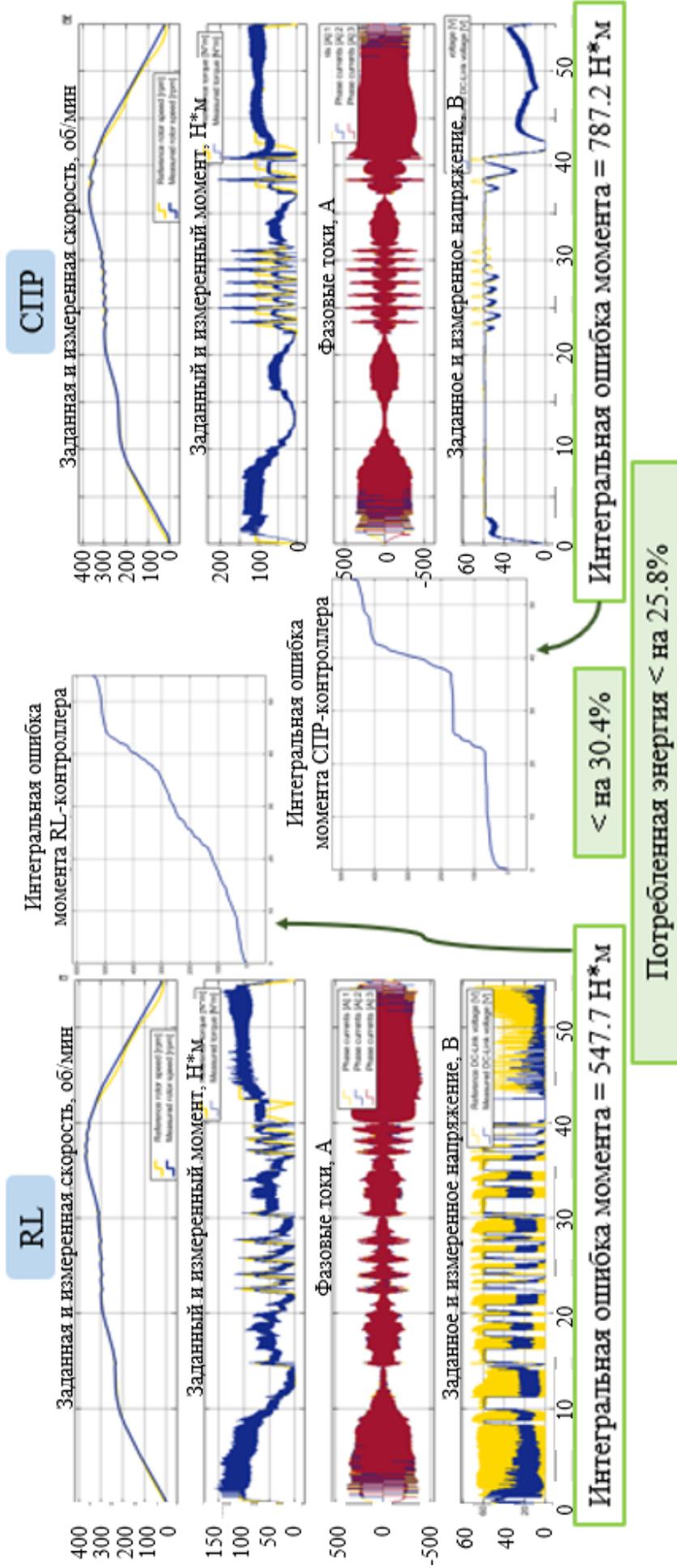


Рисунок 3.21 – Результаты исследования переходных процессов в системе тягового электропривода с нейрорегулятором (RL) и классическим регулятором (СПР).

Таким образом, доказано, что предложенная в работе методика расчёта нейрорегулятора момента тягового электропривода может быть использована в дальнейших исследованиях.

### 3.5 Исследование работы системы с буферным накопителем энергии

Для проверки работоспособности схемы предлагаемой энергетической установки было проведено моделирование работы всей системы с буферным накопителем энергии (рисунок 3.22).

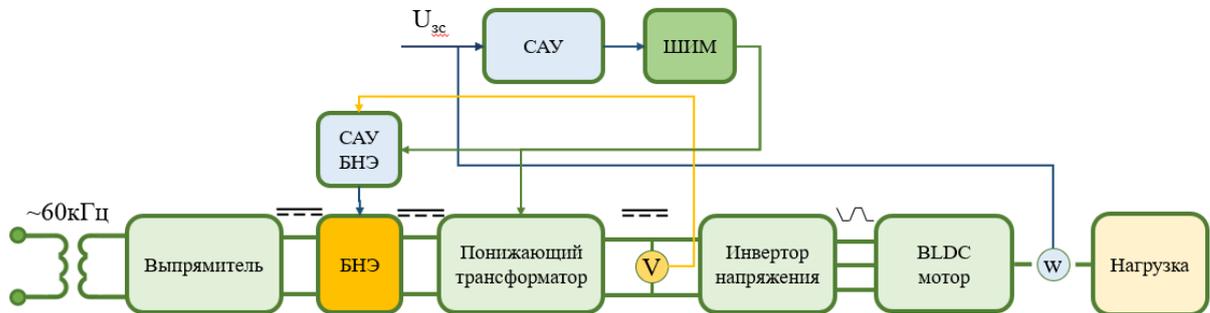


Рисунок 3.22 – Схема системы тягового электропривода с наличием буферного накопителя энергии.

Во время движения над питающей линией происходит процесс зарядки накопителя. Отдача энергии осуществляется в случае съезда с питающей линии или понижения величины питающего напряжения до уровня ниже требуемого системой автоматического управления тяговым электроприводом.

Для исследования функциональности предложенной схемы был сформирован участок движения, описанный в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Конфигурация испытательного цикла для проверки работоспособности предложенной схемы использования БНЭ

Время	Сигнал задания скорости	Питание от источника
0-12 секунд	Разгон до 18.8 км/ч с ускорением до 3 м/с <sup>2</sup> .	Номинальное напряжение V=72В
12-21 секунд	Притормаживание до скорости 10 км/ч для совершения объезда возникшего на пути препятствия	Номинальное напряжение V=72В

22-48 секунд	Объезд препятствия с равномерным удалением от питающей линии на 4,5 метра и последующим возвращением	Напряжение питания постепенно снижается до 16В, затем возвращается на номинальное значение при возвращении ТС к питающей линии.
48-64 секунд	Плавный разгон до скорости 18.8 км/ч	Номинальное напряжение $V=72В$
64-77 секунд	Равномерное движение на установившейся скорости 18.8 км/ч	Обрыв питания. Напряжение 0В.
77-90 секунд	Равномерное движение на установившейся скорости 18.8 км/ч	Питание скачком восстановлено. Номинальное напряжение $V=72В$

БНЭ работает параллельно с источником питания. Блок БНЭ в *MATLAB Simulink* был построен, как показано на рисунке 3.23.

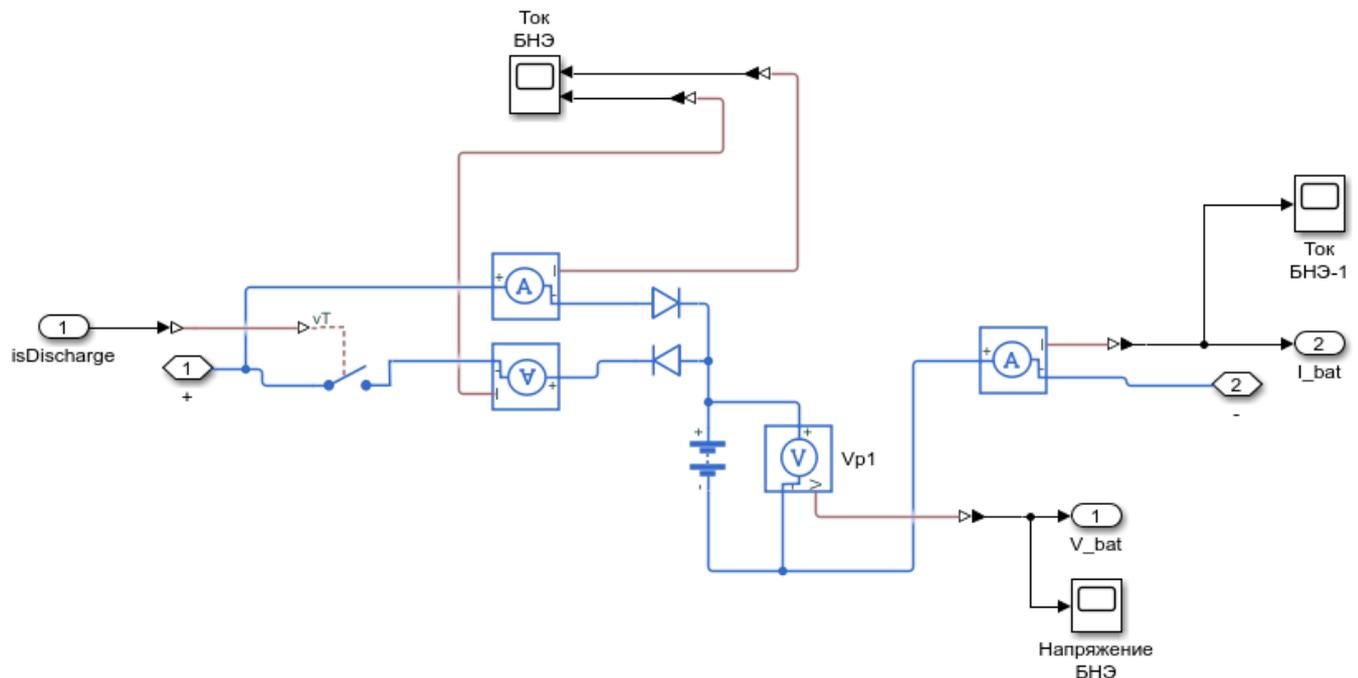


Рисунок 3.23 – Имитационная модель БНЭ

Моделирование переходных процессов с БНЭ (рисунок 3.24) показало, что:

1. Предложенная схема включения БНЭ в систему тягового электропривода работоспособна: накопитель заряжается от питающей линии при превышении порогового напряжения и отдаёт энергию в моменты, когда питания силовой линии недостаточно.

2. За счет использования БНЭ выравнивается ток и поддерживается управляемость ТС (красный четырехугольник).

3. Использование БНЭ позволяет уменьшить броски тока. В схеме с БНЭ бросок тока при восстановлении питающего напряжения меньше в 3 раза. Без БНЭ ток достигает максимальных значений токоограничения (синий четырехугольник).

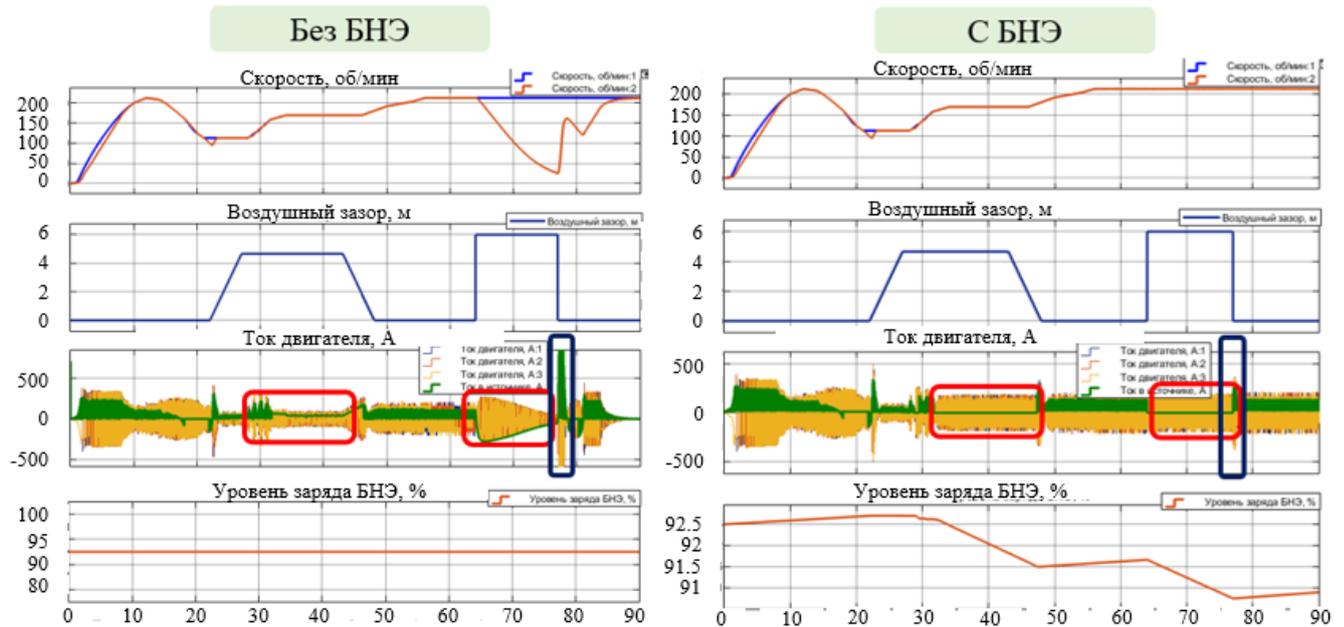


Рисунок 3.24 – Сравнение переходных процессов в тяговом электроприводе с БНЭ и без БНЭ.

Таким образом, проведенное моделирование доказывает, что использование БНЭ позволяет компенсировать провалы напряжения в питающей линии, а также сократить потери энергии за счёт ограничения бросков тока.

### Выводы по главе 3

1. Составлено математическое описание источника бесконтактной передачи энергии как элемента системы управления тяговым электроприводом. На основе анализа результатов структурного, имитационного и физического моделирования доказана правильность составленного математического описания.

2. Предложена методика оценки переменных состояния тягового электропривода с использованием искусственных нейронных сетей. Исследуемый способ позволяет оценивать момент на основе текущих показаний датчиков тока, напряжения и скорости двигателя с точностью порядка 98%.

3. Синтезирован регулятор момента тягового электропривода методом

обучения искусственных нейронных сетей с подкреплением, позволяющий расходовать на 25,8% энергии меньше по сравнению с классическим регулятором.

4. В результате моделирования доказана эффективность использования БНЭ для компенсации нестабильности питающего напряжения силовой линии и сокращения сопутствующих потерь энергии.

## ГЛАВА 4 АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В ПРОСТРАНСТВЕ

Автономность в контексте беспилотных транспортных средств состоит из двух ключевых компонентов. Первый аспект – это возможность ТС работать с автономными источниками питания. Основным моментом здесь является изучение возможности выравнивания тока разряда автономного источника питания с целью увеличения пробега без подзарядки. Второй аспект – это способность ТС прогнозировать оптимальный маршрут для передвижения от начальной до желаемой точки, избегая препятствий и удовлетворяя заданные динамические и кинематические ограничения на основе выбранного критерия оптимальности.

Основная цель внедрения навигационной системы – это формирование управляющих сигналов для электроприводов колес, которые, в свою очередь, обеспечивают необходимое управление двигателями и всей системой в целом.

На рисунке 4.1 приведена структурная схема блоков верхнеуровневого управления автономного ТС, описывающая принцип взаимодействия между системой навигации и системой тягового электропривода [193].

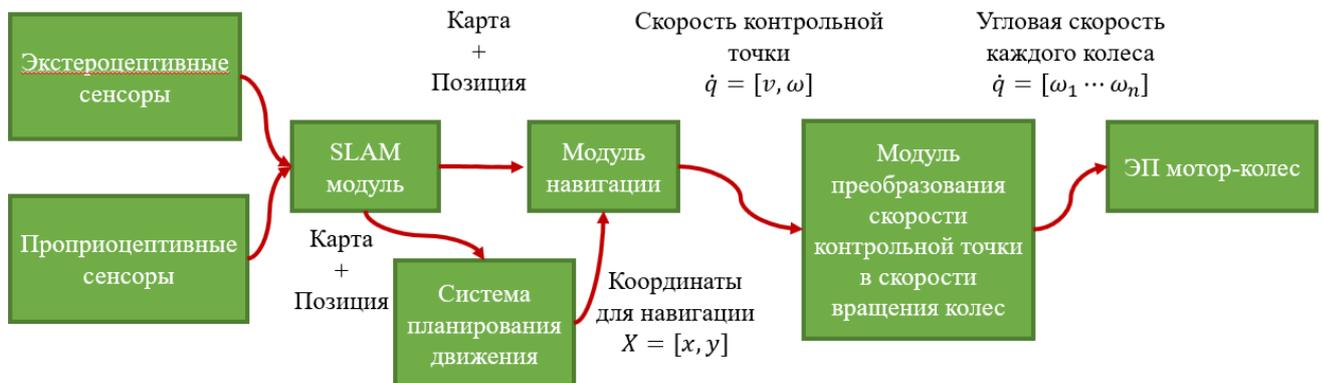


Рисунок 4.1 – Структурная схема системы управления автономного ТС

Восприятие окружающего пространства через датчики является основой навигационной системы. Модуль *SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping* = одновременная локализация и картографирование) позволяет создать карту рабочего пространства и определить текущее положение транспортного средства относительно этой карты на основе данных о состоянии окружающей среды.

Система планирования движения задаёт координаты в виде набора последовательных точек для перемещения контрольной точки на ТС, а модуль навигации определяет соответствующие линейную и угловую скорости, чтобы реализовать рассчитанную траекторию движения.

Модуль преобразования скорости ТС представляет собой систему уравнений, описывающих преобразование скорости движения контрольной точки ТС в величины угловой скорости для каждого колеса с учетом конструктивных особенностей: для одноколесной, дифференциальной, четырехколесных конфигураций подвески, с механическим, электрическим дифференциалами и т. д.

В свою очередь, на основе управляющих сигналов о желаемой скорости колес система автоматического управления электроприводами обеспечивает регулирование работы электрических двигателей, установленных на ТС.

#### **4.1 Сенсоры**

Автономное транспортное средство оснащено различными датчиками, которые позволяют ему определять параметры движения, распознавать окружающую среду и взаимодействовать с ней. Например, датчики транспортного средства могут определять скорость, местоположение и расстояние до других объектов. Сенсоры являются неотъемлемой частью системы беспилотного ТС и обеспечивают обратную связь с рабочей средой. Благодаря обратной связи беспилотное ТС может взаимодействовать с окружающей средой с минимальным количеством ошибок.

Существуют два типа сенсоров, которые используются для измерения различных данных: проприоцептивные и экстероцептивные. Проприоцептивные сенсоры используются для диагностики состояния автономного транспортного средства и информирования о его динамических параметрах, таких как скорость, положение и ориентация. Экстероцептивные же сенсоры определяют местоположение препятствий и параметров движения объекта, а также отвечают за коммуникации с другими транспортными средствами и элементами инфраструктуры.

Проприоцептивные сенсоры представлены такими устройствами, как

энкодер и инерциальная навигационная система. Экстероцептивные сенсоры включают в себя ультразвуковые датчики, радары, лазерные дальномеры (лидары), глобальную навигационную спутниковую систему и камеры.

В основе работы проприоцептивных сенсоров лежит пропорциональное изменение электрического сигнала, зависящего от относительного расположения объектов в пространстве. Например, для определения угла поворота вала или колеса, используются энкодеры, которые подсчитывают количество оборотов, сделанных валом. Текущая позиция транспортного средства определяется динамически, как смещение относительно начального положения [194]. Несмотря на то, что энкодеры могут быть использованы в робототехнических системах, существуют ограничения в их применении. Например, эти устройства могут быть неприменимы к бесколесным роботам (например, беспилотным летательным аппаратам). Кроме того, существует эффект позиционного смещения, когда ошибка накапливается со временем из-за погрешностей калибровки и принятых в расчетах допущений. Существуют также риски неточных измерений на сложных, неоднородных или скользких поверхностях. Стоит отметить, что изолированное использование таких сенсоров в системах локализации, где требуется точное измерение на длительном промежутке времени, не рекомендуется, несмотря на относительную дешевизну и простоту устройств.

Инерциальные навигационные системы, также относящиеся к категории проприоцептивных сенсоров, позволяют определять местоположение, ориентацию и ускорение объекта, а также его линейные и угловые скорости относительно заданной точки отсчета с помощью акселерометров, гироскопов и компаса (датчика *IMU*), установленных на объекте. Акселерометр определяет ускорение объекта относительно его положения в покое, в то время как гироскоп использует данные гравитации и магнитные поля для определения ориентации объекта. Датчики *IMU* относятся к микро-электромеханическим системам (*MEMS*) и являются наиболее подходящим выбором для автономных систем благодаря низкому энергопотреблению и компактным размерам. *IMU*, будучи сенсорной системой проприоцептивной природы, не нуждается в информации о состоянии

окружающей среды для расчета своего положения в трехмерном пространстве. Однако, в случае неточной калибровки эти системы могут быть также подвержены позиционному смещению, что приводит к постепенному накоплению ошибки в измерениях. Этот недостаток исключает их использование в устройствах, требующих точного и долговременного измерения положения объекта в пространстве [195].

Для измерения расстояния до объектов окружающей среды могут быть использованы ультразвуковые (УЗ) датчики. Они излучают звуковые волны с частотой более 20 000 Гц. При встрече с объектом звуковая волна отражается и фиксируется приемником. Электронная схема измеряет время между подачей импульса и приемом эха, что позволяет определить расстояние до объекта. При этом расстояние определяется по формуле:

$$R = tV/2, \quad (4.1)$$

где  $t$  – измеренное время от отправки звуковой волны до его получения,  $V$  – скорость звука.

Ультразвуковые датчики способны обнаруживать объекты на расстоянии до 8 м, если они имеют твердую и гладкую поверхность. Однако, мягкие и пористые объекты, такие как вата или поролон, могут создавать помехи для работы датчика из-за поглощения звука.

Несмотря на ряд преимуществ, таких как низкая потребляемая мощность, компактные размеры и простота использования существующих УЗ датчиков на рынке, их недостатки не позволяют им быть эффективными для *SLAM*. Датчики могут давать лишь грубое представление о пространственных объектах, поэтому для создания подробной карты необходимо установить большое количество датчиков. Пример такой работы приведен в статье [196]. Несмотря на это, их использование может быть полезным в тех средах, где есть отражающие свет и прозрачные поверхности. Звуковые волны будут отражаться от таких поверхностей, таких как зеркала и стекла. Это позволит автономному транспортному средству понять, что движение в направлении объекта, который был обнаружен, запрещено, и предотвратить столкновение. В то же время, датчики,

использующие передачу световых волн, могут дать сбой в таких условиях.

Радары и УЗ-датчики работают по одному и тому же принципу. Разница заключается лишь в том, что радары используют для передачи информации радиоволны вместо звуковых волн. Таким образом, при подсчете расстояния до объекта по формуле (4.1), необходимо заменить скорость звука на скорость света.

Радарные датчики имеют преимущества перед другими типами датчиков благодаря своим возможностям:

1. Монтажа за непроводящими материалами.
2. Функционирования в сложных погодных условиях.
3. Быстродействия.
4. Низкой интерференции с другими системами.
5. Высокой точности измерений.

Однако, большой размер, узкий угол обзора, и высокая цена являются основными препятствиями к широкому распространению данной технологии.

*GPS (Global Positioning System)*, также известная как система глобального позиционирования, является спутниковой навигационной системой, которая позволяет определить координаты местоположения, время и расстояние в мировой системе координат *WGS84* [197]. *GPS* и его российский аналог ГЛОНАСС [198] широко используются в современных пользовательских системах навигации благодаря их способности эффективно строить маршруты на большие расстояния на открытой местности. Спутниковая навигация может создавать серьезные помехи в закрытых помещениях, а также в тех местах, где имеются проблемы с обменом информацией со спутниками. Поэтому эти системы не могут быть использованы для навигации внутри зданий и других закрытых пространств.

Лидары – это устройства, которые используют инфракрасное излучение для измерения расстояния до объектов. Направленный луч света посылается в сторону объекта, частично отражается и возвращается обратно. На основе этого отражения устройство создает карту пространства в виде облаков точек.

Выделяют две группы лидаров по типу выходных данных: дающие *2D* и *3D* облака точек. Использование *2D* лидаров обеспечивает лишь частичное

представление о структуре окружающей среды, так как они дают информацию только в одной плоскости. Это может привести к недостаточной осведомленности о потенциальных препятствиях при использовании на больших транспортных средствах. *3D*-лидары, в свою очередь, предоставляет возможность для полной реконструкции структуры окружающей среды в поле измерения и последующего анализа полученных результатов.

Лидар-системы обладают следующими преимуществами: высокая скорость и точность, большой радиус обзора, независимость от уровня освещенности, высокое разрешение картинки, отсутствие геометрических искажений и легкая интеграция с другими технологиями. Одним из ключевых ограничений в использовании *3D*-лидаров является их высокая стоимость. Также важно учитывать, что эффективность лидаров радикально снижается при работе в сложных погодных условиях (туман, дождь, дым). Поэтому для обеспечения безопасности в транспортных средствах необходимо использовать их совместно с камерами, чтобы получить более полное представление об окружающем пространстве.

Камеры в робототехнике являются привлекательным выбором по ряду причин. Во-первых, они компактны, стандартизированы и легки в установке, что позволяет быстро и без проблем монтировать их на роботах. Во-вторых, данные, которые они предоставляют, понятны для человека, что облегчает взаимодействие с роботами. Кроме того, сегодня камеры стали доступны и дешевы, что делает их использование более привлекательным. В результате камеры широко используются при решении различных задач, включая *SLAM* и навигацию.

На рынке электронных устройств становится все больше камер глубины. Эти камеры отличаются тем, что помимо цвета изображения они также предоставляют информацию о глубине изображения. В этих устройствах для каждого пикселя двумерного изображения датчика имеется информация о кратчайшем расстоянии между камерой и объектом, который находится в точке проекции этого пикселя [199].

Использование только экстероцептивных датчиков может привести к проблеме наложения восприятия - когда в зданиях или на открытом воздухе

возникают участки, которые визуально неотличимы друг от друга для этих сенсоров.

Для безопасного и точного передвижения в динамических средах необходимо использовать комбинацию энкодеров, датчиков *IMU* (измеритель угловой скорости), камер глубины и лидаров, а также ультразвуковые датчики. Это позволит компенсировать недостатки каждого из подходов и обеспечит точность и безопасность в условиях отражающих и рассеивающих свет поверхностей.

## 4.2 Локализация и картографирование

*SLAM* – это технология, которая используется в автономной и мобильной робототехнике для одновременной локализации и построения карты окружающей среды. Она позволяет автономным транспортным средствам ориентироваться в пространстве и строить карту рабочей среды, что делает их более независимыми и эффективными в выполнении задач.

*SLAM* – это интеграция двух отдельных процессов

Локализация – это оценка текущей конфигурации транспортного средства  $q = [x, y, \theta]$  на основании данных, полученных от сенсоров. Интеграция показаний с проприоцептивных датчиков для оценки параметров состояния робота  $q$  называется *dead reckoning*.

Такой метод локализации часто дает ошибку, которая возрастает со временем, что может быть связано с проскальзыванием колес или с допущениями, которые были сделаны при калибровке системы. Поэтому для повышения точности системы локализации используются данные об одометрии, полученные от экстероцептивных датчиков.

Существует несколько методов одометрии, которые основаны на разных типах сенсоров.

Применение чистой одометрии, основанной на использовании колёсных энкодеров и инерционных датчиков, также вызывает сложности при долгосрочном ориентировании в режиме реального времени.

Одометрия, основанная на радарах, лидарах и камерах глубины, может быть более точной и презентабельной в долгосрочной перспективе. Однако, каждый из

этих методов также имеет свои ограничения.

Для одометрии с помощью лидаров требуются большие вычислительные мощности [200], также существует риск неполноценного восприятия движущихся объектов [201].

Качество одометрии, основанной на применении радара, может быть нарушено из-за выпадения изображений и влияния неровностей рабочей поверхности [202].

Работа только с визуальной одометрией может привести к потере качества при работе в условиях солнечного света, а также в областях с повторяющейся или неявной структурой поверхности и размытыми контурами [203].

Также одной из серьезных проблем является накопление смещения. При инкрементном вычислении траектории камеры со временем происходит постепенное накопление ошибок, вызванных каждым новым кадром.

Объединение нескольких методов вычисления одометрии в одной компактной системе позволяет нивелировать проблемы, упомянутые выше. Визуально-инерциальный метод является одним из наиболее эффективных подходов к решению данной задачи [202].

Картографирование – это процесс создания или использования топографической карты окружающей местности на основе показаний экстероцептивных датчиков.

Для автономного транспортного средства важно иметь представление о пространстве, которое находится вокруг него, и реконструировать карту окружающей обстановки, т. е. определить взаимное положение между ТС и объектами в поле зрения его датчиков.

Для навигации колесного робота в трехмерном пространстве достаточно использовать двумерные карты. В качестве более продвинутой и безопасной альтернативы, трехмерная карта может быть преобразована в вертикальную проекцию трехмерных объектов на плоскость для упрощения процесса навигации.

### **4.3 Принцип планирования движения**

Автономные транспортные средства работают в условиях, где есть

множество препятствий. Задачи, которые они могут решать, варьируются от прокладки маршрутов в континентальном масштабе (между городами, странами) до решения задач в пределах небольшого пространства, требующего максимальной точности (парковки).

Одним из важнейших критериев при создании автономных систем, работающих в смежном с человеком пространстве, является безопасность. Необходимо, чтобы транспортное средство было способно избегать столкновений с людьми и внезапно появившимися на его пути объектами, при этом сохранив возможность выполнить поставленные перед ним задачи.

Информация об окружающей среде может быть получена до начала движения (оффлайн-планирование) или в процессе движения (онлайн-планирование).

Существует три основных подхода к планированию передвижения [204]:

1. Методы дорожных карт, содержащие, в частности, ретракцию [205] и методы разбиения на клетки [206]. Связанность свободного для перемещения пространства представляется методами этой группы в виде сети безопасных маршрутов следования. Такие решения могут быть легко реализованы, но требуют значительных вычислительных ресурсов при дискретизации рабочего пространства.

2. Вероятностные методы. Это алгоритмы для определения оптимального пути движения, основанные на произвольном распределении. К этой группе методов относятся вероятностные дорожные карты [207] и быстро исследуемые случайные деревья [208]. Эти методы могут быть довольно быстрыми, однако есть сложность при прокладывании маршрута в узких проемах.

3. Методы искусственных потенциальных полей [209]. Это семейство эвристических алгоритмов, которые хорошо работают в онлайн-режиме и помогают преодолевать локальные препятствия в режиме реального времени.

Обычно навигация осуществляется с помощью комбинированного подхода. Глобальный план создается с использованием оффлайн-методов, а локальное планирование – с помощью онлайн-методов. При наличии достаточной

вычислительной мощности могут быть использованы исключительно онлайн-методы.

#### 4.4 Оптимальное управление навигацией

В автономных транспортных средствах в качестве основных критериев оптимальности управления принимаются минимальное потребление энергии и минимальная длина пути до конечной точки на безопасном расстоянии от препятствий.

При работе в пространстве, где человек может быть подвержен риску, приоритетным является вычисление безопасных траекторий движения, поэтому сначала вычисляется оптимальная траектория, и затем осуществляется движение с минимальными энергозатратами.

Планирование движения транспортного средства предложено выполнять с использованием метода искусственных полей потенциалов. Распределение потенциалов рассчитывается на основе данных, полученных от датчиков.

Общий потенциал  $U(q)$  состоит из двух компонент: притягивающей к цели  $U_a(q)$  и отталкивающей от препятствий  $U_r(q)$  [193]:

$$U(q) = U_a(q) + U_r(q).$$

Для удобства расчетов предложено использовать допущение о том, что ТС является абсолютно жестким телом, соответственно его состояние можно описать с помощью вектора  $q = \begin{pmatrix} v \\ \omega \\ \theta \end{pmatrix}$ , описывающего текущую конфигурацию контрольной точки на ТС в виде совокупности линейной скорости  $v$ , угловой скорости  $\omega$  и угла поворота относительно начала координат  $\theta$ .

Итоговый путь строится на основе отрицательного градиента суммарного значения искусственных полей в рабочем пространстве  $-\nabla U(q)$ .

Пусть  $e = q_g - q$ , где  $q_g$  – желаемая конфигурация контрольной точки ТС. Минимизация ошибки  $e$  может быть достигнута двумя способами: параболическим или коническим (рисунок 4.2).

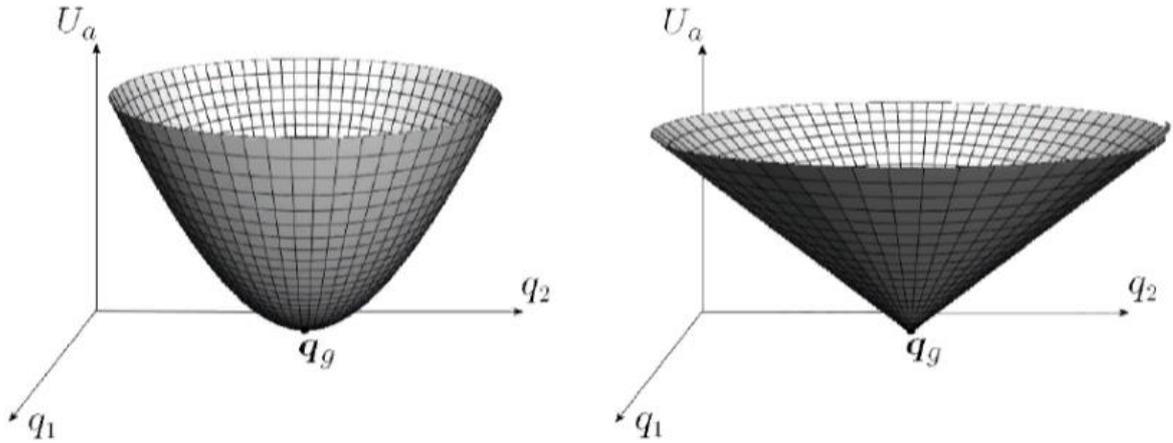


Рисунок 4.2 – Методы поиска минимума функции ошибки: параболический (слева) и конический (справа).

При описании в виде параболического градиента функция обеспечивает гладкое схождение к целевой конфигурации  $q_g$ , но её значение может возрастать бесконечно при удалении от цели. При описании функции в коническом виде градиент будет постоянным. Для достижения наилучшего результата параболическая и коническая функции используются вместе, плавно переходя друг в друга на расстоянии  $\rho$  от минимума функции.

Применяя описанный подход, уравнение притягивающего потенциала может быть представлено в следующем виде [193]:

$$U_a(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_a \|e(q)\|^2 & \text{при } \|e(q)\| \leq \rho, \\ k_b \|e(q)\| & \text{при } \|e(q)\| > \rho \end{cases}$$

где плавность перехода обеспечивается следующим отношением коэффициентов наклона функции:

$$k_b = \rho k_a.$$

Если каждый объект в окружающей среде рассматривать как отдельный многоугольник, то отталкивающий потенциал может быть рассчитан с помощью уравнения:

$$U_r(q) = \begin{cases} \frac{k_{r,i}}{\gamma} \left( \frac{1}{\eta_i(q)} - \frac{1}{\eta_{0,i}} \right)^\gamma & \text{при } \eta_i(q) \leq \eta_{0,i} \\ 0 & \text{при } \eta_i(q) > \eta_{0,i} \end{cases},$$

где  $k_{r,i} > 0$ ,  $\gamma = 2,3,\dots$ . При увеличении этого параметра, поле становится более плотным вокруг препятствий, и на границе препятствий отталкивающий потенциал достигает бесконечного значения.,  $\eta_{0,i}$  – зона опасности, создаваемая препятствием,  $\eta_i(q)$  – расстояние между транспортным средством и препятствием.

В результате потенциалы определенным образом распределяются и создают потенциальное поле, а задача планирования движения состоит в том, чтобы продвинуть целевую точку ТС к минимальному значению функции поля, которое должно совпадать с  $q_g$ .

При этом планирование движения осуществляется двумя подсистемами планирования: глобальным планировщиком (движение к цели) и локальным планировщиком (объезд заранее неизвестных препятствий и возвращение к глобальному треку). Траектория планируется таким образом, чтобы транспортное средство благополучно миновало препятствие и снова возвращалось на заданную траекторию. В данной работе в основе глобального и локального планировщиков лежит метод искусственных полей потенциалов.

Как указывалось ранее, после вычисления безопасной траектории решается задача организации движения с минимальными энергозатратами. Для этого могут быть использованы метод классического вариационного исчисления, принцип максимума или метод динамического программирования.

Метод вариационного исчисления применяется в системах, в которых на управляющие воздействия не накладываются ограничения. С помощью принципа максимума определяется общая структура оптимального регулятора, но отсутствует возможность определения траектории движения транспортного средства [210].

Для обеспечения энергоэффективности объезда препятствия предлагается организация сублокального планировщика траектории на основе использования метода динамического программирования [211] с критерием оптимальности «минимальное потребление энергии от БНЭ» в виде функционала:

$$\int_0^{\tau} P(t)dt \rightarrow \text{minimum},$$

где  $P(t)$  – потребляемая мощность от ИП,  $\tau$  – время окончания цикла движения ТС.

Управляющие воздействия выбираются таким образом, чтобы обеспечивалась не только заданная цель управления, но и минимальное значение функционала. В реальных системах на них накладываются определенные ограничения. Для уменьшения бросков тока, возникающих при скачкообразных воздействиях, в работе предлагается подчинить управляющее воздействие ограничению вида

$$\int_0^{T_k} U_y dt < \alpha = const,$$

обеспечивающему плавное изменение управления, где  $T_k$  – время окончания подачи управляющих воздействий  $U_y$ , а величина  $\alpha = const$  определяется разработчиком в процессе наладки системы.

На переменные состояния также накладываются ограничения вида

$$|x_i| \leq X_{доп},$$

где  $x_i$  – переменные состояния,  $X_{доп}$  – допустимые значения переменных состояния.

В основе метода лежит принцип оптимальности, сформулированный Беллманом [212]: «Оптимальная стратегия обладает тем свойством, что, каковы бы ни были первоначальное состояние и первоначальное решение, последующее решение должно определять оптимальную стратегию относительно состояния, полученного в результате первоначального решения». Таким образом, метод динамического программирования гарантирует нахождение оптимального решения в случае, если такое существует.

Согласно свойству оптимальной подструктуры, оптимальные решения составляющих частей приводят к оптимальному решению задачи в целом. Метод динамического программирования чаще всего применяется для численного решения задач и подходит для дискретных вычислений.

С целью экономии использования вычислительных ресурсов бортового компьютера ТС сублокальный планировщик ведет поиск наиболее энергоэффективной траектории движения лишь в ограниченной окрестности локального плана, вычисленного методом искусственных потенциальных полей

(рисунок 4.3). Размер ячеек, ширина окрестности  $l_{\text{окр}}$ , величины  $\Delta q$  выбираются исходя из вычислительной мощности бортового компьютера ТС:

$$\Delta q = \begin{pmatrix} v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

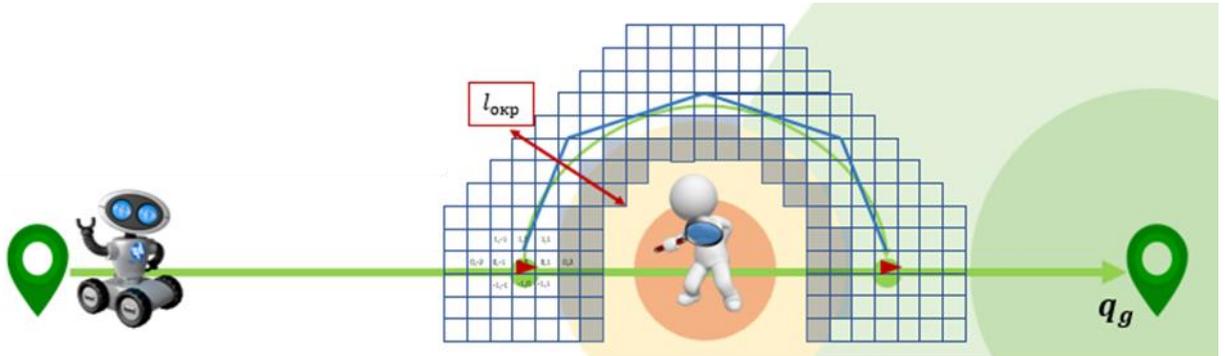


Рисунок 4.3 – Схема работы сублокального планировщика

Стоит отметить, что с целью уменьшения вычислительной сложности и отсутствия острой необходимости, в рамках решения поставленной задачи в пространстве состояний не учитывается зависимость угла поворота объекта управления относительно глобальной системы координат.

Для поиска наиболее эффективного решения задачи навигации в выделенной окрестности вычисляется траектория с  $\min(\int_0^t P(t)dt)$ . Таким образом, в случае съезда транспортного средства с питающей линии для объезда препятствий движение всегда будет производиться по траектории с наименьшим энергопотреблением.

С целью снижения риска непреднамеренной остановки ТС из-за недостаточного заряда БНЭ решение о съезде с питающей линии принимается по следующей логике:

$$\min(\int_0^t P(t)dt) > Q_{\text{БНЭ}} - \text{остановка и ожидание изменения ситуации.}$$

Уведомление оператора.

$$\min(\int_0^t P(t)dt) \leq Q_{\text{БНЭ}} - \text{съезд с питающей линии для выполнения манёвра.}$$

При возникновении препятствия на дороге для транспортного средства предусмотрено два варианта развития событий [213]. Первый случай – это

обнаружение препятствия за пределами "мертвой зоны" (зоны, где потенциал достигает критической отметки и ограничивает безопасность маневрирования). В таких условиях система генерирует сигнал для поворота руля, чтобы предотвратить столкновение.

Второй сценарий предполагает наличие объекта в "мертвой зоне", что делает маневр обхода препятствия потенциально опасным, поскольку есть риск столкновения с объектами окружающей среды. В данном случае система управления генерирует команду для экстренной остановки и отправляет уведомление оператору. Система производит вычисления несколько десятков раз в секунду, скорость вычислений ограничивается техническими характеристиками датчиков и мощностью бортового компьютера. Поэтому, когда препятствие выходит за границы "мертвой зоны" и появляется возможность для маневрирования, ТС способно вычислить новый маршрут и продолжить движение к цели.

## 4.5 Экспериментальное исследование

### 4.5.1 Система навигации

Предложенная в работе система навигации исследована на реальной установке в компании «GLK Robotics» в Академгородке, г. Новосибирск (рисунок 4.4).

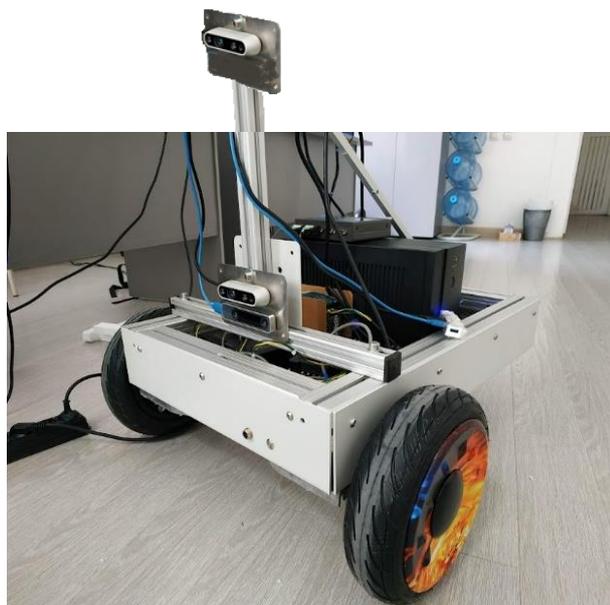


Рисунок 4.4 – Установка для тестирования навигационной системы

В качестве транспортного устройства была задействована автономная колесная база, оборудованная механизмом дифференциального управления шасси: два мотор-колеса и одно пассивное колесо рициниуса. Центр тяжести робота находится в треугольнике между точками касания земли каждого колеса.

Навигация осуществлялась с использованием двух камер глубины *Intel Realsense d435i* [214] и одной трекинговой камеры *Intel Realsense t265* [215, 216].

В качестве бортового вычислительного устройства был выбран *Nvidia Jetson Xavier* [217] с установленной операционной системой *Ubuntu* версии 18.04 [218]. Программные модули с алгоритмами навигации были реализованы на базе *ROS (Robotic Operating System)* [219].

Для того, чтобы корректно обрабатывать поступающие с камер данные: правильно объединить облака точек, указать положение камеры относительно земли – необходимо программно задать взаимное и абсолютное положение элементов робота в пространстве. Для этого была построена виртуальная 3D-модель исследуемого ТС в формате *URDF (Universal Robot Description Format)*.

Карта рабочего пространства была построена методом проекции 3D-облака точек на горизонтальную поверхность (рисунок 4.5).

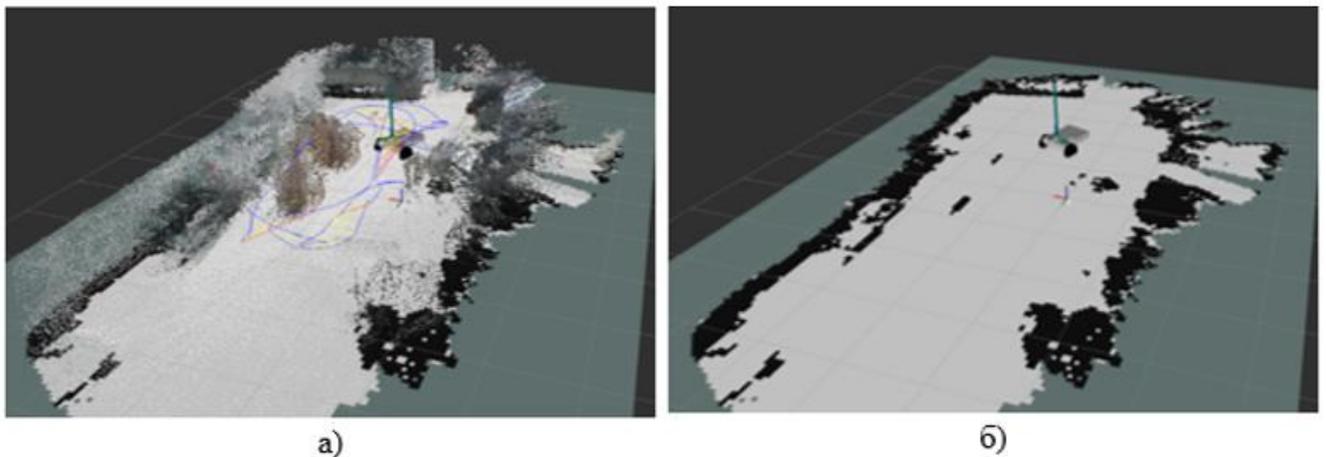


Рисунок 4.5 – Реконструкция рабочего пространства в виде облака точек (а) и 2D проекция облака точек реконструированного пространства (б)

На рисунке 4.6 представлен результат экспериментального запуска разработанной системы навигации на основе данных камеры глубины с применением метода искусственных потенциальных полей. Группы черных клеток

на изображении – это препятствия, которые были обнаружены в процессе построения карты (не двигаются и остаются на месте). Динамические препятствия выглядят как розовые клетки. Вокруг каждого препятствия отображено соответствующее поле потенциала, изображенное как градиент розово-фиолетового цвета. Стрелка обозначает целевую позицию контрольной точки ТС. В данной ситуации на пересечении глобального плана – черная линия – перед транспортным средством возникло динамическое препятствие в виде человека, которое было зафиксировано камерой глубины (см. рисунок 4.6 внизу слева). Локальный навигатор рассчитал оптимальный маршрут движения на безопасном расстоянии от человека с последующим возвратом к исходной глобальной траектории – зеленая линия.

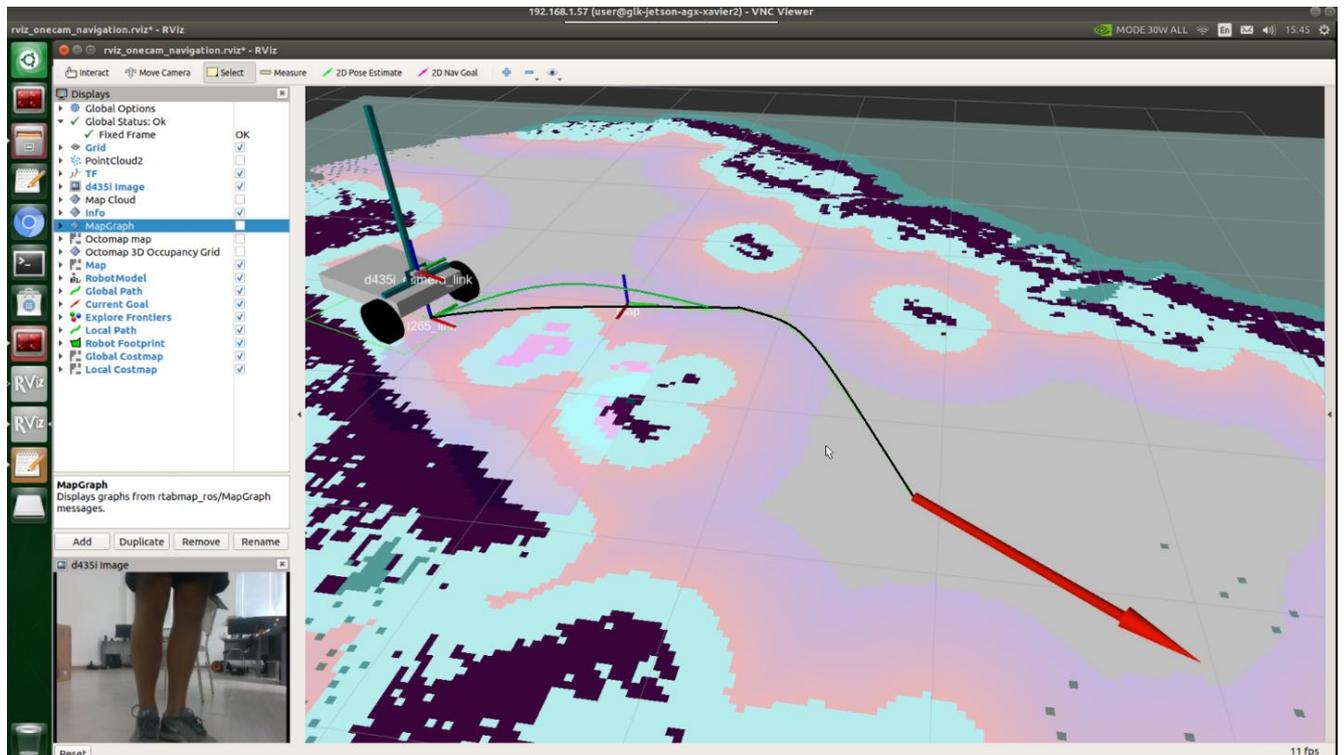


Рисунок 4.6 – Результат работы глобального и локального планировщиков траектории в ходе экспериментального запуска в интерфейсе *RViz*

#### 4.5.2 Сравнение одной и двух камер глубины

Стоит помнить, что угол обзора камеры *Intel Realsense d435i* ограничен (Приложение Б)  $\alpha = 86^\circ = 1.5$  рад по высоте, поэтому в каждый момент времени в поле зрения камеры находится лишь небольшой участок пространства (рисунок 4.7).

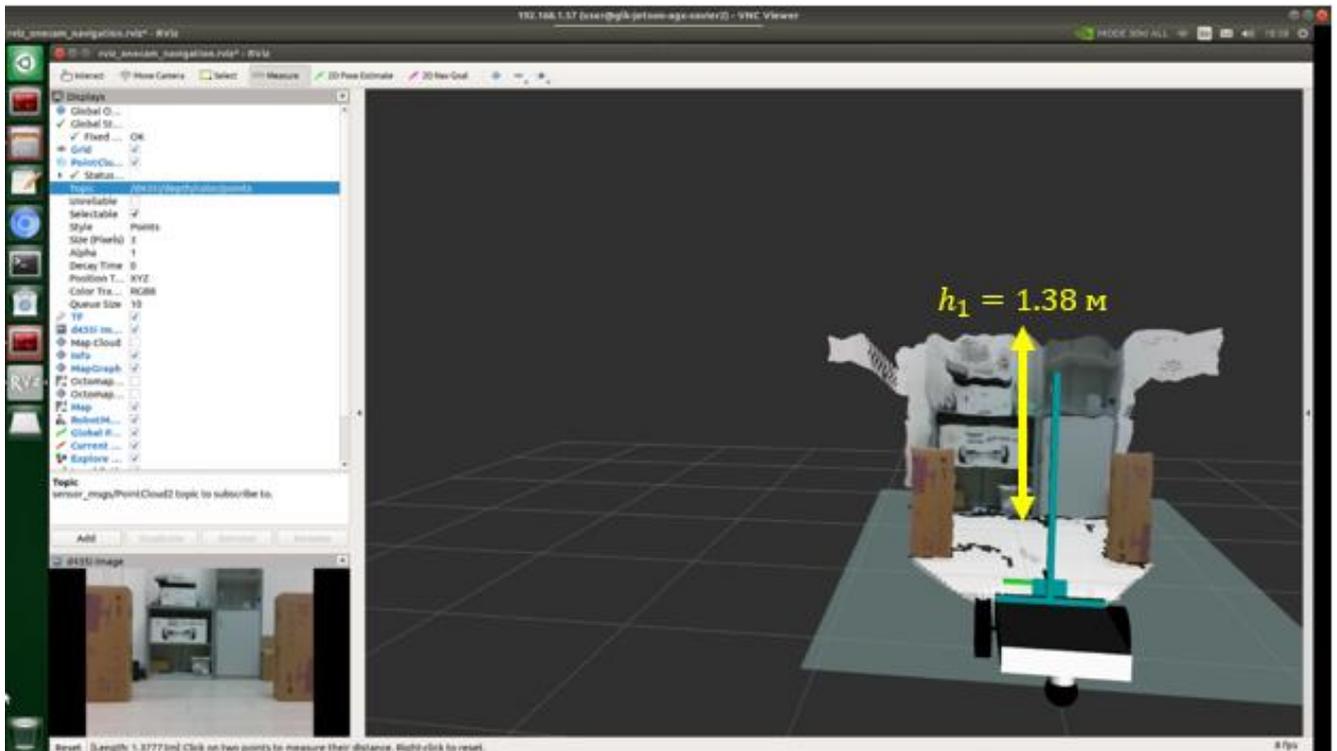


Рисунок 4.7 – Облако точек в обзоре одной камеры глубины

В данном эксперименте тележка расположена на расстоянии  $L = 3$  м от стены. Камера *Intel Realsense d435i* закреплена на высоте  $h_{c1} = 0.33$  м. Это самое низкое место на транспортном средстве, где можно безопасно расположить камеры. Под безопасностью понимается защищенность бампером от прямого столкновения с препятствиями.

Обзор с *RGB* камеры показан в левом нижнем углу рисунка 4.7, справа – соответствующее данному изображению облако точек. *RViz* позволяет использовать встроенный инструмент «линейка» для измерения расстояний в виртуальной среде.

Высота обзора одиночной камеры на расстоянии  $L$  в данном положении  $h_1 = 1.38$  м. При этом стоит учитывать, что камера охватывает область пространства в виде пирамиды с вершиной в затворе камеры. Следовательно, в «слепую зону» робота попадает достаточно большое пространство, что несёт риски для ориентирования, особенно в узких и маленьких по площади помещениях.

Для расширения угла обзора робота активируется вторая камера глубины. На рисунке 4.8 показаны обзор и замер высоты доступного обзора с той же позиции, что с одной камерой. Высота обзора становится  $h_2 = 1.89$  м, а вторая камера

расположена на высоте  $h_{c2} = 0.81$  м.

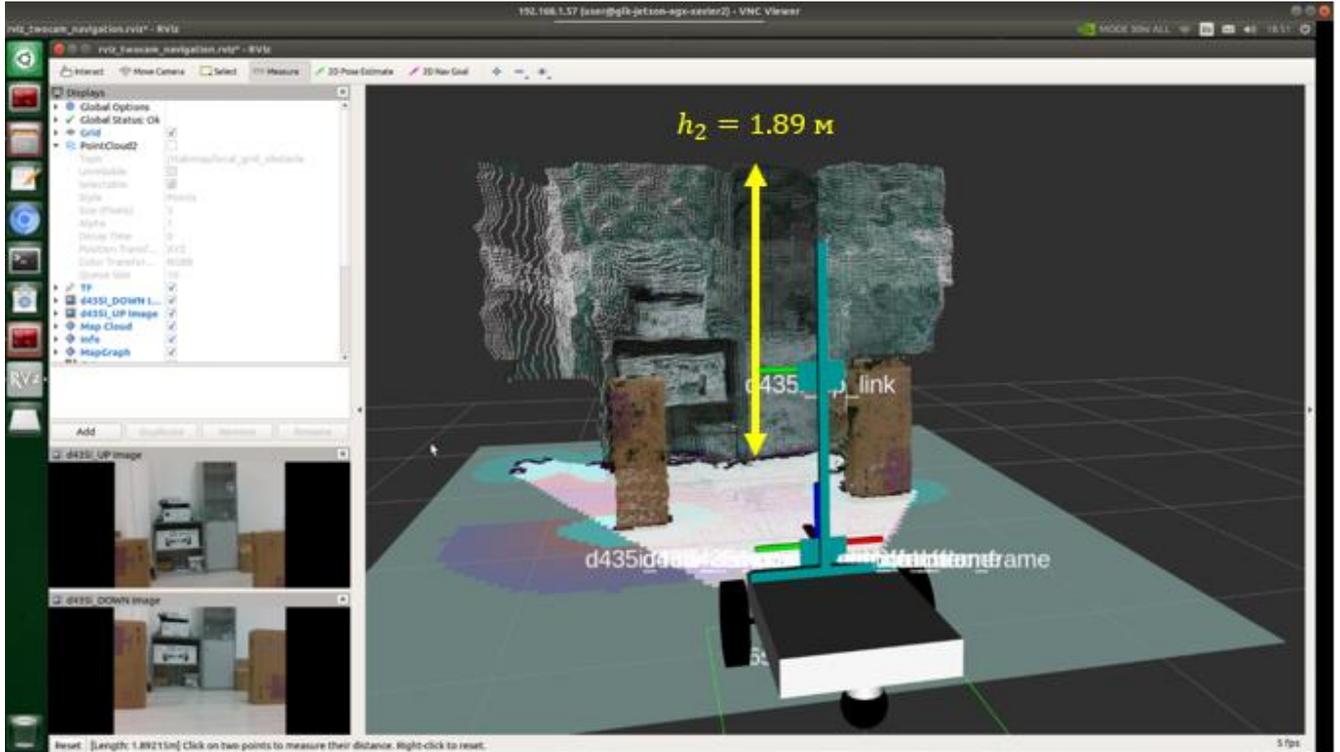


Рисунок 4.8 – Замер высоты поля зрения с двумя камерами глубины

На основании полученных измерений можно рассчитать главные показатели используемой системы навигации. Например, ошибку в калибровке камер  $Q_e$ :

$$Q_e = \operatorname{atan} \left( \frac{(h_2 - h_1) - (h_{c2} - h_{c1})}{L} \right) = \operatorname{atan} \left( \frac{(1.89 - 1.37) - (0.81 - 0.33)}{3} \right) \\ = 133.3 * 10^{-3} \text{рад} = 0.76^\circ$$

Величина ошибки калибровки  $Q_e$  не превышает одного градуса, поэтому можно говорить об удачном монтаже камер на работе и пренебречь данной погрешностью в дальнейших расчётах.

Ещё одна величина, представляющая интерес – это глубина «слепой зоны» под колёсами робота  $L_0$ , т. е. расстояния от горизонтальной проекции положения камеры до ближайшей точки на полу, попавшей в объектив (рисунок 4.9).

$$L_0 = h_{c1} * \tan \left( \frac{\pi - \alpha}{2} \right) = 0.33 * \tan \left( \frac{3.14 - 1.5}{2} \right) = 0.35 \text{ м.}$$



Из приложения Б следует, что минимальная глубина восприятия камеры *Intel Realsense d435i*  $Min_z = 0.105$  м. Стоит заметить, что высота расположения камеры  $h_{c2}$  является приемлемой с точки зрения использования ресурсов камеры. Потенциальные столкновения в верхней точке робота будут обнаружены настолько близко, насколько это возможно с использованием данной камеры глубины.

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{0.55}{0.103} = 5.34.$$

С помощью второй камеры расстояние активного восприятия препятствий на уровне высшей точки робота сократилось на 0.45 м или более, чем в 5 раз. Такие показатели говорят о радикальном улучшении восприятия роботом высоких препятствий.

Визуально проверить правильность сборки системы можно, взглянув на рисунок 4.10.

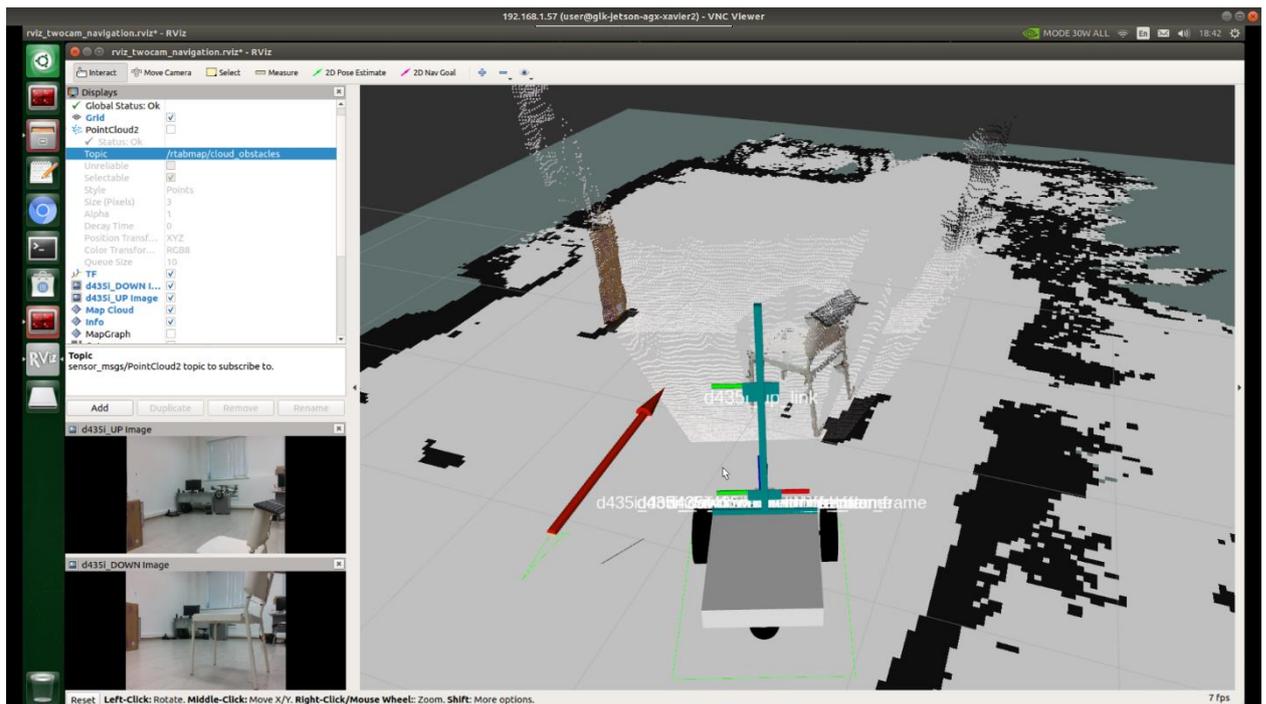


Рисунок 4.10 – Реконструкция стула как суммы облаков точек с двух камер

В левом нижнем углу показан вид с каждой из двух камер: нижняя камера смотрит на стул снизу-вверх, сиденье для неё – это прямоугольник, клавиатура не попадает в поле зрения; верхняя камера смотрит на стул сверху-вниз, видны кнопки клавиатуры, отчётливо видно сиденье стула, но в обзор не попадают ножки. В правой части рисунка 4.10 можно увидеть, что реконструкция стула получилась

полноценной и что два облака точек чётко совпадают друг с другом, дополняя понимание картины мира роботом. Попадающая в обзор двух камер одновременно спинка стула покрыта в 2 раза большим числом точек глубины, что увеличивает вес обнаруженных препятствий для алгоритма построения карты. Это можно понять по более отчётливой проекции спинки стула на 2D карту. Таким образом, можно сделать вывод о том, что обзор с двух камер даёт более репрезентативные данные о состоянии окружающего пространства.

#### 4.5.2 Локализация

Для оценки точности локализации робота в исследуемом пространстве был проведён отдельный эксперимент. Был реализован ручной способ измерений: ТС перемещали вручную ровно на один метр с места его стоянки в произвольном направлении: вперёд, назад, с произвольной ориентацией (рисунок 4.11).

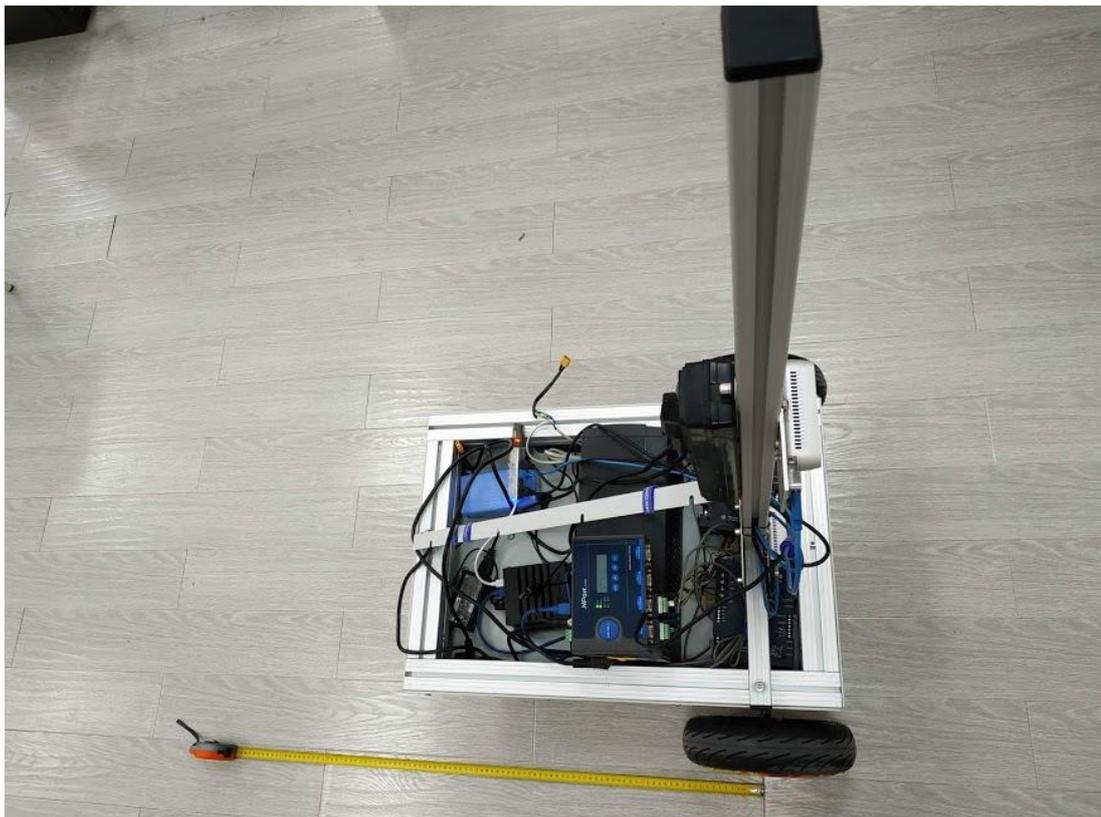


Рисунок 4.11 – Способ измерения передвижения колесной базы

При каждом смещении производилось измерение расстояния между начальной и конечной точками движения виртуальной модели. Таким образом, были получены данные 30 измерений для модели с одной камерой и модели с двумя камерами (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Измерения точности локализации робота при перемещении его на 1 метр в произвольном направлении

№	1 камера			2 камеры		
	Дистанция, м	Отклонение, %	Точность, %	Дистанция, м	Отклонение, %	Точность, %
1	1,086	8,6	91,4	1,039	3,9	96,1
2	1,071	7,1	92,9	1,02	2	98
3	1,036	3,6	96,4	1,018	1,8	98,2
4	1,032	3,2	96,8	1,017	1,7	98,3
5	1,012	1,2	98,8	1,014	1,4	98,6
6	1,005	0,5	99,5	1,006	0,6	99,4
7	1,004	0,4	99,6	1	0	100
8	0,999	0,1	99,9	0,999	0,1	99,9
9	0,999	0,1	99,9	0,993	0,7	99,3
10	0,986	1,4	98,6	0,988	1,2	98,8
11	0,985	1,5	98,5	0,975	2,5	97,5
12	0,975	2,5	97,5	0,975	2,5	97,5
13	0,961	3,9	96,1	0,973	2,7	97,3
14	0,957	4,3	95,7	0,972	2,8	97,2
15	0,951	4,9	95,1	0,966	3,4	96,6
ИТОГ	1,004	2,887	97,113	0,997	1,82	98,18

Статистическая картина полученных результатов представлена на рисунках 4.12–4.14.

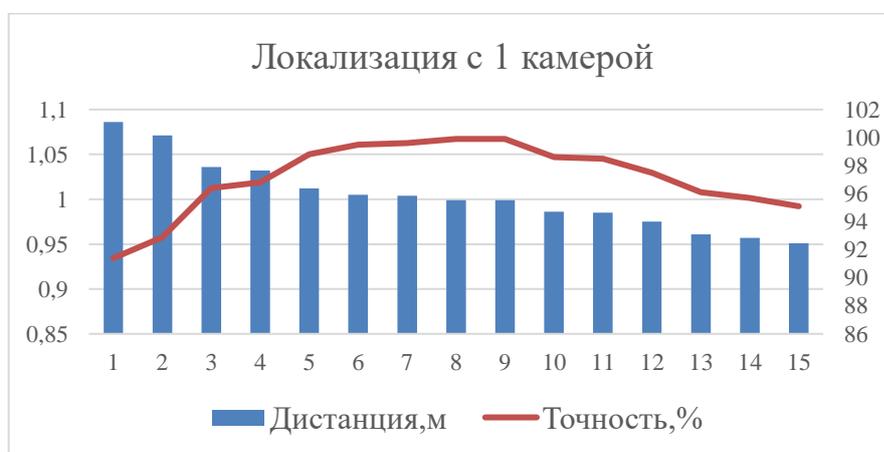


Рисунок 4.12 – Результаты измерений при локализации с одной камерой глубины



Рисунок 4.13 – Результаты измерений при локализации с двумя камерами глубины

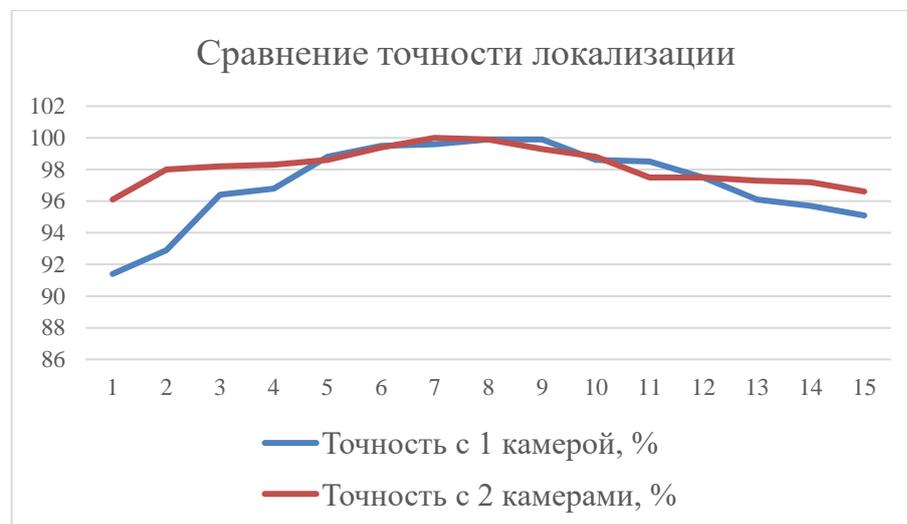


Рисунок 4.14 – Сравнение точности локализации при использовании одной и двух камер глубины

Из полученных графиков видно следующее:

1. Максимальное отклонение при работе с одной камерой – 8,6 см.
2. Максимальное отклонение при работе с двумя камерами – 3,9 см.
3. Средняя точность локализации с одной камерой – 97,113%.
4. Средняя точность локализации с двумя камерами – 98,18%.
5. Точность локализации может быть приведена к виду кривой Гаусса.
6. Среднеквадратическое отклонение (ковариация) ряда измерений с двумя камерами больше, чем у ряда измерений с одной камерой.

Отклонения находятся в пределах допустимых значений для заданной системы навигации. Средняя точность обоих подходов также удовлетворительная.

Таким образом, результаты эксперимента доказывают, что система *SLAM* на основе нескольких камер глубины позволяет осуществлять более точную и стабильную локализацию ТС в пространстве по сравнению с системой *SLAM* на базе одной камеры. Это даёт выигрыш для решения поставленных в работе задач, т. к. повышение точности навигации ТС в пространстве позволит сэкономить энергию на обработку корректирующих действий системы (подкручивание колес).

#### **Выводы по главе 4**

1. Установлено, что совместное использование метода искусственных полей потенциалов для определения безопасной траектории и метода динамического программирования для поиска траектории с минимальным потреблением энергии в окрестности построенного безопасного маршрута позволит обеспечить безопасную и энергоэффективную работу автономного электрического транспортного средства в сложных условиях эксплуатации.

2. В ходе эксперимента доказана применимость метода искусственных полей потенциалов к задачам автономной навигации, а также преимущество использования нескольких камер глубины одновременно с целью повышения точности локализации ТС и экономии энергии на обработку корректирующих действий системы навигации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Рекомендована компоновка системы тягового электропривода на основании выбранного цикла движения транспортного средства, позволяющая повысить энергоэффективность ТС.
2. Выбраны тяговый двигатель и буферный накопитель энергии на основании статистических методов расчета. Алгоритм расчета зарегистрирован в качестве объекта интеллектуальной собственности.
3. Предложено математическое описание источника бесконтактного подвода энергии как элемента системы автоматического управления, позволяющее анализировать динамические характеристики транспортного средства при изменении параметров ИП.
4. Разработан наблюдатель для оценки момента тягового электропривода на основе искусственных нейронных сетей, который использован для построения бездатчиковой системы управления.
5. Синтезирован нейрорегулятор момента тягового электропривода с применением методики обучения нейронных сетей с подкреплением, в результате применения которого энергопотребление сократилось на 25,8%.
6. Разработана система управления автономной навигацией ТС, соответствующая критериям безопасности и энергоэффективности для обеспечения безаварийной эксплуатации транспортного средства.

Востребованность разработки энергоэффективных автономных ТС будет нарастать с развитием отрасли и проникновением электрических ТС в экономику и повседневную жизнь. Представленные в работе математическое описание источника бесконтактного подвода энергии, методики синтеза нейросетевых регуляторов тягового электропривода, а также нейросетевых наблюдателей переменных состояния имеют большое научно-техническое значение. Дальнейшее совершенствование теоретических исследований и практическая отработка предлагаемых алгоритмов энергоэффективного управления могут способствовать ускорению роста отечественной экономики.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Хавтаси Н.В. Анализ и тенденции развития рынка электротранспорта индивидуального пользования на B2B рынке в России [Электронный ресурс] / Н.В. Хавтаси // Наука, образование и культура. 2018. № 5 (29). URL: [https:// cyberleninka.ru/article/n/analiz-itendentsii-razvitiya-rynka-elektrotransporta-individualnogo-polzovaniya-na-v2v-rynke-v-rossii](https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-itendentsii-razvitiya-rynka-elektrotransporta-individualnogo-polzovaniya-na-v2v-rynke-v-rossii) (дата обращения: 30.03.2021).
2. Volkswagen надеется к 2025 году стать лидером мирового рынка электромобилей [Электронный ресурс] // ТАСС URL: <https://tass.ru/ekonomika/10914603> (дата обращения: 04.06.2023).
3. Основные направления программы Nissan M.O.V.E. to 2022 [Электронный ресурс] // Автомобили на альтернативном топливе URL: <https://electrocars.top/2018/03/27/nissan-predstavil-programmu-strategicheskogo-razvitiya/> (дата обращения: 04.06.2023).
4. Tesla Financial Report 2022 [Электронный ресурс] // Tesla, Inc URL: <https://digitalassets.tesla.com/tesla-contents/image/upload/IR/TSLA-Q4-2022-Update> (дата обращения: 04.06.2023).
5. Рождественская Я. Tesla удвоила прибыль в 2022 году [Электронный ресурс] // Коммерсант. - 2023. - 26.01. - Ст. 1
6. Проект стратегии "Стратегия развития автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта Российской Федерации на период до 2030 года. Проект" от 30.03.2018 // Министерство транспорта Российской Федерации. - 2018
7. "Яндекс" представил собственный беспилотный автомобиль [Электронный ресурс] // ТАСС URL: <https://tass.ru/ekonomika/17778757> (дата обращения: 04.06.2023).
8. Первые беспилотные «КамАЗы» прошли испытания за полярным кругом [Электронный ресурс] // Известия URL: <https://iz.ru/1518881/2023-05-26/pervye-bespilotnye-kamazy-proshli-ispytaniia-za-poliarnym-krugom> (дата обращения: 04.06.2023).
9. Tesla выпустила городской автопилот. Водители больше не нужны?

[Электронный ресурс] // Редакция "N + 1" URL: <https://nplus1.ru/blog/2020/10/23/tesla-fsd> (дата обращения: 04.06.2023).

10. Autopilot | Tesla [Электронный ресурс] // Tesla, Inc. URL: <https://www.tesla.com/autopilot> (дата обращения: 04.06.2023).

11. Бабат Г.И. Высокочастотный автомобиль // Знание-сила. - 1948. - №10

12. Бабат Г.И. Дорога // журнал «Звезда», Ленинград. - 1945. - №5-6

13. N. Tesla, A. Marincic Nikola Tesla and the wireless transmission of energy // IEEE Trans. Power App. Syst. . - 1982. - №101 (10). - С. 4064 – 4068.

14. M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C.-Y. Huang Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems // IEEE Trans. on Ind. Electron.. - 2013. - №1 (vol.60). - С. 318–328.

15. G. A. Covic, J. T. Boys, M. Kissin, and H. Lu A three-phase inductive power transfer system for roadway power vehicles // IEEE Trans. on Ind. Electron.. - 2007. - №5 (vol.54). - С. 3370–3378.

16. G. A. Covic and J. T. Boys Modern trends in inductive power transfer for transportation applications // IEEE Journal of Emerging and Selected topics in power electronics. - 2013. - №1 (vol.1). - С. 28-41.

17. J. Meins and S. Carsten Transferring energy to a vehicle // Патент. - 2010. - №WO 2010 000494

18. J. Meins and K. Vollenwyder System and method for transferring electrical energy to a vehicle // Патент. - 2010. - №WO 2010 000495

19. K. Vollenwyder, J. Meins, and C. Struve Inductively receiving electric energy for a vehicle // Патент. - 2012. - №US 0055751

20. M. Zengerle Transferring electric energy to a vehicle using a system which comprises consecutive segments for energy transfer // Патент. - 2012. - №US 0217112

21. K. Vollenwyder and J. Meins Producing electromagnetic fields for transferring electric energy to a vehicle // Патент. - 2013. - №US 8544622.\

22. R. Czainski, J. Meins, and J. Whaley Transferring electric energy to a vehicle by induction // Патент. - 2013. - №US 0248311

23. J. Meins German activities on contactless inductive power transfer // IEEE

Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2013

24. Bombardier Redefines e-mobility for Rail and Road with PRIMOVE Technology [Электронный ресурс] // Bombardier URL: <https://bombardier.com/en/media/news/bombardier-redefines-e-mobility-rail-and-road-primove-technology> (дата обращения: 04.06.2023).

25. Omer C. Onar, John M. Miller, Steven L. Campbell, Chester Coomer, Cliff. P. White, and Larry E. Seiber A novel wireless power transfer for in-motion EV/PHEV charging // IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition (APEC). - 2013. - C. 3073-3080.

26. John M. Miller, Omer C. Onar, and P. T. Jones ORNL developments in stationary and dynamic wireless charging // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2013

27. Внутренний отчет "Feasibility studies of On-Line Electric Vehicle (OLEV) Project" // KAIST OLEV team. - 2009

28. N. P. Suh, D. H. Cho, and Chun T. Rim Design of on-line electric vehicle (OLEV) // Plenary lecture at the 2010 CIRP Design Conference. - 2010. - C. 3-8.

29. S. W. Lee, J. Huh, C. B. Park, N. S. Choi, G. H. Cho, and Chun T. Rim On-line electric vehicle (OLEV) using inductive power transfer system // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2010. - C. 1598-1601.

30. J. Huh, S. W. Lee, C. B. Park, G. H. Cho, and Chun T. Rim High performance inductive power transfer system with narrow rail width for on-line electric vehicles // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2010. - C. 647-651.

31. S. W. Lee, C. B. Park, J. G. Cho, G. H. Cho, and Chun T. Rim Ultra slim U & W power supply and pick-up coil design for OLEV // Korean Institute of Power Electronics (KIPE) Annual Summer Conference. - 2010. - C. 353-354.

32. J. Huh and Chun T. Rim KAIST wireless electric vehicles – OLEV // JSAE Annual Congress. - 2011

33. J. Huh, W. Y. Lee, G. H. Cho, B. H. Lee, and Chun T. Rim Characterization of novel inductive power transfer systems for on-line electric vehicles (OLEV) // IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition (APEC). - 2011. - C. 1975-1979.

34. J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and Chun T. Rim Narrow-width inductive power transfer system for on-line electrical vehicles (OLEV) // IEEE Trans. on Power Electron. - 2011. - №12 (vol. 26). - С. 3666-3679.
35. Chun T. Rim The development and deployment of on-line electric vehicles (OLEV) // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2013
36. Su Y. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee, and Chun T. Rim New cross-segmented power supply rails for roadway powered electric vehicles // IEEE Trans. on Power Electron. - 2013. - №12 (vol. 28). - С. 5832-5841.
37. Su Y. Choi, Beom W. Gu, Seog Y. Jeong, and Chun T. Rim Ultra-slim S-type inductive power transfer system for roadway powered electric vehicles // International Electric Vehicle Technology Conference & Automotive Power Electronics in Japan (EVTec & APE Japan). - 2018
38. В.Е. Розенфельд, Е.В. Чеботарев, Н.Н. Сидоров, Н.А. Болдов Основы электрической тяги . - М., СПб.: Госэнергоиздат, 1957. - 311 с.
39. М.П. Кутыловский, Д. А. Сургучев Электрическая тяга на городском транспорте. - М.: Стройиздат, 1964. - 348 с.
40. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог – М.: Транспорт, 1982. - 528 с.
41. Феокистов В.П. Анализ энергозатрат в перевозочном процессе на железнодорожном транспорте методом энергобаланса / Транспорт: наука, техника, управление. - Москва: ВИНТИ, 1992, №10. - С. 23 - 26.
42. Rufer A. Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based Energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks // EPE Journal. - 2003. - №14
43. Щуров Н.И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта: дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Щуров Николай Иванович. - Новосибирск, 2003. - 385 с.
44. Сопов В. И. Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации трамваев и троллейбусов: коллективная монография / В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, А. А. Штанг; под. ред. В. Н. Аносова. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - С. 253 - 263.

45. М.В. Ярославцев Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.09.03 / Ярославцев Михаил Викторович. - Новосибирск, 2016.

46. Штанг А.А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.09.03 / Штанг Александр Александрович. - Новосибирск, 2006. - 233 с.

47. Спиридонов Е.А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.09.03 / Спиридонов Егор Александрович. - Новосибирск, 2009. - 165 с.

48. Аносов В.Н. Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств : дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.09.03 / Аносов Владимир Николаевич. - Новосибирск, 2008. - 252 с.

49. Аносов В. Н. Повышение эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств: монография / В.Н. Аносов, В.М. Кавешников. - Новосибирск: Издательство НГТУ, 2014. - 218 с.

50. Попов Н. С. Повышение энергетической эффективности системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства: дис. канд. техн. наук: 05.09.03. - Новосибирск, 2022. - 150 с.

51. Жук А.А., Булойчик В.М., Акулич С.В. Планирование оптимального маршрута движения беспилотного летательного аппарата по критерию минимума общего расхода топлива // Системный анализ и прикладная информатика. - 2022. - №3. - С. 43-49.

52. Zongyuan Shen, James P. Wilson, Shalabh Gupta et al.: An Online Coverage Path Planning Algorithm for Energy-constrained Autonomous Vehicles // IEEE/MTS Global Oceans . - 2020

53. Soovadeep Bakshi, Tianheng Feng, Zeyu Yan, Zheren Ma & Dongmei Chen Energy-Conscientious Trajectory Planning for an Autonomous Mobile Robot in an Asymmetric Task Space // Journal of Intelligent & Robotic Systems. - 2021. - №18 (101)

54. Chen, Yung-Hsiang and Chen, Yung-Yu and Lou, Shi-Jer and Huang, Chiou-Jye Energy Saving Control Approach for Trajectory Tracking of Autonomous Mobile Robots // Intelligent Automation & Soft Computing. - 2022. - №31. - C. 357-372.

55. L. Liu , R. Zhong , A. Willcock, N. Fisher1 , and W. Shi An Open Approach to Energy-Efficient Autonomous Mobile Robots // IEEE International Conference on Robotics and Automation. - 2023

56. X Zhang, Y. Huang, Y. Rong, G. Li, H. Wang and C. Liu Optimal Trajectory Planning for Wheeled Mobile Robots under Localization Uncertainty and Energy Efficiency Constraints // Sensors . - 2021. - №21 (2)

57. M. Wei And V. Isler Energy-efficient Path Planning for Ground Robots by Combining Air and Ground Measurements // arXiv:1907.06337v1 [cs.RO] . - 2019

58. H. Yu, Y. Wang, S.A. Bortoff, K. Ueda Energy-Efficient Trajectory Planning for a Mobile Agent by Using a Two-Stage Decomposition Approach // Preprints of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control. - 2014. - C. 3851-3856.

59. M. Baggetta, G. Berselli, R. Razzoli & M. Zucchinetti Energy Efficient Trajectory Planning in Robotic Cells via Virtual Prototyping Tools // JCM 2022: Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing. - 2022. - №4. - C. 614–625.

60. Yu, H., Wang, Y., Bortoff, S.A., Ueda, K Energy-Efficient Trajectory Planning for a Mobile Agent by Using a Two-Stage Decomposition Approach // World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC). - 2014

61. Zhao, Y., Wang, Y., Bortoff, S.A., Nikovski, D Energy-Efficient Collision-Free Trajectory Planning Using Alternating Quadratic Programming // American Control Conference (ACC). - 2014

62. International Energy Agency. Global EV Outlook 2023 Catching up with climate ambitions / [Электронный ресурс] // IEA – International Energy Agency : [сайт]. — URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf> (дата обращения: 03.06.2023).

63. Лобода В. А. Рынок новых электромобилей в России в 2022 году

установил рекорд / Лобода В. А. [Электронный ресурс] // Автостат Аналитическое агентство : [сайт]. — URL: <https://www.autostat.ru/news/53604/> (дата обращения: 03.06.2023).

64. Миклашевская А. К 2030 году в мире будет 145 млн электромобилей / Миклашевская А. [Электронный ресурс] // Коммерсантъ : [сайт]. — URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4799230> (дата обращения: 03.06.2023).

65. Электромобили и автомобили с комбинированной энергоустановкой. Расчет скоростных характеристик: учеб. пособие / В.Е. Ютт, В.И. Строганов. – М.: МАДИ, 2016. – 108 с.

66. Xu G., Zheng C., Zhang Y., Xu K., Liang J. Energy Efficiency of Electric Vehicles – Energy Saving and Optimal Control Technologies / Xu G., Zheng C., Zhang Y., Xu K., Liang J. [Электронный ресурс] // Intechopen : [сайт]. — URL: <https://www.intechopen.com/chapters/47720> (дата обращения: 03.06.2023).

67. Xu G., Li W., Xu K., Song Z. An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles // Energies. - 2011. - №4. - С. 1461-1477.

68. Naseri F., Barbu C., Sarikurt T. Optimal sizing of hybrid high-energy/high-power battery energy storage systems to improve battery cycle life and charging power in electric vehicle applications // Journal of Energy Storage. - 2022. - №55. - С. 1-20.

69. Wang J., Yuan X., Atallah K. Design Optimization of a Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor With Concentrated Windings for Electric Vehicle Applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - 2013. - №62. - С. 1053-1064.

70. Zhao W., Zhao F., Lipo T., Kwon B. Optimal Design of a Novel V-Type Interior Permanent Magnet Motor with Assisted Barriers for the Improvement of Torque Characteristics // IEEE Transactions on Magnetics. - 2014. - №50. - С. 1-4.

71. Yamazaki K., Kato Y., Ikemi T., Ohki S. Reduction of Rotor Losses in Multilayer Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors by Introducing Novel Topology of Rotor Flux Barriers // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2013. - №50. - С. 1220-1226.

72. Puma-Benavides D., Izquierdo-Reyes J., Galluzzi R., Calderon-Najera J. Influence of the Final Ratio on the Consumption of an Electric Vehicle under Conditions

of Standardized Driving Cycles // Applied Sciences. - 2021. - №11. - С. 1-15.

73. Li B., Du H., Li W., Zhang B. Integrated Dynamics Control and Energy Efficiency Optimization for Overactuated Electric Vehicles: Integrated Dynamics Control and Energy Efficiency Optimisation // Asian Journal of Control. - 2017. - №20. - С. 1-13.

74. Kavalchuk I., Seyedmahmoudian M., Horan B., Than Oo A., Stojcevski A. Load Control Algorithm for Efficient Energy Management in Electric Vehicles // The International Conference on Automotive Technology for Vietnam - ICAT2015. - 2015. - С. 1-9.

75. Cheng L., Xingqun C. A Traction Control Strategy with an Efficiency Model in a Distributed Driving Electric Vehicle // The Scientific World JOURNAL. - Article ID 261085. - 2014.

76. Moreno J., Ortúzar M., Dixon J., Member S. Energy-Management System for a Hybrid Electric Vehicle , Using Ultracapacitors and Neural Networks // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2006. - №53. - С. 614-623.

77. Тяговый электрический привод : учеб. пособие / В.В. Бирюков, Е.Г. Порсев. – 2-е изд. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 314 с.

78. ГОСТ Р 59078-2020 Электромобили и автомобильные транспортные средства с комбинированными энергоустановками. Классификация : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2020 г. N 762-ст : введен впервые : дата введения 2021-04-30 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ" (ФГУП "НАМИ"). – Москва : Стандартинформ, 2020. – 8 с. – Текст : непосредственный.

79. Оганесян, Р. М. Исследование технико-экономической эффективности и определение перспективных типов технических средств автомобильного транспорта с комбинированными энергосиловыми установками: автореф. дис. канд. техн. наук: 08.00.05. - М., 1977. - 19 с.

80. Shepero M., Munkhammar J. Data from electric vehicle charging stations: Analysis and model development // 1st E-Mobility Power System Integration Symposium. - 2017. - С. 1-4.

81. Popov N. S., Anibroev V. I., Mosin M. E. Study of processes that cause degradation of lithium-ion batteries // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). - 2021. - С. 1-4.

82. Qiang H., Hu Y., Tang W., Zhang X. Research on Optimization Strategy of Battery Swapping for Electric Taxis // Energies. - 2023. - №16. - С. 1-15.

83. Ram Vara Prasad B., Geethanjali M., Sonia M., Ganeesh S., Krishna P. Solar wireless electric vehicle charging system // International journal of scientific research in engineering and management. - 2022. - №6. - С. 1-7.

84. Al-Samari A. Study of emissions and fuel economy for parallel hybrid versus conventional vehicles on real world and standard driving cycles // Alexandria Engineering Journal. - 2017. - №56. - С. 1-6.

85. Al-Samari A. S. A. Impact of Intelligent Transportation Systems on Parallel Hybrid Electric Heavy Duty Vehicles: автореф. дис. канд. техн. наук: Morgantown, 2014

86. Xiao L., Ping W., Dusit N., Dong In K., Zhu H., Перевод: Гречишников А. Технологии беспроводной зарядки. Часть 1. Теоретические основы и способы аппаратной реализации // Беспроводные технологии. - 2017. - №3. - С. 56-64.

87. Oraan M. Charging EVs As They Travel: Wireless Inductive, Conductive, or Battery Swap? (Part 3) / Oraan M. [Электронный ресурс] // Autoevolution : [сайт]. — URL: <https://www.autoevolution.com/news/charging-evs-as-they-travel-wireless-inductive-conductive-or-battery-swap-part-3-210955.html> (дата обращения: 03.06.2023).

88. Shoman W., Karlsson S., Yeh S. Benefits of an Electric Road System for Battery Electric Vehicles // World Electric Vehicle Journal. - 2022. - №13. - С. 1-21.

89. С небес под землю. Зачем и как в Москве прячут провода / [Электронный ресурс] // РИА Новости : [сайт]. — URL: <https://ria.ru/20180212/1513853093.html> (дата обращения: 03.06.2023).

90. Улучшить визуальный облик и обеспечить безопасность: как реализуется программа «Чистое небо» / [Электронный ресурс] // Официальный сайт Мэра Москвы : [сайт]. — URL: <https://www.mos.ru/news/item/119388073/> (дата обращения: 03.06.2023).

91. Kazmierkowski M.P. and Moradewicz A. Unplugged But Connected: Review of Contactless Energy Transfer Systems // *Industrial Electronics Magazine, IEEE*. - 2012. - №6. - С. 47-55.

92. Raible D., Dinca D., Nayfeh T. Optical frequency optimization of a high intensity laser power beaming system utilizing VMJ photovoltaic cells // 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications, ICSOS'11. - 2011. - С. 232-238.

93. Sahai A., Graham D. Optical wireless power transmission at long wavelengths // 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications, ICSOS'11. - 2011. - С. 164-170.

94. Roes M., Duarte., Hendrix M., Lomonova E.A. Acoustic Energy Transfer: A Review // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. - 2013. - №60. - С. 242-248.

95. Hu Y. T., Zhang X. S., Yang J. S., Jiang Q. Transmitting Electric Energy Through a Metal Wall by Acoustic Waves Using Piezoelectric Transducers // *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. - 2003. - №50. - С. 773 - 781.

96. Liu C., Hu A. Steady state analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system // *Energy Conversion Congress and Exposition*. - 2009. - С. 3233 - 3238.

97. Theodoridis M. Effective Capacitive Power Transfer // *IEEE Transactions on Power Electronics*. - 2012. - №27. - С. 4906-4913.

98. Liu C., Hu A., Nair, N.-K.C. Modelling and analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system // *Power Electronics, IET*. - 2011. - №4. - С. 808 - 815.

99. Pijl F.F.A., Ferreira J.A., Bauer P., Polinder H. Design of an Inductive Contactless Power System for Multiple Users // *IEEE industry applications conference*. - 2006. - №4. - С. 1876-1883.

100. Mecke R., Rathge C. High frequency resonant inverter for contactless energy

transmission over large air gap // IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. - 2004. - №3. - С. 1737 - 1743.

101. Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J. D., Fisher P., Soljacic M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances // SCIENCE. - 2007. - №317. - С. 83-86.

102. Systems Control Technology, Inc. Roadway Powered Electric Vehicle Project Track Construction And Testing Program Phase 3D. - Palo Alto, California: California PATH Research Paper, 1994. - 302 с.

103. Ahn S., Suh N. P. & Cho D. Charging Up the Road // SPECTRUM.IEEE.ORG. - 2013. - С. 49-54.

104. Chun T. R. Wireless Power Transfer Systems for Roadway-powered Electric Vehicles / Chun T. R. [Электронный ресурс] // IEEE Transportation Electrification Community : [сайт]. — URL: <https://tec.ieee.org/newsletter/september-october-2014/wireless-power-transfer-systems-for-roadway-powered-electric-vehicles> (дата обращения: 04.06.2023).

105. Polo J, Hontecillas L, Izquierdo I, Casas O. Micro air vehicles energy transportation for a wireless power transfer system // International Journal of Micro Air Vehicles. - 2019. - №11

106. Laporte S., Coquery G., Deniau V., De Bernardinis A., Hautière N. Dynamic Wireless Power Transfer Charging Infrastructure for Future EVs: From Experimental Track to Real Circulated Roads Demonstrations // World Electric Vehicle Journal. - 2019. - №10. - С. 1-22.

107. Laporte S., Coquery G., Revilloud M., Deniau V. Experimental performance assessment of a dynamic wireless power transfer system for future EV in real driving conditions // the Ninth International Conference. - 2018. - С. 570-578.

108. MOVITRANS Contactless Energy Transfer [Электронный ресурс] // SEW Eurodrive URL: [https://www.sew-eurodrive.ru/products/contactless\\_energy\\_transfer\\_system/contactless\\_energy\\_transfer\\_system\\_movitrans/contactless\\_energy\\_transfer\\_system\\_movitrans.html](https://www.sew-eurodrive.ru/products/contactless_energy_transfer_system/contactless_energy_transfer_system_movitrans/contactless_energy_transfer_system_movitrans.html) (дата обращения: 07.06.2023).

109. Electreon. Home Page [Электронный ресурс] // Electreon.com URL: <https://electreon.com/> (дата обращения: 04.06.2023).

110. Норкин А. Индукционная система PRIMOVE заряжает аккумуляторы без проводов / Норкин А. [Электронный ресурс] // Facepla.net : [сайт]. — URL: <https://facepla.net/index.php/the-news/eco-transportation-mnu/3354-primove> (дата обращения: 04.06.2023).

111. Inductive charging for electric vehicles while driving: a major ecological challenge / [Электронный ресурс] // Vedecom : [сайт]. — URL: <https://www.vedecom.fr/inductive-charging-for-electric-vehicles-while-driving/?lang=en> (дата обращения: 04.06.2023).

112 Inductive Power Transfer / [Электронный ресурс] // Conductix : [сайт]. — URL: [https://www.conductix.us/en/products/inductive-power-transfer?parent\\_id=11830](https://www.conductix.us/en/products/inductive-power-transfer?parent_id=11830) (дата обращения: 04.06.2023).

113. Larminie J., Lowry J. Electric Vehicle Technology Explained. - 2-е изд. - John Wiley & Sons, 2012. - 344 с.

114. Jain M., Williamson S. Suitability analysis of in-wheel motor direct drives for electric and hybrid electric vehicles // Electrical Power & Energy Conference (EPEC). - 2009. - С. 1-5.

115. Espanet C., Dubas F., Mai H., Chamagne D., Bernard R., Bigot P. In-wheel motor for a small hybrid electric vehicle: Design, realization and experimental characterization // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2012. - С. 892-898.

116. Zhitkova S., Felden M., Franck D., Hameyer K. Design of an electrical motor with wide speed range for the in-wheel drive in a heavy duty off-road vehicle // Proceedings - 2014 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014. - 2014. - С. 1-7.

117. El Hadraoui H., Zegrari M., Chebak A., Laayati O., Guennouni N. A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles // World Electric Vehicle Journal. - 2022. - №13. - С. 1-28.

118. Schalkwyk D.J., Kamper M.J. Effect of Hub Motor Mass on Stability and

Comfort of Electric Vehicles // Vehicle Power and Propulsion Conference. - 2006. - С. 1-6.

119. Yang X., Song H., Shen, Y., Liu Y. Study on adverse effect suppression of hub motor driven vehicles with inertial suspensions // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. - 2021. - №236. - С. 1-13.

120. Еременко Ю.И., Еременко А.Ю., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. К вопросу реализации схемы управления с подстройкой параметров ПИД-регулятора при помощи нейронной сети // Управление большими системами. Материалы VIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. - 2011. - С. 65-69.

121. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // В записную книжку инженера. - 2006. - №4. - С. 66-74.

122. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Никольса: метод. указания к выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлениям 210100 «Электроника и наноэлектроника» и 201000 «Биотехнические системы и технологии» / сост. О.С. Вадутов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 10 с.

123. А.В. Кириллов, Д.П. Степанюк, Н.Д. Яснев Электрический привод. Курс лекций [Электронный ресурс] // Уральский федеральный университет URL: [https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13509/1/Kirillov\\_Stepanyuk\\_Yasenev.pdf](https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13509/1/Kirillov_Stepanyuk_Yasenev.pdf) (дата обращения: 07.06.2023).

124. В.А, Соловьев, Е.Н. Землянская Системы управления электроприводами [Электронный ресурс] // Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет URL: [https://knastu.ru/media/files/page\\_files/page\\_421/posobiya\\_2015/\\_Sistemy\\_upravleniya\\_elektroprivodami.pdf](https://knastu.ru/media/files/page_files/page_421/posobiya_2015/_Sistemy_upravleniya_elektroprivodami.pdf) (дата обращения: 07.06.2023).

125. С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин Электрический привод [Электронный ресурс] // Томский политехнический университет URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KSI/teach\\_ways/Tab/PowerDrive.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KSI/teach_ways/Tab/PowerDrive.pdf) (дата

обращения: 07.06.2023).

126. Т. Б. Давыдова, О. В. Обидина Электропривод и автоматизация промышленных установок. - Могилев: Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет», 2014. - 44 с.

127. Феофилов Д.С. Сравнительный анализ качества процессов управления для нейросетевых и классических регуляторов // Известия ТулГУ. Технические науки.. - 2021. - №68-72. - С. 11.

128. Цвенгер И.Г., Низамов И.Р. Применение нейросетевых регуляторов в системах управления электроприводами // Вестник технологического университета. - 2017. - №8. - С. 111-114.

129. Терехов В.А. Тюкин И.Ю. Ефимов Д.Б. Нейросетевые системы управления: Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности «Управление и информатика в технических ВУЗах»/ - М.: Высшая школа, 2002.- 183 с.: ил.

130. Ayodele T. Types of Machine Learning Algorithms // New Advances in Machine Learning. - 2010. - С. 19-35.

131. Herbrich R., Graepel T. Machine Learning: An Algorithmic Perspective, Second Edition. - 2-е изд. - Boca Raton: CRC Press, 2015. - 457 с.

132. Alhanjouri M. Speed Control of DC Motor using Artificial Neural Network // International Journal of Science and Research (IJSR). - 2017. - №7. - С. 2140 - 2148.

133. Glushchenko A. I., Petrov V. A. On Comparative Evaluation of Effectiveness of Neural Network and Fuzzy Logic Based Adjusters of Speed Controller for Rolling Mill Drive // XX International Conference on Neuroinformatics. - 2018. - С. 144–150.

134. Гизатуллин Ф.А., Каримов В.И. Экспериментальные исследования интеллектуальных систем регулирования частоты выходного напряжения синхронного генератора в составе электромашинного преобразователя // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - №2. - С. 244.

135. Glushchenko A. I. Neural tuner development method to adjust PI-controller parameters on-line // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical

and Electronic Engineering (EIconRus). - 2017. - С. 849-854.

136. Nepomnyashchiy O., Kazakov F., Ostroverkhov D., Tarasov A., Sirotinina N. A neural regulator for efficient control of electric vehicle motors // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. - 2018. - №7. - С. 1-8.

137. Длиннее некуда: самые большие автобусы мира, конструкция которых вызывает массу вопросов. Часть 1 // Грузспец-авто URL: <https://gto-avto.ru/gruzovik/ves-avtobusa.html> (дата обращения: 07.06.2023).

138. Акт министерств и ведомств "Приказ об утверждении правил по охране труда при эксплуатации промышленного транспорта" от 18 ноября 2020 г. № N 814н // Официальный интернет-портал правовой информации. - 2020

139. Baure G. Synthetic vs. Real Driving Cycles: A Comparison of Electric Vehicle Battery Degradation / G. Baure, M. Dubarry // Batteries. — 2019. — № 5 (2). — С.1-15.

140. Panchal, S., Mcgrory, J., & Kong, J. (2017). Cycling degradation testing and analysis of a LiFePO<sub>4</sub> battery at actual conditions. International Journal of Energy Research, 41, 1-11.

141. Chacko S. Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles / S. Chacko, Y. Chung // Journal of Power Sources. — 2012. — № 213 (1). — С.296-303.

142. Lawder, M.T., Northrop, P.W., & Subramanian, V.R. (2014). Model-Based SEI Layer Growth and Capacity Fade Analysis for EV and PHEV Batteries and Drive Cycles. Journal of The Electrochemical Society, 161, 2098-2108.

143. Dedov S. Calculation of Hybrid Bus Power Demands by Standard Driving Cycles / S. Dedov, M. Yaroslavtsev, X. Wu // 19th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2018. — Harbin, China, 2018. — С.1-4.

144. Jafari M. Simulation and Analysis of the Effect of Real-World Driving Styles in an EV Battery Performance and Aging / M. Jafari, A. Gauchia, K. Zhang // IEEE transactions on transportation electrification. — 2015. — № 1 (4). — С.391-401.

145. Aging of high power Li-ion cells during real use of electric vehicles / N. Rizoug, S. Redha, T. Mesbah, P. Bartholomeus // IET Electrical Systems in

Transportation. — 2017. — № 7 (1). — С.14-22.

146. Vehicle and Fuel Emissions Testing [Электронный ресурс] // United States Environmental Protection Agency URL: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules> (дата обращения: 07.06.2023).

147. NALTEC. Home page [Электронный ресурс] // National Agency for Automobile and Land Transport Technology URL: <https://www.naltec.go.jp/english/index.html> (дата обращения: 07.06.2023).

148. Регламент "Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information" от 1 июля 2017 г. № 2017/1151 // European Union. - 2017

149. Регламент "Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information" от 20 июня 2007 г. № 715/2007 // European Union. - 2007

150. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 “О безопасности колесных транспортных средств”, Проспект - Москва, 2011. - 856 с.

151. Дедов С. И. Повышение энергоэффективности силовой гибридной установки автономного транспортного средства: дис. канд. техн. наук: 05.09.03. - Новосибирск, 2022. - 121 с.

152. Конструкция и расчёт электрического оборудования электроподвижного состава: учебник / В.В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 328 с.: ил. (Серия «Учебники НГТУ»).

153. Аносов В.Н., Кавешников В.М., Ярославцев М.В. Повышение эффективности функционирования тягового электропривода троллейбуса // Электротехника. - 2014. - №12. - С. 14-16.

154. Капаца Е. Тест Дики-Фуллера (ADF) // Машинное обучение доступным языком URL: <https://www.helenkapatsa.ru/tiest-diki-fulliera/> (дата обращения: 07.06.2023).

155. Stable Stationarity and detrending (ADF/KPSS) // statsmodels 0.14.0 URL:

[https://www.statsmodels.org/stable/examples/notebooks/generated/stationarity\\_detrending\\_adf\\_kpss.html#ADF-test](https://www.statsmodels.org/stable/examples/notebooks/generated/stationarity_detrending_adf_kpss.html#ADF-test) (дата обращения: 07.06.2023).

156. How to Check if Time Series Data is Stationary with Python? [Электронный ресурс] // Geeks for geeks URL: <https://www.geeksforgeeks.org/how-to-check-if-time-series-data-is-stationary-with-python/> (дата обращения: 07.06.2023).

157. Yıldırım M., Polat M., Kurum H. A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC 2014. - 2014. - С. 218-223.

158. El Hadraoui H., Zegrari M., Chebak A., Laayati O., Guennouni N. A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles // World Electric Vehicle Journal. - 2022. - №13. - С. 1-28.

159. Sonali V., Tushar T., Pawan T., Amit S. Design and Development of Hybrid Electrical Vehicle Using BLDC Motor // International Journal of Recent Research and Review. - 2020. - №8. - С. 13-20.

160. Lin Q., Zheng Q., Miao S., Li Y., Zhao R. Comparison of PMSM and BLDC Applications in Servo System // Proceedings of the International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering (ICFPMCE 2022). - 2022. - С. 67-74.

161. Thakre M., Kumar N. Design, Development, and Simulation Modeling of Hybrid Electric Vehicles Incorporating with BLDC Drive // Planning of Hybrid Renewable Energy Systems, Electric Vehicles and Microgrid. - 2022. - С. 513-551.

162. Калачев Ю. Н. SIMINTECH: МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ. - М.: ДМК Пресс, 2019. - 98 с.

163. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. - 1-е изд. - Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. - 297 с.

164. Феоктистов В. П. Повышение тягово-энергетической эффективности транспортных средств при помощи накопителей энергии / В. П. Феоктистов, М. Павелчик // Транспорт: наука, техника, управление. – 1999. – № 12. – С. 21–26.

165. Аносов В.Н. Моделирование режимов работы тягового привода троллейбуса с емкостным накопителем энергии /В.Н. Аносов, Е.А. Спиридонов,

А.А. Штанг // Электротехника.- 2011.- №6.- С. 10-13.

166. Аносов В.Н. Анализ изменения разрядной емкости тяговой аккумуляторной батареи / В.Н. Аносов, В.М. Кавешников, А.В. Орёл // Транспорт: наука, техника, управление.- 2008.- №6.- С. 33-36

167. Е.О. Орел, В.Н. Аносов Расчёт параметров тягового электродвигателя и буферного накопителя энергии автономного транспортного средства на основе заданного цикла движения, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023616536 от 29.03.2023 г. [Электронный ресурс] // Федеральный институт промышленной собственности URL: <https://fips.ru/EGD/d82ef078-9e7f-4a15-84b4-bfd06376c382> (дата обращения: 28.05.2023).

168. Beliakov A. I. Application of Ultracapacitors as Traction Energy Sources / A. I. Beliakov, A. M. Brintsev // The 7 International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, Deerfield Beach, Florida, USA, 8–10 dec. 1997. – Deerfield Beach, 1997. – P. 742–749.

169. Аносов В. Н. Математическое описание источника питания для бесконтактного подвода энергии как элемента системы управления = Mathematical description of a power supply source for contactless energy supply as a control system element / В. Н. Аносов, В. М. Кавешников, Е. О. Орел // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2018. – № 4 (41). – С. 44–51. - DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-44-51.

170. Uhlemeyer A. Project planning for systems with contact less energy and data transmission [Electronic resource] / A. Uhlemeyer // [Materials of seminars of Drive Academy, SEW Eurodrive, Bruchsal, Germany, 3–7 dec. 2007]. – 1 electron-optical disk (CD–ROM, 2007).

171. Мани Л. Транспорт, энергетика и будущее : пер. с англ. / Л. Мани. – М.: Мир. – 160 с.

172. Орел Е. О. Источник питания для индуктивного подвода энергии как элемент системы управления / Е. О. Орел, В. М. Кавешников // Интеллектуальный потенциал Сибири (РНСК) : сб. науч. тр. 26 регион. науч. студ. конф., Новосибирск,

22–24 мая 2018 г. : в 2 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 638-639. - 35 экз. - ISBN 978-5-7782-3563-2, ISBN 978-5-7782-3565-6.

173. Аносов В. Н., Орел Е. О., Саидов С. А., Ярославцев М. В. Расчет оценки мощности тягового электропривода с помощью искусственных нейронных сетей // Научно-технический журнал «Электропитание». - 2019. - №4. - С. 42-50.

174. Орел Е. О. Система тягового электропривода транспортного средства с индуктивным подводом энергии / Е. О. Орел ; науч. рук. В. М. Кавешников // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 10 ч., Новосибирск, 4–8 дек. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 5. – С. 157-161. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3418-5, ISBN 978-5-7782-3423-9 (ч. 5).

175. Байков А.И. Математические модели трансформаторов при анализе силовой части электроприводов/ А.И. Байков / Труды Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №5 (102). – С. 316-327.

176. Немцов М.В. Электротехника и электроника/М.В. Немцов, М.Л. Немцова. – М.: Академия, 2007. – 424 с.

177. Герасимов В.А. Исследование режимов работы системы энергообеспечения автономного подводного аппарата с бесконтактной передачей энергии/ В.А. Герасимов, Г.Е. Кувшинов, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин// Подводные исследования и робототехника. – 2013. – №2 (16).– С. 24-32.

178. Кружаев А.В., Елагин И.А., Павлейно М.А., Дмитриев В.А., Чалый А.М. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование переходных процессов в однофазном трансформаторе напряжения // Журнал технической физики, 2015, том 85, вып. 2, С. 31-38.

179. Котенев С., Евсеев А. Переходные процессы при включении трансформатора в сеть с синусоидальным напряжением // Силовая электроника, 2005, № 4, С. 34-37.

180. Лурье А.И. Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание // Электротехника, 2008, № 2, С. 2-18.

181. Solve Nonstiff Differential Equations – Medium Order Method – MATLAB ode45 [Электронный ресурс] // The MathWorks, Inc. : Accelerating the pace of

engineering and science, URL : <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html> (дата обращения: 21.10.2022).

182. MATLAB & Simulink [Электронный ресурс] // The MathWorks, Inc. : Accelerating the pace of engineering and science, URL : <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения: 21.10.2022).

183. Transformer with non-ideal core [Электронный ресурс] // The MathWorks, Inc. : Accelerating the pace of engineering and science, URL : [https://www.mathworks.com/help/sps/ref/nonlineartransformer.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://www.mathworks.com/help/sps/ref/nonlineartransformer.html?s_tid=doc_ta) (дата обращения: 21.10.2022).

184. Best Practices for Simulating with the daessc Solver [Электронный ресурс] // The MathWorks, Inc. : Accelerating the pace of engineering and science, URL : <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/best-practices-for-using-the-daessc-solver.html> (дата обращения: 21.10.2022).

185. Расчёт индуктивности. Часть 3 [Электронный ресурс] // Home Electronics : Обучающие статьи по электронике, URL : <https://www.electronicblog.ru/nachinayushhim/raschyot-induktivnosti-chast-3.html> (дата обращения: 21.10.2022).

186. Основная кривая намагничивания. Сталь марки 2212 [Электронный ресурс] // Студопедия.нет : Информационный студенческий ресурс, URL : [https://studopedia.net/3\\_34617\\_osnovnaya-krivaya-namagnichivaniya-stal-marki-.html](https://studopedia.net/3_34617_osnovnaya-krivaya-namagnichivaniya-stal-marki-.html) (дата обращения: 21.10.2022).

187. В.Н. Аносов, В.М. Кавешников, Е.О. Орел Структурное и имитационное моделирование источника питания как элемента системы управления // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – №9. – С. 448-453.

188. Аносов В. Н., Орел Е. О., Саидов С. А., Ярославцев М. В. Расчет оценки мощности тягового электропривода с помощью искусственных нейронных сетей // Научно-технический журнал «Электропитание». - 2019. - №4. - С. 42-50.

189. What Is Reinforcement Learning? 3 things you need to know // MATLAB URL: <https://www.mathworks.com/discovery/reinforcement-learning.html> (дата обращения: 07.06.2023).

190. S. Guha Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG): Theory and Implementation [Электронный ресурс] // Towards Data Science URL: <https://towardsdatascience.com/deep-deterministic-policy-gradient-ddpg-theory-and-implementation-747a3010e82f> (дата обращения: 07.06.2023).

191. S. Fujimoto, H. van Hoof, D. Meger Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods // arXiv:1802.09477 [cs.AI]. - 2018.

192. Аносов В.Н., Орел Е.О. Разработка энергоэффективного нейрорегулятора момента тягового электропривода методом обучения с подкреплением // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – №5. – С. 212-216.

193. Аносов В. Н., Орел Е. О., Попов Н.С. Способы обеспечения безопасности движения автономного электрического транспортного средства // Вопросы электротехнологии: науч.-техн. журн.. - 2021. - №4 (33). - С. 65-73.

194. K. Yousif, A. Bab-Nadiashar, and R. Hoseinnezhad An overview to visual odometry and visual slam: Applications to mobile robotics // Intelligent Industrial Systems. - 2015. - №1 (11)

195. S. Du, W. Sun, and Y. Gao An investigation on mems imu error mitigation using rotation modulation technique // 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS . - 2014. - №3. - С. 1822–1838.

196. Oriolo G., Ulivi G., Vendittelli M. Real-time map building and navigation for autonomous robots in unknown environments // Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions. - 1998. - №28. - С. 316 - 333.

197. WGS 84 [Электронный ресурс] // Wikipedia URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/WGS\\_84](https://ru.wikipedia.org/wiki/WGS_84) (дата обращения: 07.06.2023).

198. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения [Электронный ресурс] // Прикладной потребительский центр Госкорпорации "Роскосмос" URL: <https://glonass-iac.ru/> (дата обращения: 07.06.2023).

199. F. Fabrizio and A. De Luca Real-Time Computation Of Distance To Dynamic Obstacles With Multiple Depth Sensors // IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION

LETTERS. - 2017. - №1 (2)

200. M. O. A. Aqel, M. H. Marhaban, M. I. Saripan, and N. B. Ismail Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications // SpringerPlus. - 2016. - №1 (5). - C. 1897.

201. J. Horn and G. Schmidt Continuous localization of a mobile robot based on 3d-laser-range-data, predicted sensor images, and dead-reckoning // Robotics and Autonomous Systems. - 1995. - №2 (14). - C. 99 – 118.

202. S.A.S. Mohamed, M.-H. Haghbayan, T. Westerlund, J. Heikkonen, H. Tenhunen, J. Plosila A Survey on Odometry for Autonomous Navigation Systems // IEEE Access. - 2019

203. R. Gonzalez, F. Rodriguez, J. L. Guzman, C. Pradalier, and R. Siegwart Control of off-road mobile robots using visual odometry and slip compensation // Advanced Robotics. - 2013. - №11 (27). - C. 893–906.

204. B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo Robotics: Modelling, Planning and Control (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). - 1-е изд. - Springer, 2009. - 656 с.

205. C. Ó'Dúnlaing, M. Sharir, C. Yap Retraction: A new approach to motion-planning // Proceedings of the fifteenth annual ACM symposium on Theory of computing. - 1983. - C. 207-220.

206. A. Abbadì, V. Prenosil Safe path planning using cell decomposition approximation // 2015

207. Burchan, O., Jyh-ming, B., Nancy, L., Amato, N. Probabilistic Roadmap Motion Planning for Deformable Objects // 2002

208. Adiyatov O., Varol, A. Rapidly-exploring random tree based memory efficient motion planning // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. - 2013

209. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения [Электронный ресурс] // Труды ИСП РАН. 2016. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennyh-metodov-planirovaniya-dvizheniya> (дата обращения: 30.03.2021).

210. Современная теория управления [Текст] / Пер. в англ. Я. Н. Гибадулина; Под ред. В. В. Солодовникова. – Москва: Машиностроение, 1971. - 472 с.

211. В.Н. Карнаухов, В.И. Кобер, М.Г. Мозеров, Л.В. Зимина Динамическое программирование на многомерной решетке и быстрый алгоритм поиска минимума энергии в задачах стерео и оптического потока // Информационные процессы. - 2021. - №1 (21). - С. 1-19.

212. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления (перевод с английского Ройтенберг Е.Я.). - 1-е изд. - М.: Издательство "Наука", 1969. - 120 с.

213. V.N. Anosov, E.O. Orel, N.S. Popov Methods of ensuring motion safety of autonomous electric vehicle // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – №281.

214. Mejia-Trujillo, J., Castano-Pino, Y., Navarro, A., Arango-Paredes, J., Rincon, D., Valderrama, J., Munoz-Ospina, B., Orozco, J. Kinect™ and Intel RealSense™ D435 comparison: a preliminary study for motion analysis // IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom). - 2019. - С. 1-4.

215. Bayer, J., Faigl, J. On Autonomous Spatial Exploration with Small Hexapod Walking Robot using Tracking Camera Intel RealSense T265 // European Conference on Mobile Robots (ECMR). - 2019. - С. 1-6.

216. Tsykunov, E., Ilin, V., Perminov, S., Fedoseev, A., Zainulina, E. Coupling of localization and depth data for mapping using Intel RealSense T265 and D435i cameras // arXiv:2004.00269v1 [cs.RO]. - 2020

217. Jetson AGX Xavier [Электронный ресурс] // NVIDIA URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/> (дата обращения: 07.06.2023).

218. Ubuntu 18.04.5 LTS (Bionic Beaver) [Электронный ресурс] // Ubuntu Releases Releases. Ubuntu 18.04.5 LTS (Bionic Beaver) URL: <https://releases.ubuntu.com/18.04/> (дата обращения: 13.05.2021).

219. ROS Melodic Morenia [Электронный ресурс] // ROS.org Documentation URL: <http://wiki.ros.org/melodic> (дата обращения: 07.06.2023).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А Алгоритм обучения с подкреплением TD3

**Algorithm 1** TD3

---

Initialize critic networks  $Q_{\theta_1}, Q_{\theta_2}$ , and actor network  $\pi_\phi$  with random parameters  $\theta_1, \theta_2, \phi$   
Initialize target networks  $\theta'_1 \leftarrow \theta_1, \theta'_2 \leftarrow \theta_2, \phi' \leftarrow \phi$   
Initialize replay buffer  $\mathcal{B}$   
**for**  $t = 1$  **to**  $T$  **do**  
    Select action with exploration noise  $a \sim \pi_\phi(s) + \epsilon$ ,  
     $\epsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$  and observe reward  $r$  and new state  $s'$   
    Store transition tuple  $(s, a, r, s')$  in  $\mathcal{B}$   
  
    Sample mini-batch of  $N$  transitions  $(s, a, r, s')$  from  $\mathcal{B}$   
     $\bar{a} \leftarrow \pi_{\phi'}(s') + \epsilon$ ,  $\epsilon \sim \text{clip}(\mathcal{N}(0, \bar{\sigma}), -c, c)$   
     $y \leftarrow r + \gamma \min_{i=1,2} Q_{\theta'_i}(s', \bar{a})$   
    Update critics  $\theta_i \leftarrow \text{argmin}_{\theta_i} N^{-1} \sum (y - Q_{\theta_i}(s, a))^2$   
    **if**  $t \bmod d$  **then**  
        Update  $\phi$  by the deterministic policy gradient:  
         $\nabla_\phi J(\phi) = N^{-1} \sum \nabla_a Q_{\theta_1}(s, a)|_{a=\pi_\phi(s)} \nabla_\phi \pi_\phi(s)$   
        Update target networks:  
         $\theta'_i \leftarrow \tau \theta_i + (1 - \tau) \theta'_i$   
         $\phi' \leftarrow \tau \phi + (1 - \tau) \phi'$   
    **end if**  
**end for**

---

Рисунок А.1 – Псевдокод алгоритма TD3

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технические характеристики камер Intel Realsense d435i

Таблица Б.2 – Технические характеристики камер Intel Realsense d435i

<b>Features</b>	<p><b>Use Environment:</b> Indoor/Outdoor</p>
	<p><b>Image Sensor Technology:</b> Global Shutter, <math>3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}</math> pixel size</p>
	<p><b>Maximum Range:</b> Approx. 10 meters. Accuracy varies depending on calibration, scene, and lighting condition.</p>
<b>Depth</b>	<p><b>Depth Technology:</b> Active IR Stereo</p>
	<p><b>Minimum Depth Distance (Min-Z):</b> 0.105 m</p>
	<p><b>Depth Field of View (FOV):</b> <math>86^\circ \times 57^\circ (\pm 3^\circ)</math></p>
	<p><b>Depth Output Resolution:</b> Up to <math>1280 \times 720</math></p>
	<p><b>Depth Frame Rate:</b> Up to 90 fps</p>
<b>RGB</b>	<p><b>RGB Sensor Resolution:</b> <math>1920 \times 1080</math></p>
	<p><b>RGB Frame Rate:</b> 30 fps</p>
<b>Major Components</b>	<p><b>RGB Sensor FOV (H <math>\times</math> V <math>\times</math> D):</b> <math>69.4^\circ \times 42.5^\circ \times 77^\circ (\pm 3^\circ)</math></p>

<b>Major Components</b>	<p><b>Camera Module:</b> Intel RealSense Module D430 + RGB Camera</p>
	<p><b>Vision Processor Board:</b> Intel RealSense Vision Processor D4</p>
<b>Physical</b>	<p><b>Form Factor:</b> Camera Peripheral</p>
	<p><b>Length × Depth × Height:</b> 90 mm × 25 mm × 25 mm</p>
	<p><b>Connectors:</b> USB-C* 3.1 Gen 1*</p>
	<p><b>Mounting Mechanism:</b> – One 1/4-20 UNC thread mounting point. – Two M3 thread mounting points.</p>

Ключевые особенности 3D-камер глубины Intel Realsense d435i:

1. Мощный процессор видеобработки поддерживает установку в камерах до пяти каналов последовательного интерфейса MIPI 2 для обработки трехмерных изображений в реальном времени и ускорения вывода данных;
2. Набор видеодатчиков, позволяющий идентифицировать различия изображений с разрешениями до 1280 x 720 точек;
3. Поддержка нового кроссплатформенного комплекта Intel RealSense SDK 2.0 с открытым исходным кодом;
4. Специализированный процессор для сигналов цветного изображения, настройки изображений и масштабирования цветových данных;
5. Активный инфракрасный проектор для освещения объектов и улучшения трехмерных данных;
6. С помощью скручивающегося затвора и узкого угла обзора камера Intel

RealSense D435 создает изображение с высокой глубиной резкости, когда размер снимаемого объекта является небольшим и требует достаточно точных измерений;

7. 3D-камера Intel RealSense D435 обеспечивает качественное трехмерное восприятие данных, находясь в движении, или для движущихся объектов, создавая широкий обзор и исключая появление слепых зон.

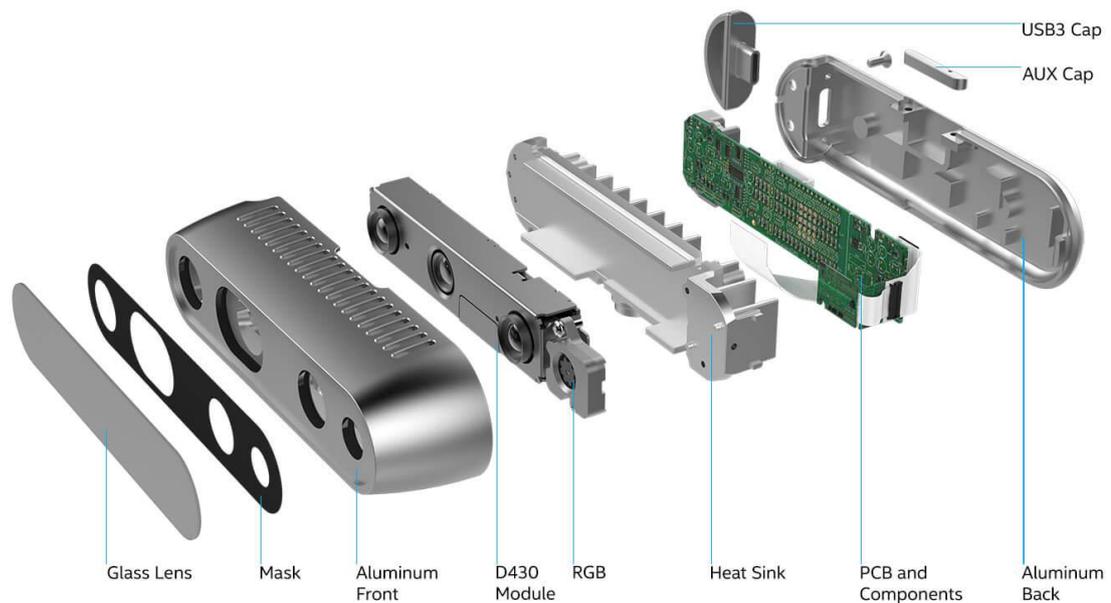


Рисунок Б.1 – Разложение камеры Intel RealSense d435i на компоненты

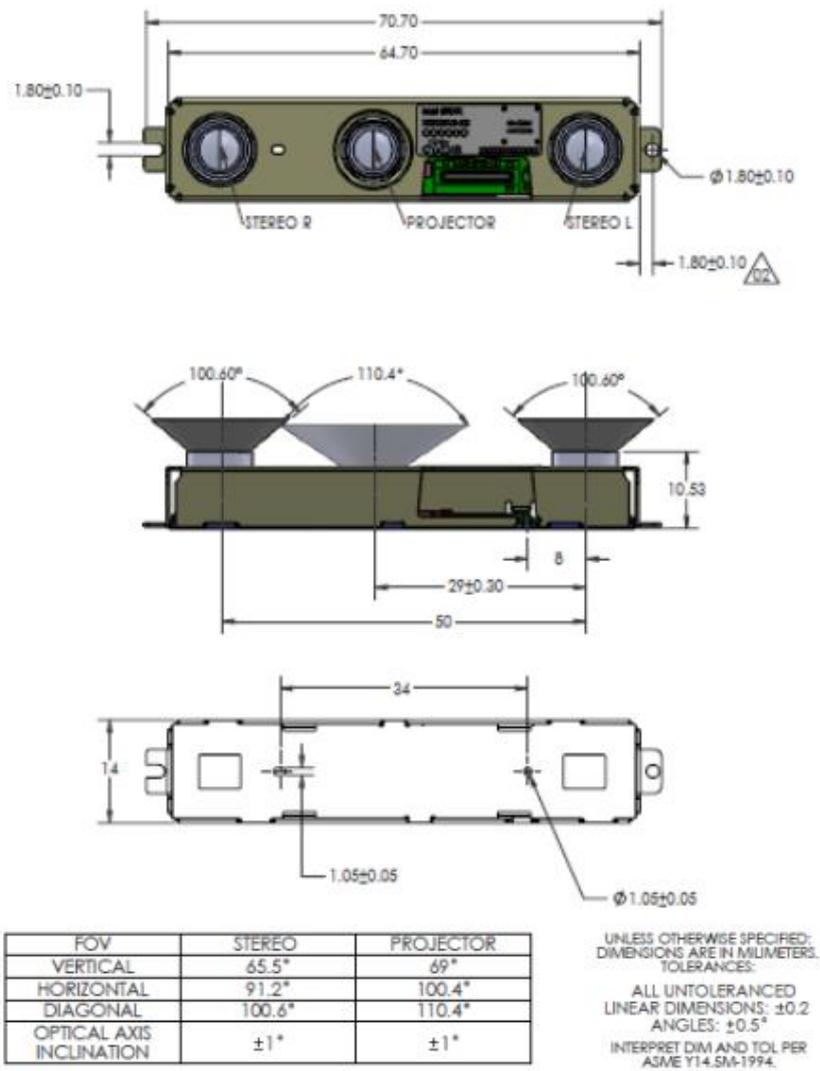


Рисунок Б.2 – Механическое описание модуля глубины Intel RealSense D430

**ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации  
программы для ЭВМ**

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2023616536**

**«Расчёт параметров тягового электродвигателя и  
буферного накопителя энергии автономного  
транспортного средства на основе заданного цикла  
движения»**

Правообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(RU)**

Авторы: **Орел Егор Олегович (RU), Аносов Владимир  
Николаевич (RU)**

Заявка № **2023615698**  
Дата поступления **29 марта 2023 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **29 марта 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Информационный центр по правовой поддержке  
Сторонки: 60e00270-14-202094e6b2445db1  
Инициалы: Ю.С. Зубов  
Датаслужбы: 02.03.2023

**Ю.С. Зубов**