

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехнических комплексов
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Щуров Н.И.
(фамилия, имя, отчество)

(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ
НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ**

студенту Латышеву Роману Николаевичу
(фамилия, имя, отчество)

факультета мехатроники и автоматизации
(полное название факультета)

Направление подготовки 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
(код и наименование направления подготовки магистра)

Магистерская программа Повышение энергоэффективности систем
электрического транспорта
(наименование магистерской программы)

Тема Исследование энергетической эффективности системы магнитного
подвешивания для транспорта
(полное название темы)

Цели работы заключается в уменьшении энергозатрат путем получения новых
знаний о процессе энергопотребления и его оптимизации параметров в системе
электромагнитного подвешивания.

Задание согласовано и принято к исполнению.

Руководитель
от НГТУ

Ярославцев М.В.

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н.

(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

Студент

Латышев Р.Н.

(фамилия, имя, отчество)

ФМА, ЭММ-83

(факультет, группа)

(подпись, дата)

Тема утверждена приказом по НГТУ № 4914/2 от «04» октября 2018г.

изменена приказом по НГТУ № _____ от «__» _____ 201_г.

Диссертация сдана в ГЭК № _____, тема сверена с данными приказа

(подпись секретаря государственной экзаменационной комиссии по защите ВКР, дата)

(фамилия, имя, отчество секретаря государственной
экзаменационной комиссии по защите ВКР)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа магистра, 75 стр., 42 илл., 10 табл., 36 источн.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОДВЕС, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, МАГЛЕВ, TRANSRAPID, SIMULINK, ПИД-РЕГУЛЯТОР, ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР.

Объектом исследования является система электромагнитного подвеса на подвижном составе.

Предметом исследования является оптимизация энергопотребления электромагнитного подвеса.

Целью работы является уменьшение энергозатрат путем получения новых знаний о процессе энергопотребления и его оптимизации параметров в системе электромагнитного подвешивания.

В выпускной квалификационной работе проведен анализ существующих магнитных подвесов, а также проведен обзор статей, в ходе которого были выявлены основные проблемы разработки электромагнитного подвеса.

В разделе моделирования представлена система электромагнитного подвеса. Модель выполнена в среде MATLAB Simulink, а также на основании данных предварительного расчета собрана экспериментальная физическая модель. Сняты энергетические характеристики данной системы.

В программе Femm выполнена оптимизация геометрических размеров электромагнита, произведен расчет угла наклона поворота путевой структуры и проведена проверка результатов моделирования.

ABSTRACT

Graduation qualification work 75 pages, 42 figures, 20 tables, 36 sources.

ELECTROMAGNETIC SUSPENSION, CONTROL SYSTEM, MAGLEV, TRANSRAPID, SIMULINK, PID-CONTROLLER, AIR GAP.

The object of study is the system of electromagnetic suspension on maglev train.

The subject of study is optimization of energy consumption of an electromagnetic suspension.

The purpose of this dissertation study is to reduce energy consumption by obtaining new knowledge about the process of energy consumption and optimization parameters in the electromagnetic suspension system.

In the dissertation study the analysis of existing magnetic suspensions is carried out. A review of articles was conducted, as a result, the main problems of developing an electromagnetic suspension were identified.

In the modeling section presents an electromagnetic suspension system. The model is made in the MATLAB Simulink. Based on the preliminary calculation data, an experimental physical model is compiled. The energy characteristics of this system have been removed.

The Femm program optimizes the geometric dimensions of the electromagnet. The calculation of the angle of rotation of the track structure is performed. The simulation results were checked.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИЗ ТИПОВ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА	10
1.1 Актуальность применения магнитного подвеса на поездах	10
1.2 Конструкции магнитного подвеса	12
1.3 Реализация поездов на магнитном подвесе	20
1.4 Анализ основных проблем	25
1.5 Выводы	34
2 МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТА НА ПОЕЗДЕ.....	35
2.1 Расчеты электромагнита поезда маглев	37
2.2 Расчеты экспериментальной физической модели электромагнита.....	40
2.3 Выводы	43
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	44
3.1 Имитационная модель в MatLab Simulink	44
3.2 Физическая модель системы электромагнитного подвеса поезда	50
3.3 Выводы	61
4 ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА ДЛЯ РЕАЛЬНОГО ПОЕЗДА.....	62
4.1 Угол наклона путевой структуры	63
4.2 Выводы	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	68
ПРИЛОЖЕНИЕ А	73

ВВЕДЕНИЕ

Маглев (означает магнитный + левитация) - это метод движения, который использует для компенсации вертикальных сил нагрузки транспортных средств магнитную левитацию и для движения использует линейный двигатель, а не колеса, оси вращения и подшипники. Транспорт на магнитном подвесе имеет преимущества безопасности, комфорта, низкого уровня шума, малого радиуса поворота и способности преодолевать большой уклон профиля пути. В целом поезда на магнитной подвеске движутся плавно и тихо, чем колесные транспортные поезда. При очень высоких скоростях обычных колесных поездов износ от трения наряду с ударным эффектом колес на рельсах ускорит износ оборудования. Линия транспорта поездов магнитного подвеса же гораздо дороже в строительстве, но требуют меньшего технического обслуживания и имеют более низкие текущие затраты. Это перспективный способ передвижения людей на железнодорожном транспорте, которому в последние годы уделяется большое внимание. Такие страны, как Германия, Япония, Китай, Южная Корея и Америка, провели исследования в области технологии магнитного поля, и все они добились большого прогресса.

Успешное создание поездов на электромагнитном подвесе стало возможным благодаря прогрессу в области силовой и управляющей электроники, достигнутому в последние десятилетия. Реализация эффективных систем управления подвесными электромагнитными и линейными тяговыми двигателями требует применения быстродействующих силовых полупроводниковых ключей, а также высокопроизводительных вычислительных систем на основе микроконтроллеров.

Проектирование систем электромагнитного подвешивания является одной из основных проблем при создании новых моделей транспорта. Оно требует решения, как стандартных задач расчета электромагнитов, так и задачи разработки системы управления. К системе электромагнитного подвешивания предъявляется ряд противоречивых требований. Электромагнит должен обладать по возможности малым весом, что требует уменьшения се-

чения магнитопровода, и в то же время малым энергопотреблением, что требует снижения удельной магнитной индукции. Рабочий воздушный зазор должен быть достаточно большим, чтобы гарантировать безопасность движения и обеспечивать достаточно большое время реакции системы управления, но как можно меньшим, чтобы сократить потребление энергии. Подвесной электромагнит должен создавать постоянную силу тяги в широком диапазоне зазоров. Для упрощения регулирования необходимо, чтобы электромагнит обладал достаточно малой индуктивностью. В то же время, для сокращения энергопотребления подвесного магнита желательно увеличить число его витков.

Для решения задачи определения наиболее эффективных геометрических и электромагнитных характеристик системы подвеса, а также для разработки алгоритма управления ей необходимо применение математического моделирования подобных систем.

Цель работы заключается в уменьшении энергозатрат путем получения новых знаний о процессе энергопотребления и его оптимизации параметров в системе электромагнитного подвешивания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить существующие виды систем магнитного подвеса и выбрать оптимальную конструкцию для городского транспорта;
2. Разработать методику предварительный расчет для системы электромагнитного подвеса реального подвижного состава и физической его модели;
3. С помощью модели в программе MatLab Simulink определить наилучшие параметры электромагнита и алгоритма управления на основе математической модели системы при изменении размеров магнитопровода и потребляемой энергии;
4. На экспериментальной физической модели проверить методику предварительного расчета потребляемого электромагнитом тока и его удель-

ной мощности в различных условиях. Проверить систему управления воздушным зазором между направляющим рельсом и электромагнитом, составленную в программе MathLAB Simulink. Проверить в программе Femm данные, полученные с физической модели системы электромагнитного подвеса

5. Определить наибольшую подъемную силу электромагнита при сравнении его различных геометрических размеров; рассчитать скорость прохождения поворотов транспорта на электромагнитном подвесе при различных радиусах поворота.

Объектом исследования магистерской диссертации является система электромагнитного подвеса на подвижном составе, предметом – оптимизация энергопотребления магнитного подвеса.

1 АНАЛИЗ ТИПОВ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

1.1 Актуальность применения магнитного подвеса на поездах

На сегодняшний день в таких развитых странах, как Япония, Китай, Германия, Южная Корея и другие, активно исследуются перспективно новые типы высокоскоростных транспортных систем, одним из многих, является система на магнитном подвесе. В этих странах, на данный момент, уже созданы экспериментальные трассы, например, в Китае и Южной Корее имеются эксплуатируемые трассы от 1 до 30 км для поездов на магнитном подвесе. Лидирующими проектами в создании и эксплуатации поездов на данной системе являются Transrapid (Германия) и Maglev (Япония).

До 2007 года считалось, что при скоростях движения свыше 300 км/ч колёса поезда теряют сцепление с рельсами. Поэтому необходимо было искать альтернативную замену колесным парам. Так начали исследовать и внедрять системы на магнитном подвесе. В 2007 году французские ученые все же доказали обратное, создав скоростной рельсовый поезд TGV, который разогнали до отметки в 574,8 км/ч. Но технология магнитного подвеса уже была в активной разработке. Так, например, в Японии был установлен в 2003 году в ходе испытаний технологии JR-Maglev рекорд скорости в 581 км/ч.

Одной из важнейших особенностей маглева – его безопасность. Конструкция поезда устроена таким образом, что подвижной состав обхватывает путевую структуру. Это полностью исключает вероятность схода состава с рельса.

В начале XX века учеными было запатентовано большое количество разработок в технологии маглева. В 1902 году немецкий ученый из Германии Альфрен Зейден, а спустя четыре года Франклин Скотт Смит получили патент за разработку конструкции электромагнитной линии, но эта идея не реализовалась. В 1934 впервые был выдан патент на маглев, оснащенного линейными электродвигателями немецкому изобретателю Герману Кемперу. Но к строительству поезда, способного к левитации, не приступили. Лишь в 1971 году в ФРГ создали первый пробный образец магнитоплана –

«Transrapid 02». Он вмещал четырёх человек и набирал скорость 90 км/ч. При его проектировании инженеры пользовались записями изобретателя Кемпера. В 1974 году вышел «Transrapid 04» с улучшенными характеристиками: вместимость - 20 пассажиров-испытателей, максимальная скорость - 250 км/ч. В 1979 году в модели заменили несколько узлов, поменяли конструкцию электродвигателя и построили маглев «Transrapid 05». Он получил официальное разрешение перевозить пассажиров. В 2004 году в Москве был построен первый в мире монорельс с линейным асинхронным двигателем[1].

В 1927 году была выдвинута идея создания подвеса основанного на воздушной подушке. Ее предложил основоположник космонавтики К.Э. Циолковский, но реализация первой неудачной попытки спустя 30 лет была проведена французскими инженерами. Поезд состоял из двух авиационных двигателей для создания воздушной подушки и горизонтальной тяги. При движении по путевой структуре, представляющей собой бетонный желоб, поезд создавал высокий уровень шума. По той же причине не нашли применения тихие газотурбинные двигатели и турбореактивные двигатели, устанавливаемые на локомотивах.

В 1940-х годах произошел переход от теории к практике – британский инженер Эрик Лэйзвейт впервые удачно воссоздал первый прототип линейного асинхронного двигателя, который позволил создать поезд под названием «Tracked Hovercraft». В 1973 году проект пришлось закрыть из-за нехватки средств.

В Советском Союзе к началу 80-х гг. предполагалось связать московские аэропорты Шереметьево и Домодедово. Вагон ТП-05 — первый в СССР вагон на электромагнитной подвеске с линейным электроприводом, построенный в МИК (полигон «ВНИИПИТранспрогресс» г. Раменское) в период с 1985 по 1986 год. Первый успешный пуск (подвешивание) был осуществлен 25 февраля 1986 г. Планировалось пускать по трассам вагоны по 65 человек, 19 метров длиной каждый и весом в 40 тонн. Крейсерская скорость же вагона равнялась 250км/ч, с перспективой 400 км/ч и выше. Также были планы пус-

кать не отдельные вагоны, а сцепки из нескольких вагонов, то есть полноценных поездов[2].

К середине 80-х гг. XX века Германия успешно реализовала программу «Transrapid» и построила экспериментальную трассу с тремя участками, одним линейным и двумя кольцевыми. Были проведены испытания системы безопасности, стрелочные переводы, станционные сооружения и конструкцию путевой структуры, на которой разогнали поезд до 500 км/ч. Для набора поездом скорости 300 км/ч достаточно пяти километров. В компании «Transrapid» полагают, что поезд на магнитной подушке очень скоро сможет стать полноценной альтернативой воздушного транспорта.

Разработали два типа поездов, один двухвагонный для перевозки пассажиров между городом и аэропортом, второй десятивагонный для междугородних перевозок.

В 1984 году в Бирмингеме был введен в эксплуатацию первый коммерческий поезд с использованием электромагнитного подвеса, успешно проработавший до 1995 года. Данный поезд не являлся полноценным маглевом. Так как в конструкции оставили колеса для стабилизации высоты, уменьшив нагрузку на них за счет электромагнитного подвеса. Воздушный зазор между путевой структурой и тяговым линейным асинхронным двигателем составлял 15 мм. Железнодорожная линия, протяженностью 600 м, соединяла терминал международного аэропорта Бирмингема и расположенную рядом железнодорожную станцию[3].

1.2 Конструкции магнитного подвеса

На сегодняшний день в мире используют 3 основных вида конструкции, изображенных на рисунке 1.1, магнитного подвеса вагонов поезда:

- электродинамический подвес (EDS), использует сверхпроводящие магниты,
- электромагнитный подвес (EMS),
- постоянные магниты.

Разновидности левитирующей техники

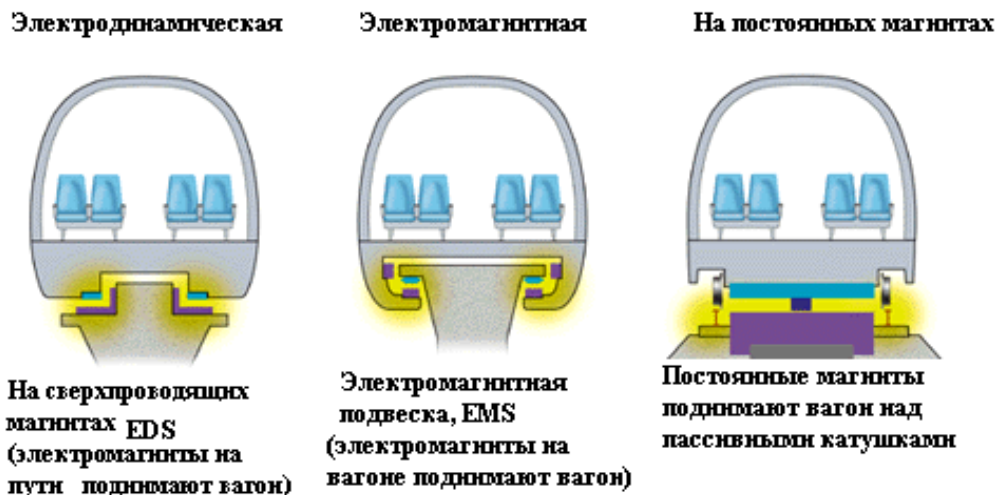


Рисунок 1.1 – Конструкции магнитного подвеса

Электродинамическая система магнитного подвеса. Принцип ее действия, если над полосой или замкнутыми контурами из проводящего ток материала (медь, алюминий) перемещать источник электромагнитного поля, то в полосе (или контурах) наводятся токи индукции. Эти токи образуют свое электромагнитное поле. В результате взаимодействия этого поля с первичным полем, образуется подъемная сила $F_{\text{п}}$, направленная вверх, а также тормозная сила $F_{\text{т}}$, препятствующая движению. С ростом скорости и источника первичного электромагнитного поля растет и подъемная сила, являющаяся силой отталкивания, а тормозная сила, достигая наибольшего значения при скоростях порядка 30-50 км/ч, затем падает.

Обычно на транспортном средстве устанавливают электромагнит (источник поля), а в путевой структуре - проводящую полосу или контуры. Для подъема вагона требуется мощное электромагнитное поле; для его создания применяют электромагниты со сверхпроводящими обмотками (сверхпроводящие магниты). В проектах и построенных экспериментальных вагонах маглева для обмоток сверхпроводящих электромагнитов применяют сплавы некоторых металлов, охлаждаемые до критической температуры менее 10 К (или -263°C). Такое охлаждение можно получить, если обмотку из сверхпроводящего провода опустить в жидкий гелий. Для поддержания таких низких

температур необходима довольно сложная и дорогая система охлаждения (криогенная система) [4].

В последнее время созданы достаточно устойчивые материалы на базе металлокерамики (например, иттриевой керамики), у которых явление сверхпроводимости наступает при температуре 100-110 Кельвин. При такой температуре для охлаждения может быть использован дешевый жидкий азот. Технология получения этого газа проста и хорошо известна. А запасы в атмосфере практически неограниченны. Считают, что сверхпроводящие устройства на базе жидкого азота будут в 100 раз дешевле. Однако есть ряд достаточно сложных для решения технических вопросов при использовании металлокерамики в качестве сверхпроводящего материала для электромагнитов. Например, как из хрупкой керамики сделать проволоку, но можно найти решение: измельчить эту керамику в порошок, а затем создать из нее проволоку или напылять этот порошок, создавая слой (пленку) из сверхпроводящего материала, который вместе с основой помещается в жидкий азот.

В современных разработках маглева на электродинамической системе, воздушный зазор составляет 100-250 мм, что приблизительно в 10 раз больше, чем зазор других систем магнитного подвеса. Этот фактор является основным преимуществом этой системы магнитного подвеса, что особенно важно при высоких скоростях. Затраты на строительство и эксплуатацию путевых устройств такой системы снижаются.

К недостаткам электродинамической системы относятся необходимость применения криогенного оборудования и сверхпроводящих материалов, что значительно удорожает стоимость подвижного состава. При низких скоростях (до 80 км/ч) подъемная сила недостаточна для левитации подвижного состава. Поэтому для разгона и "приземления" на последнем устанавливают колеса. Вагон разгоняется до скорости, при которой образуется достаточное подъемное усилие, и отрывается от путевой структуры.

За реализацию проекта «JR-Maglev» взялись Railway Technical Research Institute и группа компаний Japan Railways. В 2003-м году японский MLX01

установил абсолютный мировой рекорд скорости среди всех типов поездов на испытательной дороге в окрестностях префектуры Яманаси по технологии «JR-Maglev», представленной на рисунке 1.2 [5].



Рисунок 1.2 – Японский маглев «JR-Maglev-MLX01» на трассе в Яманаси

«JR-Maglev» использует электродинамическую подвеску на сверхпроводящих магнитах, установленных как на поезде, так и на трассе. Но между немецким и японским проектами существует важное различие. В системе «JR-Maglev», в отличие от системы «Transrapid», не используется монорельс. Японский состав движется в канале между магнитами, как показано на рисунке 1.3. Помимо этого, на малых скоростях «JR-Maglev» будет применять специальные колеса. Система «Transrapid» этого не предполагает. Как считают японские ученые, такой подход даст «JR-Maglev» ряд преимуществ: простоту эксплуатации, большую максимальную скорость и еще больший уровень безопасности.

Часть электромагнитов в технологии электродинамического подвеса расположены на вагоне, а часть по бокам путевой структуры, как показано на рисунке 1.4.

На рисунке 1.5 изображены толкающая и поднимающая катушки технологии электродинамического подвеса.

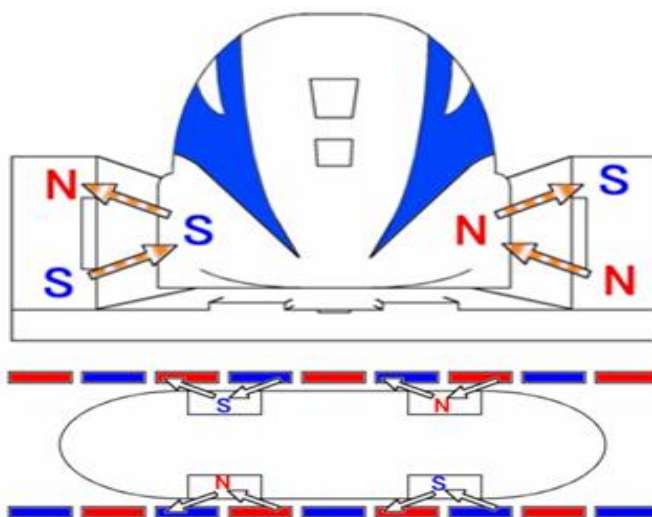
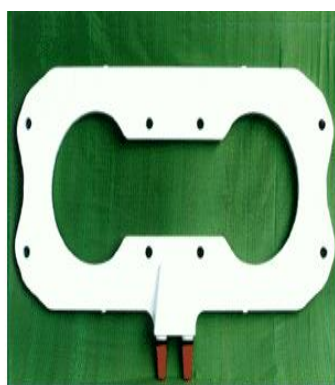


Рисунок 1.3 – Принцип движения поезда на сверхпроводящих магнитах по технологии электродинамического подвеса



Рисунок 1.4 – Путевая структура для движения поезда по технологии электродинамического подвеса



(а)



(б)

Рисунок 1.5 – Толкающая (а) и поднимающая (б) катушки

Электромагнитная система подвеса основана на свойстве магнита или электромагнита притягиваться к железной (ферромагнитной) полосе. Если взять магнит и подвести его к железному предмету, то магнит будет притяги-

ваться, чем ближе к предмету магнит, тем больше сила притяжения. По такому же принципу работает электромагнит, в котором подъемная сила зависит от силы тока протекающему по нему. В поезде вместо колесных пар установлены опорные и направляющие магниты, пример данной тележки показан на рисунке 1.6. Так как зазор между рельсами пути и вагоном в процессе движения меняется, непостоянна также и масса вагона, то необходимо регулировать силу тока электромагнита. Для этого на вагоне устанавливают специальную автоматическую следящую систему. Чтобы масса и мощность электромагнитов не были очень большими, зазор между электромагнитами и рельсами пути должен составлять (в современных конструкциях) 10-15 мм. При таких зазорах затраты мощности на подвешивание составляют лишь 1-3 кВт на 1 т груза, что является преимуществом электромагнитной системы. Основным недостатком системы электромагнитного подвеса - необходимость поддерживать малый воздушный зазор [6].

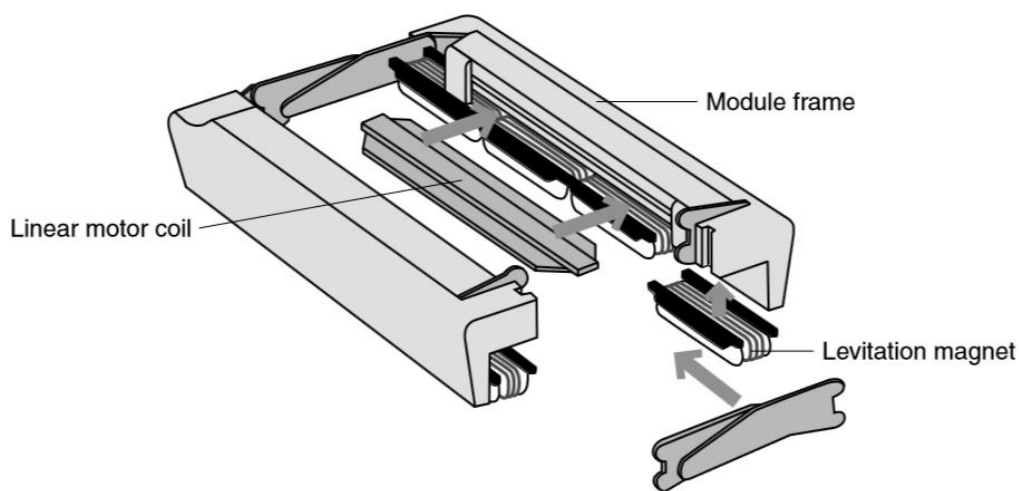


Рисунок 1.6 – Тележка электромагнитного подвеса

Теоретически системы могут работать во всем диапазоне скоростей (от 0 до 500 км/ч), но они более перспективны для городского и пригородного транспорта, где максимальная скорость ограничена 300 км/ч: при больших скоростях сложнее обеспечить бесконтактное движение при малых зазорах. Специалисты из Германии построили и испытали транспортные средства с

системами электромагнитного подвешивания, разогнав их до скорости 400 км/ч. Недостаток этой системы в том, что необходимо предусматривать на борту автономный источник электропитания (например, аккумуляторную батарею). Это необходимо в случае аварии внешнего электроснабжения, чтобы подпитывать током подъемные и направляющие электромагниты до полной остановки поезда, иначе вагоны упадут на путь.

Линейные электродвигатели для скоростного транспорта (как и вращающиеся) могут быть асинхронные (ЛАД) или синхронные (ЛСД). Принцип работы линейного электродвигателя основан на тех же законах физики, что и обычных трехфазных двигателей переменного тока. Если взять обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, изображенный на рисунке 1.7, разрезать его вдоль оси вращения и развернуть в плоскость, то получится линейный двигатель. При подключении трехфазной обмотки статора (первичной части) такого двигателя к источнику трехфазного переменного тока создается бегущее магнитное поле (а не вращающееся, как у обычных электродвигателей). Это поле наводит во вторичной части (по аналогии в роторе) вихревые токи. При взаимодействии магнитного поля с этими токами и создается сила, увлекающая вторичную часть ЛАД вслед за бегущим магнитным полем. Вторичная часть ЛАД представляет собой немагнитную токопроводящую (алюминиевую или медную), или реактивную шину (из стали, железа) или комбинированную, состоящую из алюминиевой полосы и для увеличения магнитной проводимости подкладки из железа [7].

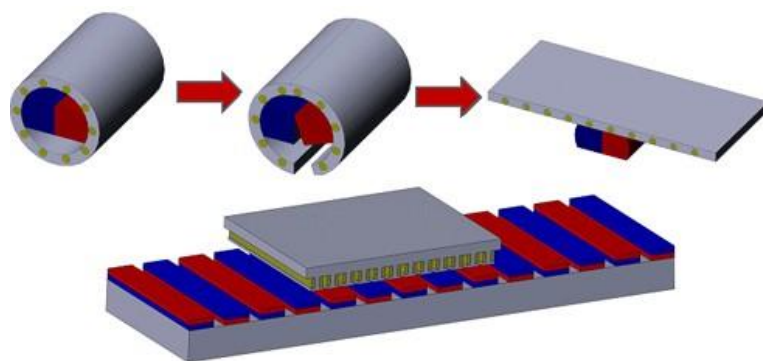


Рисунок 1.7 – Тяговый линейный двигатель

Сейчас разработано множество проектов линейных двигателей, но всех их можно разделить на две категории - двигатели низкого ускорения и двигатели высокого ускорения. Двигатели низкого ускорения используются в общественном транспорте (маглев, монорельс, метрополитен). Двигатели высокого ускорения весьма небольшие по длине, и обычно применяются, чтобы разогнать объект до высокой скорости, а затем выпустить его. Они часто используются для исследований гиперскоростных столкновений, как оружие или пусковые установки космических кораблей. Линейные двигатели широко используются также в приводах подачи металлорежущих станков и в робототехнике.

На рисунке 1.8 изображены электронно-управляемые электромагниты (1) прикреплены к металлической «юбке» каждого вагона. Они взаимодействуют с магнитами на нижней стороне специального рельса (2), в результате чего поезд зависает над рельсом. Другие магниты обеспечивают боковое выравнивание. Вдоль пути уложена обмотка (3), которая создает магнитное поле, приводящее поезд в движение (линейный двигатель) [8].

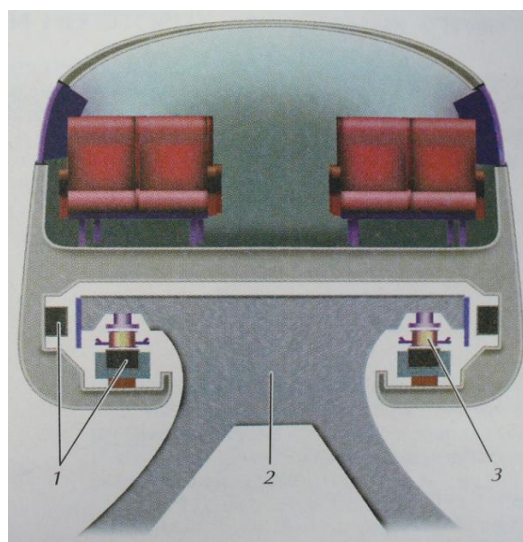


Рисунок 1.8 – Конструкция электромагнитного подвеса поезда компании «Трансрапид»

Система магнитного подвеса с постоянными магнитами основана на свойстве взаимного отталкивания одноименных полюсов этих магнитов. Такая система неустойчива в горизонтальной плоскости. Для придания им ус-

тойчивости необходима дополнительная система, действующая в этой плоскости, например механическая или электромагнитная. Поэтому в конструкции пути предусматривают полосы из постоянных магнитов. Аналогичные постоянные магниты также устанавливаются на вагоне. Для поперечной стабилизации поезда предназначены нейлоновые колеса.

Для создания подвески на постоянных магнитах не требуется подводить энергию. Этот фактор является ее несомненным достоинством. Недостаток этой системы - малый зазор между вагоном и путевым полотном (менее 10 мм). Отсюда очень высокие требования к точности изготовления пути, что приводит к высоким затратам как на его строительство, так и на техническое обслуживание. Кроме того, магниты хрупки и могут размагнититься от действия магнитных полей других устройств транспортной системы. Поэтому в настоящее время системы магнитного подвеса на постоянных магнитах применяются ограниченно и в основном совместно с электромагнитной системой.

1.3 Реализация поездов на магнитном подвесе

М-Bahn в Берлине. Это первая система Маглев, которая была построена в 1980 году. Дорога имеет длину в 1.6 км и соединяет между собой три станции. Запуск этой дороги состоялся 28 августа 1989 года. На протяжении 9 лет длились испытания. Из-за того, что магнитная дорога перекрывала важный участок метро, ее демонтировали 31 июля 1991 года [9].

Бирмингем. Не скоростной Маглев, ходил от Бирмингемского аэропорта до ближайшей железнодорожной станции с 1984 по 1995 год. Длина трассы составляла всего 600 метров, а высота подвеса 1.5 см. Дорога проработала на протяжении 10 лет. После этого была закрыта по жалобам пассажиров [10].

Шанхай, Китай. В настоящее время дорога используется для перевозки пассажиров, показанная на рисунке 1.9. Неудача с первой дорогой для поезда на электромагнитном подвесе в Берлине не отпугнула немецкую компанию Transrapid (дочернее предприятие Siemens AG и ThyssenKrupp) от продол-

жения исследований. Позже компания получила заказ от китайского правительства на строительство высокоскоростной трассы для поезда на электромагнитном подвесе, развивающего скорость до 450 км/ч, проложенной от шанхайского аэропорта Пудонг до города Шанхая [11].

Эта дорога была открыта в 2002 году и ее продолжительность составила 30 км. В будущем правительство планирует ее удлинить до старого аэропорта Хунцяо и далее на юго-запад Ханчжоу. После этого ее продолжительность составит 175 километров.



Рисунок 1.9 – Коммерческий поезд «Пудонг - Шанхай», Китай

К открытию выставки EXPO весной 2005 года, в северо-восточном пригороде Нагоя введена в эксплуатацию двухпутная линия Tobu Kyuugo Line «Linimo», длиной 9,2 км, по которой с помощью электромагнитного подвеса и линейного асинхронного двигателя перемещается со скоростью 100 км/час 3-х вагонный поезд HSST, представленный на рисунке 1.10. Вес одного вагона с пассажирами 28 т. Подвес каждого вагона с зазором 6...8 мм обеспечивается пятью парами электромагнитов. Питание этих электромагнитов, а также первичной обмотки ЛАД обеспечивается постоянным напряжением 1500 В через контактные рельсы, расположенные с двух сторон путевого полотна. Стоимость проекта составила \$ 280 млн [12].



Рисунок 1.10 – Пригородный поезд HSST, Япония

Аэропорт Инчхон, Южная Корея. В 2016 году между аэропортом Инчхон и станцией метрополитена в Сеуле Йонгу открыта двухпутная линия Incheon Airport Maglev длиной 6,1 км, имеющая 6 станций. Двух вагонный поезд, показанный на рисунке 1.11, имеет максимальную скорость 110 км/час. Каждый вагон длиной 12 м, шириной 2,7 м, высотой 3,45 м, с массой тары 19 т, вмещает 115 пассажиров. Тягово-левитационная система размещается на 4-х тележках каждого вагона. Ее схема и параметры аналогичны HSST. Стоимость проекта составляет \$ 342 млн [13].



Рисунок 1.11 – Пригородный поезд «Инчхон - Сеул», Южная Корея

Тэджон экспо–маглев, Южная Корея - с 1993 года. Hyundai создала трассу в 1 км (0,62 мили) для выставки Daejeon Expo в 1993 году, чтобы про-

демонстрировать публике электромагнитную подвеску. Городской поезд курсирует сегодня по короткому пути между Экспо-парком и Национальным музеем науки. Экспо-парк сегодня привлекает более миллиона посетителей ежегодно. В аэропорту Инчхон в настоящее время используется усовершенствованный прототип поездов маглев серии HML, называемый серией UTM.

Чанша маглев экспресс, Китай - с 2016 года. Это первый китайский разработанный и построенный поезд Маглев, изображенный на рисунке 1.12. Менее впечатляющий с его рабочей скоростью 100 км / ч, он является технологической базой для сверхскоростных поездов на скорости в 600 км / ч.

Длина Чаншйского маглева составляет 18,55 километра. Трасса соединила высокоскоростной железнодорожный вокзал «Южный» с международным аэропортом Хуанхуа. На пути следования есть промежуточная остановка Лангли. Кроме того, в городе строится вторая линия на магнитной подушке, а в перспективе их будет 7 [14].



Рисунок 1.12 – Чанша, Китай

Пекинская линия метро S1 Китай - с 2017 года. Это самый новый и третий в Китае коммерческий поезд "Маглев", представленный на рисунке 1.13. Он был открыт в самом конце 2017 года и теперь присоединяется к обширной сети метро Пекина. Линия скоростного транзита S1 имеет семь остановок и проходит по трассе длиной 8,25 км со скоростью 110 км / ч [15].



Рисунок 1.13 – Пекинская линия метро S1, Китай

По состоянию на 2020 год строятся три новые линии маглев. Есть две среднескоростные линии и одна высокоскоростная линия, где разработка уже началась.

Цинъюань Маглев – Китай. Начинается строительство первой 8,1 км участка Цинъюань Маглев. Это будет первая китайская линия, посвященная туризму. Общая длина планируется 38,5 км. В рамках проекта, туннель Хенганг длиной 387 метров станет самым длинным туннелем в Маглеве после его завершения. Qungyuan Maglev собирается излучать низкий уровень шума. Было измерено, что поезд испускает только 56 Дц при скорости 100 км / ч [16].

Древний город Фэнхуан Маглев – Китай. Это будет вторая китайская линия, посвященная культурному туризму. Первая линия протяженностью 9 км соединит высокоскоростную железнодорожную станцию Фэнхуан Чжанцзяцзе-Цзишоу-Хуайхуа со входом в туннель Фольклорного парка. Следующая фаза будет проходить от входа в туннель Фольклорного парка до туристического центра Сити-Ист. Третий и последний этап - от Восточного туристического центра города до высокоскоростной железнодорожной станции Фэнхуан Чжанцзяцзе-Цзишоу-Хуайхуа, проходящей мимо тематического парка Иньмацзян-Панда. Планируется, что все железнодорожные станции

вдоль линии будут легко интегрированы в окружающую природную и культурную среду [17].

Синкансэн – Япония. Самая длинная и сложная линия маглев в мире уже строится, и в ней часто появляются заголовки о трудностях, возникающих во время строительства. Это неудивительно, так как линия Маглев строится с нуля. Из 285,6 км этой трассы 256,6 км будут пролегать в тоннелях, 23,6 км – на виадуках и 11,3 км – на мостах. Стоимость, по предварительной оценке, колеблется в пределах \$ 46,5...49,8 млрд. Линию Токио-Нагая планируют открыть в 2027 году, а строительство будет завершено в 2045 году, когда Токио соединится с Осакой. Общее время в пути составит 67 минут, что на 75 минут быстрее, чем в настоящее время самый быстрый Shinkansen, Nozomi (поезд серии N700). Экспериментальная трасса и поезд технологии «JR-Maglev», показаны на рисунке 1.14 [18].



Рисунок 1.14 – Коммерческий межрегиональный поезд LO, Япония

1.4 Анализ основных проблем

В ходе выполненной работы был проведен обзор литературы. Основными проблемами создания транспорта на электромагнитном подвесе являются:

- Разработка системы подвешивания,
- Боковая стабилизация,

– Тяговый привод.

Разработка системы подвешивания. Успешное создание поездов на электромагнитном подвесе стало возможным благодаря прогрессу в области силовой и управляющей электроники, достигнутому в последние десятилетия. Реализация эффективных систем управления подвесными электромагнитными и линейными тяговыми двигателями требует применения быстродействующих силовых полупроводниковых ключей, а также высокопроизводительных вычислительных систем на основе микроконтроллеров.

Проектирование систем электромагнитного подвешивания является одной из основных проблем при создании новых моделей транспорта. Оно требует решения, как стандартных задач расчета электромагнитов, так и задачи разработки системы управления.

Еще два-три года назад развивалась идея электромагнитного подвеса, но на сегодняшний день китайские и российские исследователи приводят статьи об изучении гибридной системы подвешивания. Это комбинированная установка включает в себя сам электромагнит и постоянные магниты, устанавливаемые в различные места, как в сердечник электромагнита, так и в направляющий рельс. Так, например, в русской статье [19] из Новочеркасска производится исследование сравнения электромагнитной системы подвеса и гибридной системы. Приведены теоретические результаты сравнения динамических свойств электромагнитных и гибридных подвесных систем, полученные на нелинейных моделях Simulink. Обнаружено, что интеграция постоянного магнита в магнитопровод придает системе существенные нелинейные свойства, которые необходимо учитывать при проектировании системы управления. Показано, что применение гибридной подвесной системы, оснащенной постоянным магнитом, интегрированным в магнитопровод электромагнита, дает возможность снизить энергопотребление и потери.

Китайцы в своей статье [20] под названием «Новая конструкция системы электромагнитного подвеса для высокоскоростного транспорта» ставят перед собой цель, снизить потери на энергопотребление системы подвеса и

разрешить вопрос перегрева электромагнита. Для решения поставленной цели они исследуют различные конструкции и изготовление гибридного электромагнита. Оптимальный по их исследованию вариант, представлен на рисунке 1.15.

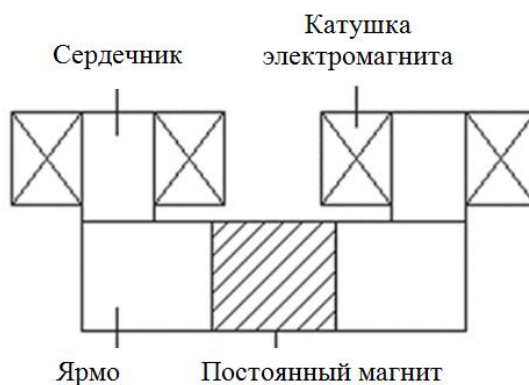


Рисунок 1.15 – Эквивалентная структура гибридного электромагнита

Добавление постоянного магнита в середину основного сердечника может не только увеличить площадь касания постоянного магнита, но и защитить постоянный магнит от ударов. В статье проведено моделирование подвеса, составлена конструкция алгоритма управления, схема модуля силового привода, конструкция предотвращения адсорбции. Все полученные данные исследования проверяют с помощью эксперимента на реальной модели поезда в различных режимах, результат которого показан на рисунке 1.16. Во время этого процесса воздушный зазор остается стабильным, а амплитуда электромагнита колеблется в пределах 3 мм.

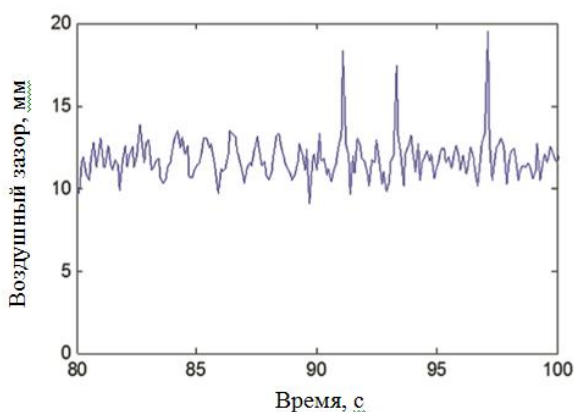


Рисунок 1.16 – Воздушный зазор во время испытаний

Еще одной проблемой магнитного подвеса является возникновение вихревых токов магнитным полем во время движения поезда. Вихревой ток в свою очередь ослабляет электромагнитное поле, что приводит к ослаблению силы левитации, увеличению тока подвеса и ухудшению характеристик. В данной работе путем теоретического анализа решается вопрос о влиянии вихревого тока на магнитное поле воздушного зазора, а поправочный коэффициент магнитного поля воздушного зазора подбирается по данным конечных элементов. На рисунке 1.17 можно видеть, что сила левитации уменьшается с увеличением скорости [21].

Когда скорость составляет 200 км/ч, ослабление силы левитации составляет около 20% по сравнению со статическим состоянием. Из рисунка 1.18 видно, что ток электромагнитного подвешивания увеличивается с увеличением скорости, а нагрузка увеличивается с увеличением тока. При скорости 200 км/ч потребляемая мощность увеличивается на 61,9%. Причина заключается в том, что при большой нагрузке магнитная плотность воздушного зазора больше, а сердечник имеет тенденцию к насыщению, поэтому ему требуется больший ток, чтобы компенсировать потерю силы левитации вихревого эффекта.

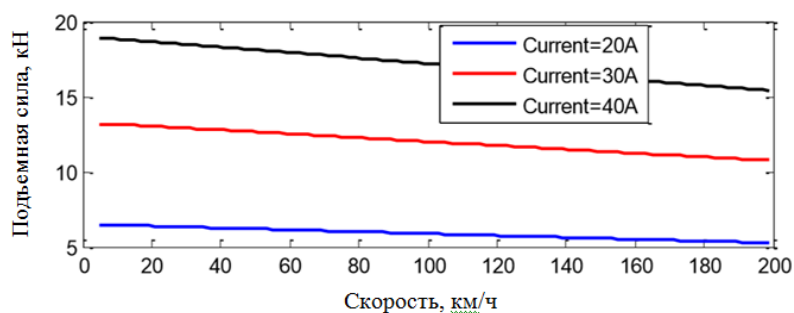


Рисунок 1.17 – Характеристики силы подвеса и скорости движения

Вихретоковый эффект приводит к тому, что электромагнит и рельс легко насыщаются на высокой скорости, что не только ограничивает дальнейшее повышение скорости движения поезда на электромагнитном подвесе, но и увеличивает энергопотребление системы. Это неизбежная проблема систе-

мы EMS, и ей необходимо найти соответствующий метод ослабления эффекта вихревого тока.

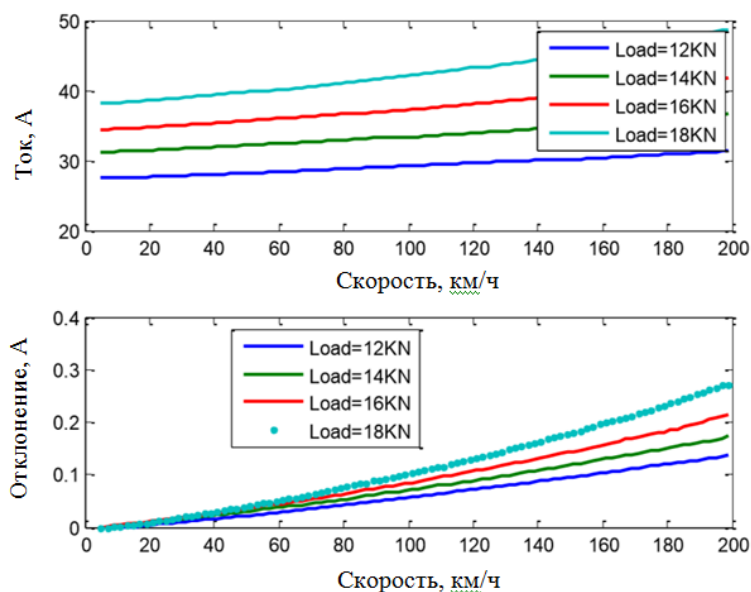


Рисунок 1.18 – Кривые потребления тока и скорости движения

Боковая стабилизация. Существует два решения боковой стабилизации поезда на электромагнитном подвесе: с помощью стабилизирующих магнитов установленных сбоку на подвижном составе напротив торцевой части направляющего рельса и с помощью системы управления электромагнитом. Первый способ более простой и не требует особой системы управления, боковая стабилизация осуществляется через обратную связь с помощью датчика расстояния между магнитом и рельсом. Данная конструкция показана на рисунке 1.19.

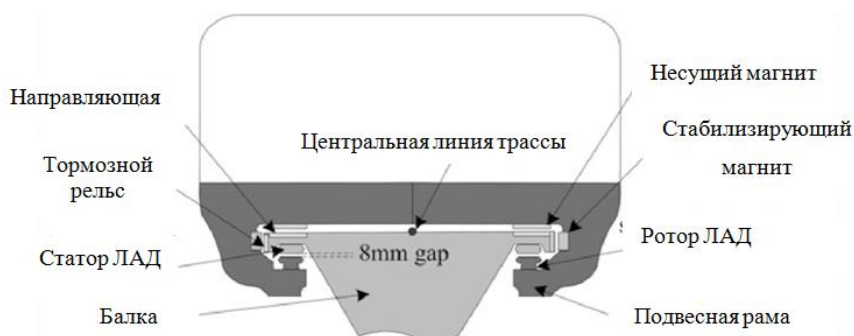


Рисунок 1.19 – Поперечное сечение магнитопровода поезда и путевой структуры

Вторая же система требует особой конструкции рельса и электромагнита, показанного на рисунке 1.20. Для электромагнитного подвеса (EMS) используется U-образный электромагнит, в котором подъемная сила и сила стабилизации осуществляется только одним электромагнитом.

Управление подъемной силой происходит непосредственно путем изменения напряжения подаваемого на электромагнит, а сила стабилизации пассивно определена силой левитации. Кроме того, необходимо учитывать эффективность согласования прохождения поворотов городских транспортных средств, поскольку путевая структура может иметь некоторые кривые с более короткими радиусами. Поэтому необходимо прогнозировать характеристики изгиба с максимально возможной точностью, чтобы улучшить электромагнитную подвеску и установить конструктивные характеристики направляющего рельса. В статье [22] были исследованы конструктивные изменения для получения направлений проектирования тележек с целью минимизации изменения бокового воздушного зазора, являющегося критерием эффективности изгиба.

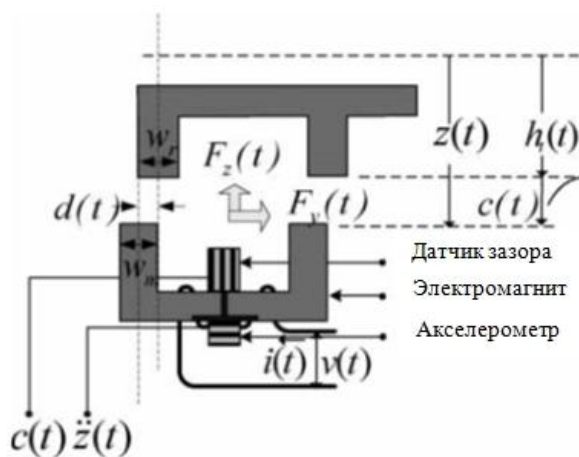


Рисунок 1.20 – Конструкция электромагнита

В похожей статье этих же авторов [23] предложена многотельная динамическая модель полного кузова транспортного средства, чтобы упростить прогнозирование качества движения поезда. Используя более реалистичную динамическую модель, предложенную в этой статье, численно исследовано влияние пределов отклонения направляющей, шероховатости поверхности и

параметров системы управления левитацией на качество езды. Результаты, полученные в результате имитационных исследований, затем используются для облегчения нахождения компромисса между гладкостью направляющей и подвеской транспортного средства.

С похожей системой магнитной стабилизации написана статья «Проектирование и проверка тонкой направляющей для поезда маглев путем моделирования и эксперимента» [24]. В этом исследовании, чтобы предсказать влияние различных параметров конструкции направляющей на динамическое поведение транспортного средства, имитация была проведена с использованием динамической модели, аналогичной реальному транспортному средству и направляющей, и предельного значения коэффициента прогиба тонкой направляющей для обеспечения контроля левитации.

Тяговый привод. В настоящее время и у нас в стране, и за рубежом много внимания уделяется разработке электродинамического принципа создания тягового усилия. Известны асинхронные и синхронные электрические двигатели, использующие этот принцип. В асинхронных электрических двигателях осуществляется взаимодействие магнитного поля, создаваемого переменным электрическим током в обмотках статора, с электрическим током, который генерируется в обмотках ротора.

Если по обмотке статора пустить трехфазный переменный ток, то возникает вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с током, индуцируемым в обмотках ротора полем статора, создает механическое усилие, которое заставляет ротор вращаться в направлении вращения магнитного поля. При этом скорость вращения ротора меньше скорости вращения поля статора, т. е. ротор по отношению к полю статора вращается асинхронно. Скорость вращения ротора зависит от скорости вращения магнитного поля статора и определяется частотой питающего тока и числом пар полюсов.

Принцип асинхронной электрической машины можно использовать для создания тягового усилия в бесколесных поездах. В этом случае статор двигателя, к которому подводится переменный трехфазный электрический ток,

размещается в вагоне, а ротор – вдоль рельсового пути. Возникнет тяговое усилие, и плоский статор, а вместе с ним и поезд двинется вдоль плоского ротора. Такой двигатель получил название линейного асинхронного. Линейный асинхронный двигатель имеет большие преимущества при использовании в скоростных бесколесных поездах. У него нет ограничения по скорости, так как он не имеет вращающихся частей, которые при высоких скоростях могут быть разорваны центробежными силами, а, следовательно, не возникает и вибраций. Кроме того, сами вращающиеся части подвержены быстрому износу. Поезд с линейным асинхронным двигателем имеет хорошие динамические характеристики: так как масса его невелика, он быстро набирает скорость и легко тормозится, при этом рекуперированная энергия возвращается в электрическую сеть.

При питании статора линейного двигателя, проложенного вдоль линии, трехфазным током генерируется магнитное поле, движущееся вдоль путевой структуры. Компоненты возбуждения в магнитных поездах притягиваются этим полем, чтобы заставить транспортное средство двигаться вперед синхронно с движущимся магнитным полем. Принцип действия тягового двигателя показан на рисунке 1.21.

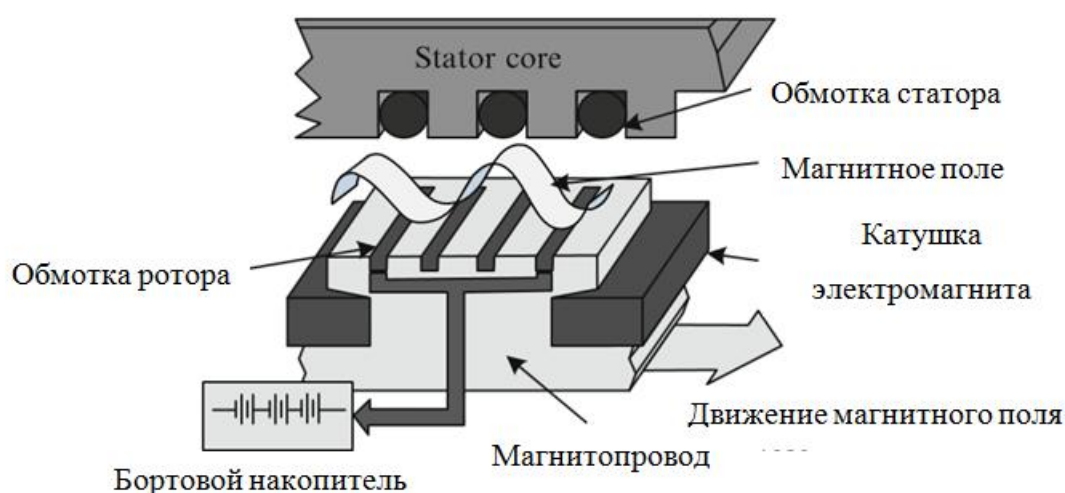


Рисунок 1.21– Подвесные электромагниты и линейный двигатель

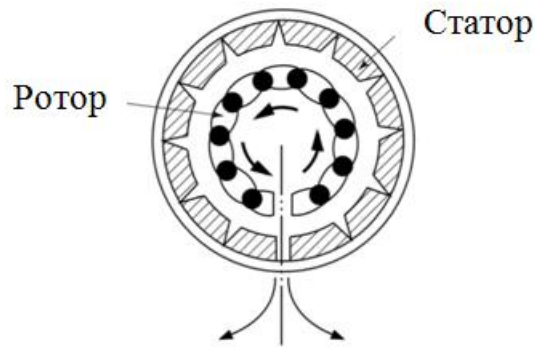
Существует много вариантов конструкций линейного асинхронного двигателя. Один из них состоит в следующем: статор разворачивается вдоль

полотна (активный путь), а ротор, выполненный в виде алюминиевой шины, – в вагоне. Поезд становится легче, так как он не несет тяжелого статора, масса которого составляет $1/4$ массы поезда; кроме того, отпадает необходимость передавать электроэнергию на экипаж, движущийся с высокой скоростью. Однако стоимость активного пути так высока, что приходится от этого варианта отказаться.

Другой вариант предусматривает, например, размещение в вагоне двух статоров, между которыми с зазорами 30–40 мм располагается алюминиевая шина, устанавливаемая на полотне. Это двусторонний линейный асинхронный двигатель с вертикальным расположением алюминиевой шины и статоров. Такая конструкция тягового двигателя очень усложняет устройство стрелочных переводов. Эта проблема легко решается применением одностороннего линейного асинхронного двигателя. В этом случае в вагоне в горизонтальном положении размещается один статор, а алюминиевая шина располагается на полотне. Данная конструкция представлена на рисунке 1.22. Для увеличения магнитной проводимости под нее можно положить стальной сердечник. Эта конструкция получила название "сэндвич". Однако тяговое усилие одностороннего линейного асинхронного двигателя при прочих равных условиях вдвое меньше, чем двустороннего [25].

При использовании линейного асинхронного двигателя полотно дороги не подвержено температурным нагрузкам, так как при быстром движении поезда участки дороги, на которых происходит взаимодействие магнитного поля статора с электрическим током ротора, не успевают нагреваться. А статор нагревается теплом, которое выделяется протекающим в проводниках током. Нагревание статора – одна из самых серьезных проблем. Основное направление ее решения – использование сверхпроводников.

● Rotary motor



● Linear motor

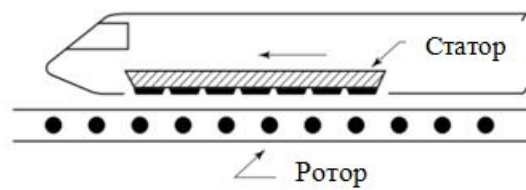


Рисунок 1.22 – Расположение линейного двигателя

1.5 Выводы

В ходе проведения анализа данных научно-технической литературы было выявлено, что:

- система магнитного подвеса является актуальной и развивается высокими темпами;
- распространенной конструкцией магнитного подвеса для городского транспорта, является система EMS (система электромагнитного подвешивания);
- в ходе обзора литературы были выявлены основные проблемы разработки электромагнитного подвеса.

2 МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТА НА ПОЕЗДЕ

Электромагнитным механизмом называется электромагнитная система, в которой при изменении или перераспределении магнитного потока происходит перемещение подвижной части системы, совершающей полезную работу. При всем разнообразии встречающихся на практике электромагнитов они содержат основные элементы одинакового назначения, представлены на рисунке 2.1.

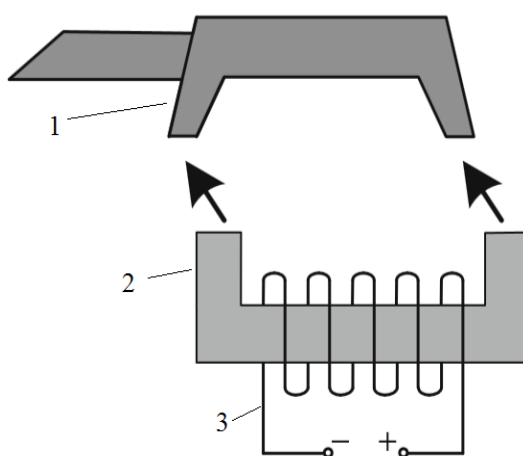


Рисунок 2.1 – Конструкция электромагнитного подвеса:
1 – путевая структура; 2 – сердечник; 3 – катушка электромагнита

Сердечник – часть магнитной системы, к которой притягивается якорь или в случае с магнитным подвесом, сердечник притягивается к путевой структуре. Катушка электромагнита служит для создания необходимого магнитного потока, обеспечивающего перемещение электромагнита к путевой структуре.

Выбор материала магнитопровода во многом определяет эксплуатационные показатели электрического аппарата. Для изготовления магнитопроводов электромагнитов постоянного тока применяют магнитомягкие низкоуглеродистые стали. Основной характеристикой магнитного материала является зависимость величины магнитной индукции (B) от напряженности магнитного поля (H). Детали магнитопровода постоянного тока изготавливают из прутков, полос и листов или отливают в соответствии с расчетным сече-

нием. Помимо малой величины задерживающей (коэрцитивной) силы эти стали имеют высокое значение максимальной относительной магнитной проницаемости. У электромагнитов больших размеров магнитопровод целесообразно изготавливать из электротехнического чугуна. Для уменьшения массы и габаритов применяют детали, отлитые из низкоуглеродистой стали марок Э, ЭА и ЭАА. Электромагнитными нагрузками, определяющими размеры элементов электромагнитной системы и электрического аппарата в целом, являются магнитная индукция в рабочем воздушном зазоре (или зазорах, если их несколько) δ от В, магнитная индукция в элементах магнитопровода В, плотность тока в проводниках обмотки (или обмоток, если их несколько) j . Оптимальная величина магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре зависит от соотношения между начальным усилием притяжения и величиной хода, т.е. от конструктивного фактора электромагнита.

В качестве прототипа для проектирования электромагнита был выбран беспилотный коммерческий поезд Маглев, который обеспечивает проезд между международным аэропортом Инчхон и вокзалом Юньюй. Его основные технические параметры приведены в таблице 2.1 [26].

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики

Наименование	Значения
Конфигурация поезда	2 вагона
Габариты поезда (м)	12.0 (L) x 2.7 (W) x 3.45 (H)
Вес тары поезда: Загруженный :	19 т/вагон 26.5 т/вагон
Вместимость 115 чел/вагон	Стоя: 5 чел/м ²
Количество тележек	4 шт/вагон
Система левитации	Тип: электромагнитный подвес, 8 мм воздушный зазор
Источник питания	1,500 В DC
Максимальная рабочая скорость	80 - 100 км/ч
Рабочее напряжение магнита	350 В
Потребляемая мощность магнита	110 кВт/вагон

2.1 Расчеты электромагнита поезда маглев

Полная масса подвижного состава, приходящаяся на 1 магнит M , составляет [27,28,29]:

$$M = \frac{M_T + N_{pass} m_{pass}}{n_m} = 3.38 \cdot 10^3 \text{ кг}, \quad (2.1)$$

где $M_T = 19\,000$ – масса тары подвижного состава, кг;

$N_{pass} = 115$ – количество пассажирских мест;

$m_{pass} = 70 \text{ кг}$ – средний вес 1 пассажира, кг;

$n_m = 8$ – количество магнитов, установленных на вагоне.

Площадь сечения сердечника при любом количестве рабочих воздушных зазоров n и равномерном магнитном поле на основании уравнения электромагнитной силы Максвелла определится как:

$$S = \frac{2\mu_0 \cdot M \cdot g}{B^2} = 0.0833 \text{ м}^2, \quad (2.2)$$

где $g = 9.807$ – ускорение свободного падения, м/с²;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м;

$B = 1$ – расчетная индукция магнитного поля в зазоре, Тл.

Площадь сечения торца сердечника рассчитывается по выражению (2.3):

$$S_m = \frac{S}{2} = 0,042 \text{ м}^2 \quad (2.3)$$

На основании формул расчета электромагнита, выведена формула расчета постоянной времени:

$$\tau = \frac{2 \cdot g \cdot \delta}{P_{уд}} = 0,078 \text{ с}, \quad (2.4)$$

где $\delta = 0,01$ – номинальный воздушный зазор, м;

$P_{уд} = 2,5$ – удельная мощность электромагнита, кВт/т.

Количество витков катушки электромагнита рассчитывается по выражению (2.5):

$$w = \frac{B \cdot \delta \cdot U}{\mu_0 \cdot P_{y\partial} \cdot M} = 281 \text{ вит}, \quad (2.5)$$

где $U=300$ – среднее напряжение при рабочем зазоре, В.

Индуктивность катушки электромагнита рассчитывается по выражению (2.6):

$$L = w^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{S}{\delta} = 0,827 \text{ Гн} \quad (2.6)$$

Активное сопротивление находится по выражению (2.7):

$$R = \frac{L}{\tau} = 10,5 \text{ Ом} \quad (2.7)$$

Номинальный ток рассчитывается по выражению (2.8):

$$I_{ном} = \frac{U}{R} = 28,5 \text{ А} \quad (2.8)$$

Намагничивающая сила катушки электромагнита постоянного тока для двух рабочих зазоров рассчитывается по выражению (2.9):

$$\theta = I_{ном} \cdot w = 8000 \text{ А} \quad (2.9)$$

Номинальная мощность электромагнита определяется по выражению (2.10):

$$P_{ном} = I_{ном} \cdot U = 8,54 \text{ кВт} \quad (2.10)$$

Сердечник электромагнита имеет П-образную форму, вытянутую вдоль направления путевой структуры. Отношение сторон поперечного сечения сердечника равняется 16:1, т.е. ширина магнитопровода составляет $a=0,05$ м, а длина $b=0,8$ м.

Относительная длина обмоточного пространства (по условиям отвода теплоты и приемлемой теплоемкости электромагнита целесообразно иметь $m_1=4$). Допустимое значение плотности тока для длительного режима включения обмотки составляет $j=5 \cdot 10^6$ А/м². Внутренняя изоляция обмотки составляет $\Delta_{вн.из}=0,3 \cdot 10^{-3}$ м.

Площадь поперечного сечения обмоточного пространства катушки (в расчете на одну катушку) определяется по выражению (2.11):

$$S_{обм.нр} = \frac{1,05 \cdot \theta}{j \cdot k_{3.об}} = 2,146 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad (2.11)$$

где $k_{3.об}=0,783$ – коэффициент заполнения обмоточного пространства для круглого провода, диаметром выше 0,3 мм.

Высота и длина обмоточного пространства рассчитываются по выражениям (2.12) и (2.13):

$$h_{обм.нр} = \sqrt{\frac{S_{обм.нр}}{m_l}} = 23,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.12)$$

$$l_{обм.нр} = \frac{S_{обм.нр}}{h_{обм.нр}} = 92,644 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.13)$$

Внутренний и наружный размеры обмотки прямоугольной формы находятся по выражениям (2.14)-(2.17):

$$a_{об.вн} = a + 2 \cdot \Delta_{вн.из} = 0,0506 \text{ м} \quad (2.14)$$

$$b_{об.вн} = b + 2 \cdot \Delta_{вн.из} = 0,8006 \text{ м} \quad (2.15)$$

$$a_{об.н} = a_{об.вн} + 2 \cdot h_{обм.нр} = 0,097 \text{ м} \quad (2.16)$$

$$b_{об.н} = b_{об.вн} + 2 \cdot h_{обм.нр} = 0,847 \text{ м} \quad (2.17)$$

Средняя длина витка обмотки катушки прямоугольной формы определяется по выражению (2.18):

$$l_{нр} = 2 \cdot \left[a_{об.н} + b_{об.н} - \frac{(a_{об.н} - a_{об.вн})}{2} - \frac{(b_{об.н} - b_{об.вн})}{2} \right] = 1,795 \text{ м} \quad (2.18)$$

Площадь поперечного сечения металла обмоточного провода находится по выражению (2.19):

$$S_{нр} = \frac{I_{ном}}{j} = 5,7 \text{ мм}^2 \quad (2.19)$$

Диаметр круглого обмоточного провода находится по выражению (2.20):

$$d_{нр} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{нр}}{\pi}} = 2,7 \text{ мм} \quad (2.20)$$

Масса провода катушки индуктивности рассчитывается по формуле

(2.21):

$$m_{np} = l_{np} \cdot w \cdot S_{np} \cdot 10^{-6} \cdot \rho_m = 25,7 \text{ кг}, \quad (2.21)$$

где $\rho_m=8960$ – плотность меди, кг/м^3 .

Масса сердечника электромагнита находится по выражению (2.22):

$$m_{сер} = S_{mc} \cdot (2 \cdot h_{обм.нр} + 2 \cdot a + l_{обм.нр}) \cdot \rho_{ст} = 75,65 \text{ кг}, \quad (2.22)$$

где $\rho_{ст}=7600$ – плотность электротехнической стали, кг/м^3 .

2.2 Расчеты экспериментальной физической модели электромагнита

По аналогичной методике предварительного расчета, произведен расчет для физической модели электромагнита. Начальные данные были взяты для имеющегося оборудования:

$U=12 \text{ В}$ – напряжение на выходе регулятора;

$\delta=7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – воздушный зазор;

$\tau=0,004 \text{ с}$ – постоянная времени;

$B=0,215 \text{ Тл}$ – желаемая индуктивность магнитного поля;

$\mu_0=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная;

$m=0,720 \text{ кг}$ – поднимаемая масса с учетом полезной нагрузки.

Из формулы (2.4) выражена удельная мощность электромагнита:

$$P_{y\theta} = \frac{2 \cdot g \cdot \delta}{\tau} = 34,33 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \quad (2.23)$$

Расчет выполнен по формуле (2.5):

$$w = 582 \text{ вит}$$

Расчет площадь сечения сердечника при любом количестве рабочих воздушных зазоров выполнен по формуле (2.2):

$$S = 3,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Расчет площади сечения торца сердечника выполнен по формуле (2.3):

$$S_m = 1,92 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Расчет индуктивности катушки электромагнита выполнен по формуле (2.6):

$$L = 0,023 \text{ Гн}$$

Расчет активного сопротивления катушки индуктивности выполнен по формуле (2.7):

$$R = 5,825 \text{ Ом}$$

Расчет номинального тока по закону Ома выполнен по формуле (2.8):

$$I_{\text{ном}} = 2,06 \text{ А}$$

Расчет намагничивающей силы выполнен по формуле (2.9):

$$\theta = 1198 \text{ А}$$

Расчет номинальной мощности электромагнита выполнен по формуле (2.10):

$$P_{\text{ном}} = 24,721 \text{ Вт}$$

Сечение сердечника выполнено в форме квадрата, а размер стороны магнитопровода равен, $a=0,014 \text{ м}$.

Относительная длина обмоточного пространства (по условиям отвода теплоты и приемлемой теплоемкости электромагнита целесообразно иметь $m_1=4$). Допустимое значение плотности тока для длительного режима включения обмотки составляет $j=3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Внутренняя изоляция обмотки составляет $\Delta_{\text{вн.из}}=0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Определение площади поперечного сечения обмоточного пространства катушки (в расчете на одну катушку) по формуле (2.11):

$$S_{\text{обм.пр}} = 535,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $k_{3.об}=0,783$ – коэффициент заполнения обмоточного пространства для круглого провода, диаметром выше 0,3 мм.

Высота и длина обмоточного пространства по формулам (2.12), (2.13):

$$h_{\text{обм.пр}} = 11,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$l_{\text{обм.пр}} = 46,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Внутренний и наружный размеры обмотки прямоугольной формы по формулам (2.14), (2.15), (2.16), (2.17):

$$a_{об.вн} = 14,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_{об.вн} = 14,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$a_{об.н} = 37,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_{об.н} = 37,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Средняя длина витка обмотки катушки прямоугольной формы по формуле (2.18):

$$l_{np} = 0,104 \text{ м}$$

Площадь поперечного сечения металла обмоточного провода по формуле (2.19):

$$S_{np} = 0,69 \text{ мм}^2$$

Диаметр круглого обмоточного провода по формуле (2.20):

$$d_{np} = 0,935 \text{ мм}$$

Масса провода катушки индуктивности по формуле (2.21):

$$m_{np} = 0,372 \text{ кг},$$

где $\rho_M=8960$ – плотность меди, кг/м³.

Масса сердечника электромагнита по формуле (2.22):

$$m_{сер} = 0,142 \text{ кг},$$

где $\rho_{ст}=7600$ – плотность электротехнической стали, кг/м³.

По этим параметрам был выбран электромагнит, который содержит 560 витков медной проволоки с сечением 0,8 мм² навитой на стальной сердечник U-образной формы с сечением $2,1 \cdot 10^{-4}$ м², сопротивление катушки электромагнита составило 1,3 Ом. Для обеспечения быстродействия системы управления физической модели в силовую цепь последовательно катушки электромагнита подключено сопротивление в 3 Ом.

Для анализа результатов физической модели, произведен перерасчет под параметры реальной модели электромагнита. Напряжение, подаваемое на катушку электромагнита принято 30 В. В соответствии с ранее приведенными формулами, рассчитаны:

- магнитная индукция из формулы (2.2): $B=0,206$ Тл;
- намагничивающая сила из формулы (2.9): $\Theta=1145$ А;
- ток из формулы (2.8): $I=2,045$ А;
- мощность по формуле:

$$P = I \cdot (R_{кат} + R_{доб}) = 17,983 \text{ Вт} \quad (2.24)$$

- удельная мощность: $P_{уд}=24,976$ Вт/кг;
- индуктивность по формуле (2.6): $L=0,024$ Гн;
- постоянная времени по формуле (2.4): $\tau=5,5 \cdot 10^{-3}$ с.

2.3 Выводы

– Проведен предварительный расчет, в котором все полученные данные применены в исследовании электромагнитного подвеса в программе Matlab Simulink при составлении схемы поверочного расчета;

– Проведен предварительный расчет для исследования в программе Femm, как реальной модели, так и для анализа результатов полученных с физической модели.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Имитационная модель в MatLab Simulink

Для исследования динамических характеристик электромагнитного подвеса разработана модель в MatLab Simulink. Общий вид модели приведен на рисунке 3.1.

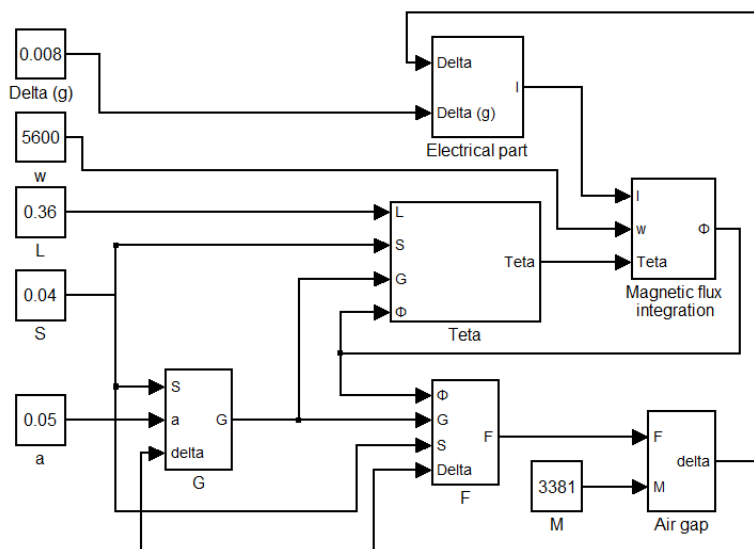


Рисунок 3.1 – Имитационная модель электромагнитного подвеса

Разработанная модель состоит из нескольких подсистем, реализующих основные расчетные выражения, необходимые для описания электромагнитного подвеса. В них вычисляются сила подвешивания F , магнитная проводимость зазора G_{δ} , намагничивающая сила θ при заданном магнитном потоке, магнитный поток Φ_{δ} , величина воздушного зазора δ и сила тока I .

Для подвешивания вагона необходимо развить электромагнитную силу F , которой будет достаточно для преодоления силы тяжести при заданном воздушном зазоре:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi_{\delta}^2}{G_{\delta}^2} \cdot \frac{dG_{\delta}}{d\delta}, \quad (3.1)$$

где Φ_{δ} – магнитный поток в рабочем воздушном зазоре, Вб;

G_δ – магнитная проводимость воздушного зазора, Гн;

$\frac{dG_\delta}{d\delta}$ – производная магнитной проводимости по величине воздушного зазора,

которая рассчитывается по формуле:

$$\frac{dG_\delta}{d\delta} = -\mu_0 \cdot \frac{S}{\delta^2}, \quad (3.2)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м;

S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м²;

δ – величина воздушного зазора между электромагнитом, установленном на поезде и магнитопроводом на путевой структуре, м.

Расчет силы по выражениям (3.1) и (3.2) реализован в подсистеме F программы MatLab Simulink, показанной на рисунке 3.2.

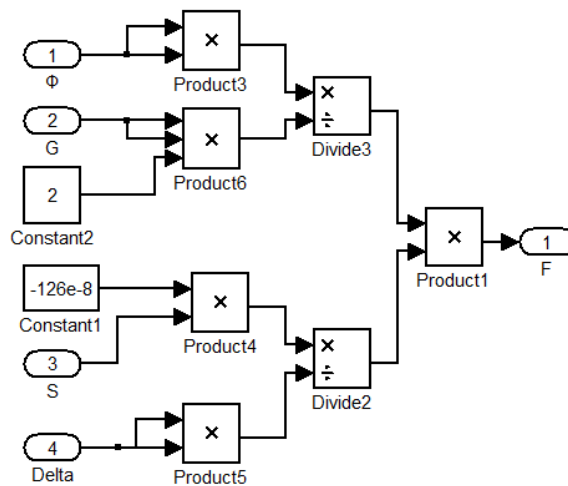


Рисунок 3.2 – Подсистема F

Выражение для расчета магнитной проводимости зависит от формы магнитопровода. Для системы магнитного подвеса был выбран П-образный магнитопровод, где магнитная проводимость рабочего зазора между торцом плоского прямоугольного магнитопровода и параллельного ему якоря рассчитывается по формуле:

$$G_\delta = \mu_0 \cdot \left(\frac{S}{\delta} + 1,16 \cdot a \right), \quad (3.3)$$

где a – ширина магнитопровода, м.

Расчет магнитной проводимости по выражению (3.3) реализован в подсистеме G программы MatLab Simulink, показанной на рисунке 3.3.

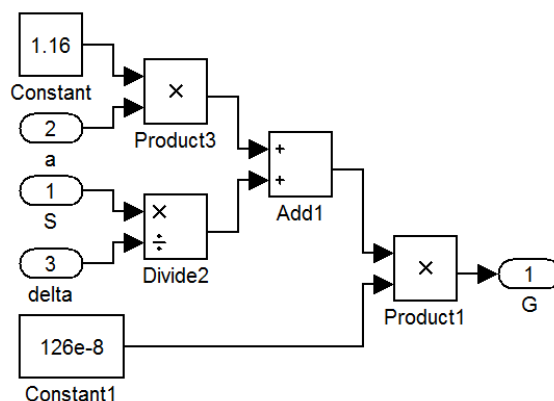


Рисунок 3.3 – Подсистема G

Для определения магнитного потока и его регулирования, находится намагничивающая сила по формуле (3.4), проинтегрировав которую, можно получить магнитный поток:

$$\theta = I \cdot w = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta}} + H(B) \cdot L, \quad (3.4)$$

где I – величина тока, проходящая через катушку электромагнита, А;

w – количество витков катушки электромагнита, вит;

$H(B)$ – напряженность магнитного поля магнитопровода, зависящая от величины магнитной индукции, А/м;

L –длина замкнутой цепи магнитопровода, м.

Чтобы определить напряженность магнитного поля магнитопровода, были применены кривые намагничивания для электротехнической стали, зависящие от величины магнитной индукции, расчет которой производится по формуле:

$$B = \frac{\Phi_{\delta}}{S} \quad (3.5)$$

Обратная кривая намагничивания была реализована в Simulink методом кусочно-линейной аппроксимации при помощи блока Lookup Table. В данном расчете была выбрана сталь листовая электротехническая холодноката-

ная марки Э330 с соответствующей ей кривой намагничивания, показано на рисунке 3.4.

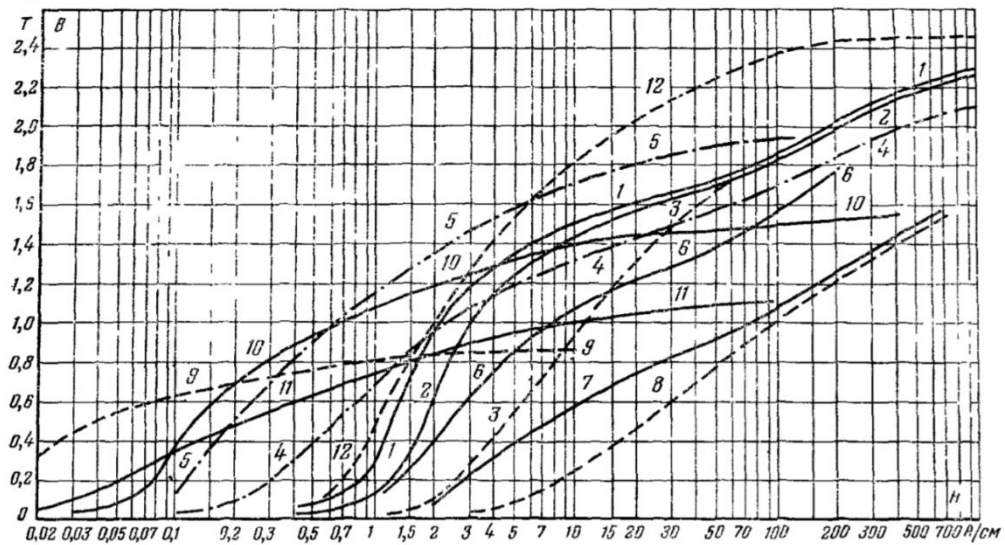


Рисунок 3.4 – Кривые намагничивания электротехнических материалов:
5 – Сталь листовая электротехническая холоднокатаная марки Э330

Расчет намагничивающей силы и магнитной индукции по выражениям (3.4) и (3.5), и значения кривой намагничивания стали реализованы в подсистеме Teta программы MatLab Simulink, показанной на рисунке 3.5.

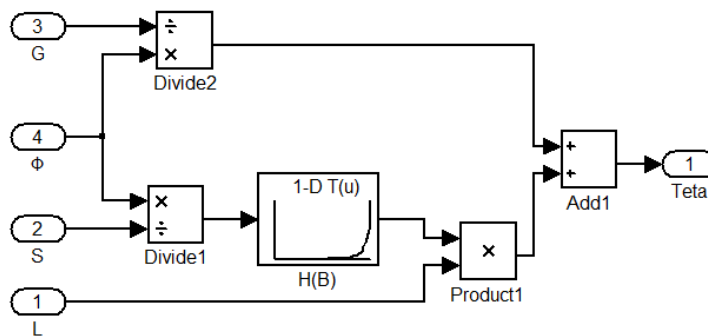


Рисунок 3.5 – Подсистема Teta

Для расчета магнитного потока, применен интегральный регулятор с обратной связью по величине в программе Simulink, представленный на рисунке 3.6, с помощью которой вычислена ошибка между желаемой и действительной намагничивающей силой. После чего эта ошибка проинтегрирована и на выходе получен магнитный поток.

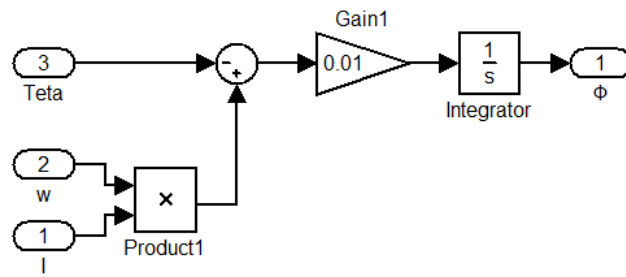


Рисунок 3.6 – Подсистема Magnetic flux integration

Особенностью реализованной модели магнитного подвеса является использование обратной связи для определения магнитного потока. Значение потока, необходимое для уравнивания падения намагничивающей силы при заданном токе магнита, определяется при помощи интегрального регулятора.

В подсистеме air gap, представленной на рисунке 3.7, производится определение действительного значения воздушного зазора путем интегрирования уравнений движения. Особенностью подсистемы является реализация ограничений, соответствующих касанию ЭПС и рельса при достижении минимально либо максимально допустимых значений величины воздушного зазора.

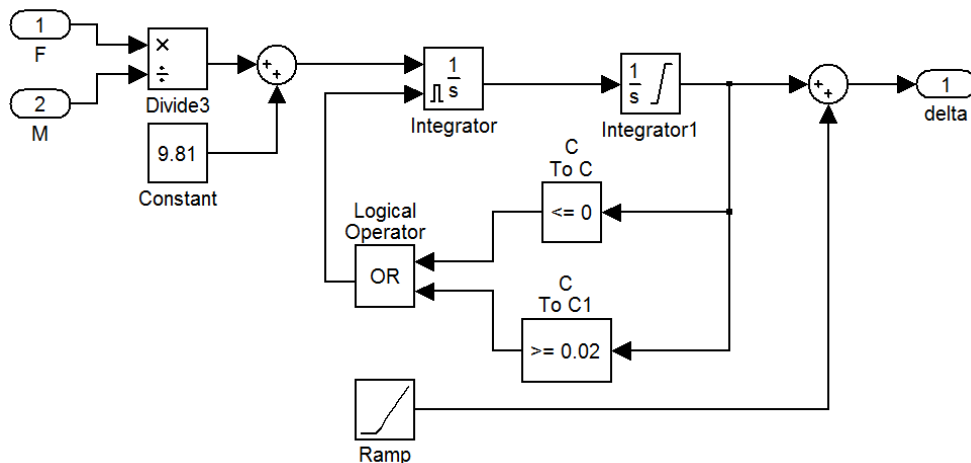


Рисунок 3.7 – Подсистема air gap

Для определения тока подаваемого на катушку электромагнита, была смоделирована электрическая схема, представленная на рисунке 3.8. Подвешенной электромагнит с добавочным сопротивлением представлен схемой замещения в виде RL-цепи. Для моделирования токов утечки замкнутого ключа,

который необходим для правильного расчета цепи, необходим подключенный параллельно высокоомный резистор R. В модели реализован понижающий регулятор напряжения с ШИМ, обеспечивающий управление током электромагнита. Коэффициент заполнения регулятора определяется ПИД-регулятором, обеспечивающим постоянство воздушного зазора. Измеренная в модели величина тока в цепи электромагнита используется для расчета силы его притяжения. Несущая частота широтно-импульсной модуляции в модели составляет 1 кГц.

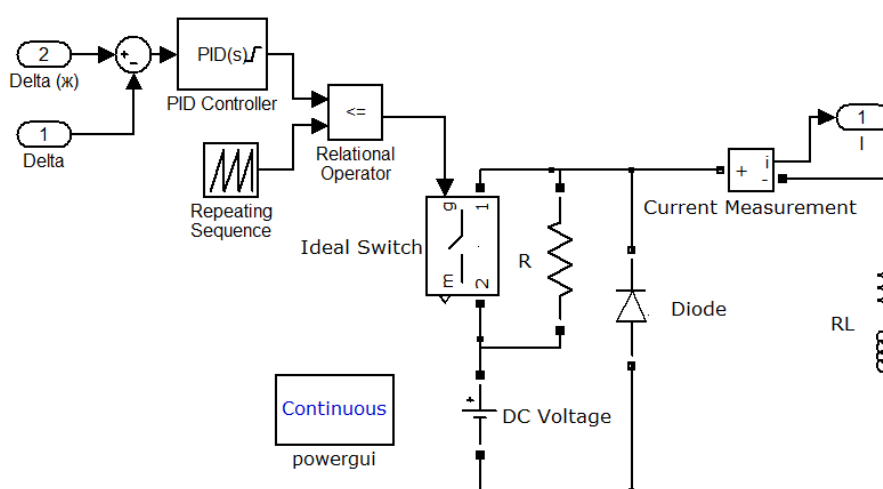


Рисунок 3.8 – Электрическая схема

Средний ток катушки составил 25.1 А, а средняя мощность 8.2 кВт. Таким образом, достигнутая удельная мощность подвеса составляет 2,43 кВт/т. Превышение по сравнению с результатами проектного расчета можно объяснить, принимая во внимание потери в стальном сердечнике и вытянутую его форму.

При помощи разработанной модели подобраны параметры ПИД-регулятора, обеспечивающего постоянство воздушного зазора. Величины коэффициентов пропорциональности обратной связи составляют 500, 10 и 100 соответственно.

На рисунке 3.9 приведена зависимость величины воздушного зазора и тока магнита от времени при отсутствии возмущения, а на рисунке 3.10 – при наличии возмущения амплитудой 1 мм [30, 31] и круговой частотой 20 рад/с.

Возмущение имитирует воздействие неровностей пути на вагон при его движении. В первом случае амплитуда колебаний зазора составила 0.4 мм, тока 5 А, а частота 14 Гц. При выбранных настройках регулятора зазора положение кузова на более высоких частотах помех становится нестабильным.

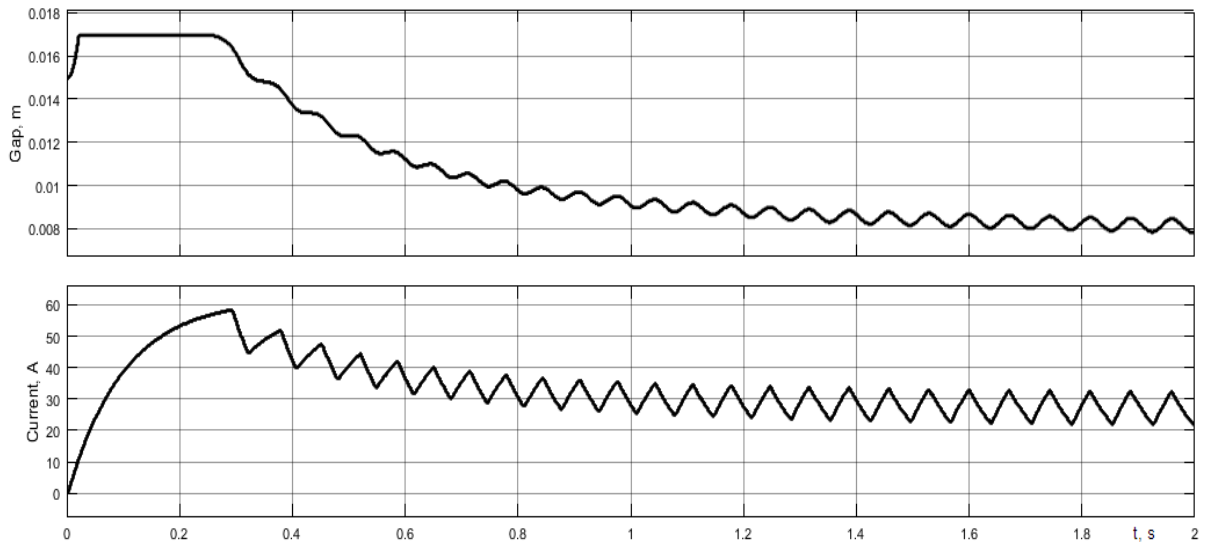


Рисунок 3.9 – Зависимости воздушного зазора и тока катушки от времени в модели электромагнитной подвески при отсутствии внешнего возмущения

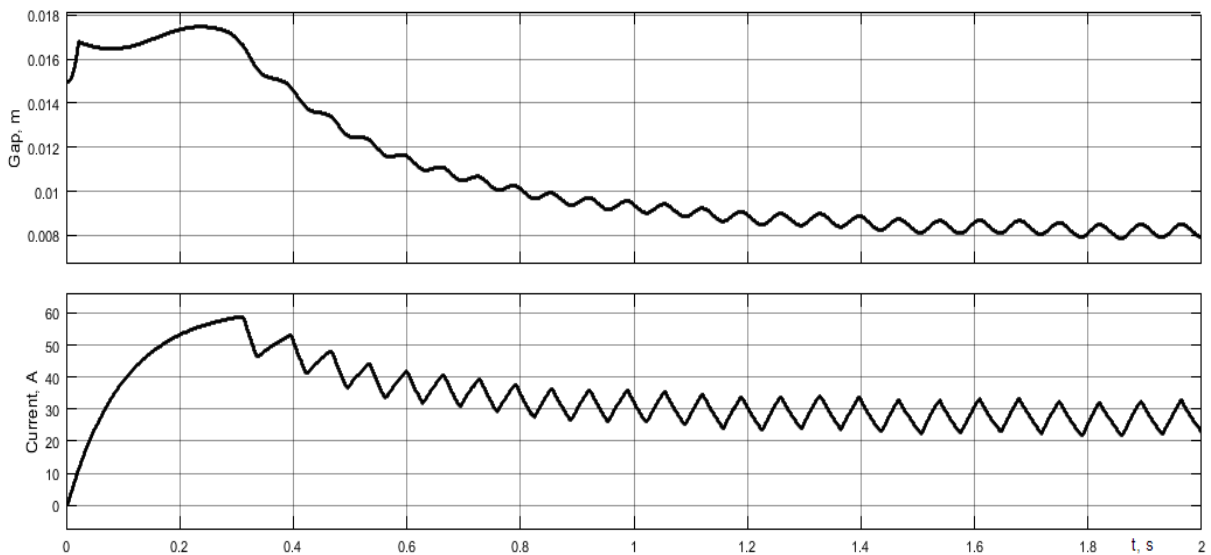


Рисунок 3.10 – Зависимости воздушного зазора и тока катушки от времени в модели электромагнитной подвески при наличии внешнего возмущения

3.2 Физическая модель системы электромагнитного подвеса поезда

Для решения поставленных задач необходимо измерить подаваемое на

катушку электромагнита напряжение, протекающий по ней ток и расстояние между электромагнитом и опорой.

Условно электрическую схему экспериментальной установки, изображенную на рисунке 3.11, можно поделить на 2 части: силовую цепь и цепь микроконтроллера. В силовую цепь входят электромагнит YA, резистор R, датчик тока ДТ, обратный диод VD, емкостной фильтр C, источник питания напряжением 30 В и полупроводниковый ключ VT на MOSFET-транзисторе, управляемый микроконтроллером через драйвер VA1. Цепь управления содержит стабилизатор напряжения VA2, формирующий напряжение 12 В для питания драйвера, драйвер силового ключа, оптопару VA3 для гальванической развязки драйвера и микроконтроллера, датчик тока силовой цепи, а также диод HL и фоторезистор BL, используемые для измерения зазора.

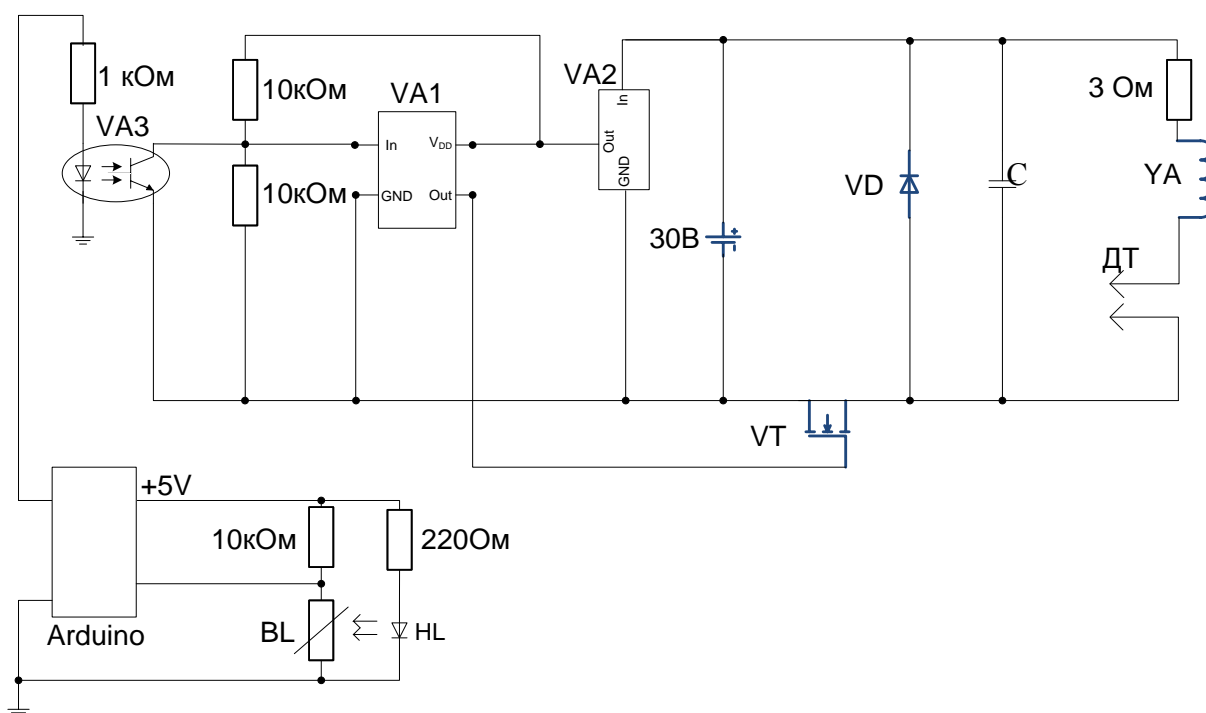


Рисунок 3.11 – Схема установки магнитного подвеса

Электромагнит YA содержит 560 витков медной проволоки с сечением $0,8 \text{ мм}^2$ навитой на стальной сердечник марки Э41 U-образной формы с сечением торца $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Сопротивление катушки электромагнита составило 1,3 Ом. Для обеспечения быстродействия системы управления физической модели в силовую цепь последовательно катушки электромагнита подключен ре-

зистор сопротивлением равном 3 Ом и мощностью 10 Вт.

В качестве емкостного фильтра использовался керамический конденсатор К10-17Б емкостью 22пФ и рабочим напряжением 50 В.

В схеме был установлен диод 10A10, который был подобран по максимальному прямому току. Технические характеристики диода приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические параметры 10A10

Параметры, единицы измерения	Значения
Материал	Кремний
Максимальное постоянное обратное напряжение, В	1000
Максимальное импульсное обратное напряжение, В	1000
Максимальный прямой (выпрямленный за полупериод) ток, А	10
Максимально допустимый прямой импульсный ток, А	400
Максимальное прямое напряжение, В	1
при Iпр., А	10
Рабочая температура, С	-65...150
Способ монтажа	в отверст.
Корпус	г-6
Вес, г	2.1

В качестве полупроводникового ключа выбран MOSFET транзистор «IRFZ24NPBF N-канал 55В 17А», удовлетворяющий по значениям максимального тока 3А и напряжения 24 В с коэффициентом запаса не менее 2 по току и напряжению. Данные характеристики ключа MOSFET приведены в таблице 3.2.

Для выбора драйвера, управляющего работой транзистора, необходимо определить ток на его затворе. При суммарном заряде затвора 20 нКл и времени нарастания тока 27 нс ток затвора составляет:

$$I_g = \frac{Q_g}{t_f} = 0,74 \text{ А} \quad (3.6)$$

Таблица 3.2 – Технические параметры IRFZ24NPBF

Параметры, единицы измерения	Значения
Структура	n-канал
Максимальное напряжение сток-исток $U_{си}$, В	55
Максимальный ток сток-исток при 25 С $I_{си макс.}$, А	17
Максимальное напряжение затвор-исток $U_{зи макс.}$, В	± 20
Сопротивление канала в открытом состоянии $R_{си}$ вкл. (Max) при I_d , $R_{ds (on)}$	0.07 Ом при 10А, 10В
Максимальная рассеиваемая мощность $P_{си макс.}$, Вт	45
Крутизна характеристики, S	4.5
Пороговое напряжение на затворе	4

По рассчитанной величине тока был подобран высокоскоростной драйвер MOSFET TC4420EP с одним выходом и неинвертирующей конфигурацией. Он оснащен входами с TTL/CMOS совместимостью, которыми можно управлять напряжениями VDD 0.3В или -5В без повреждений. Это устраняет необходимость в наличии внешних схем переключения уровней. Выход обладает полным размахом напряжений, что обеспечивает лучшие границы напряжения привода, особенно во время включения/выключения питания. Время задержки распространения составляет всего лишь 55 нс, а время нарастания и спада выхода составляет всего 25 нс, что типично для затвора емкостью 2500 пФ в используемом диапазоне питания. Данный драйвер оснащен:

- Защита защелкой - выдерживает обратный выходной ток до $>1.5A$;
- Вход логики напряжением до 5В;
- Согласованное время нарастания и спада;
- Размах выходного напряжения в пределах 25мВ от земли или VDD;
- Возможность управления нагрузкой высокой емкости (до 10000пФ);
- Низкий импеданс на выходе 2.5Ом.

Технические данные стабилизатора напряжения L7812ABV приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Технические параметры L7812ABV

Параметры, единицы измерения	Значения
Полярность	положительная
Тип выхода	фиксированный
Количество выходов	1
Выходное напряжение, В	12
Максимальный ток нагрузки, А	1.5
Падение напряжения при I _{вых} , В (А)	2(1)
Максимальное входное напряжение, В	35

Технические данные оптопары FOD817C (PC817C) приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические параметры оптопары с транзисторным выходом

Параметры, единицы измерения	Значения
Количество каналов	1
Напряжение изоляции, кВ	5
Максимальный прямой ток, мА	50
Максимальное выходное напряжение, В	35
Время включения/выключения, мкс	4...3

Для измерения высоты подвешивания использованы светодиод и фоторезистор номинальным сопротивлением 10 кОм, движущиеся в изолированной от света трубке. В корпусе системы светодиод закреплен неподвижно, а фоторезистор перемещается совместно с электромагнитом. Чтобы с увеличением зазора освещенность фоторезистора изменялась сильнее, необходимо приблизить фоторезистор к светодиоду, но не ближе чем расстояние между электромагнитом и направляющим рельсом. Чтобы при малом расстоянии до источника света освещенность фоторезистора находилась в его рабочих пределах, необходимо ограничить ток светодиода величиной 0,4 мА. Система управления измеряет напряжение на фоторезисторе в условных единицах. По полученным значениям может быть вычислен воздушный зазор.

Принцип работы всей системы модели осуществляется в следующем, на катушку электромагнита подается напряжение с источника питания, после чего протекающий по катушке ток создает электромагнитную силу в сталь-

ном сердечнике, которая притягивает электромагнит к стальной балке. Ток в катушке регулируется с помощью транзистора, который управляется через драйвер, подключенный к оптопаре, микроконтроллером с защитой в нем программой ШИМ – модуляции. При увеличении зазора между электромагнитом и стальной балкой, коэффициент заполнения ШИМ увеличивается, тем самым увеличивая ток в катушке и соответственно электромагнитную силу. При уменьшении зазора, коэффициент заполнения ШИМ уменьшается. Данные о расстоянии между электромагнитом и стальной балкой, они представляют обратную связь, передаются по средствам измерения напряжения на фоторезисторе в микроконтроллер. Питание драйвера осуществляется источником питания 30 В через стабилизатор напряжения в 12 В. Микроконтроллер запитан от стороннего источника, либо через шнур от персонального компьютера, либо через батарею напряжением в 5 В. Соответственно питание на фоторезистор и светодиод осуществлено от микроконтроллера.

В микроконтроллер Arduino UNO, характеристики которого приведены в таблице 3.5, записана программа управления током электромагнита с помощью ПИД - регулятора с обратной связью по зазору.

Таблица 3.5 – Характеристики микроконтроллера Arduino UNO

Параметры, единицы измерения	Значения
Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	14 (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	6
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
Флеш-память	32 Кб (ATmega328) из которых 0.5 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактовая частота	16 МГц

Данная физическая модель электромагнитного подвеса представлена на рисунках 3.12-3.13.

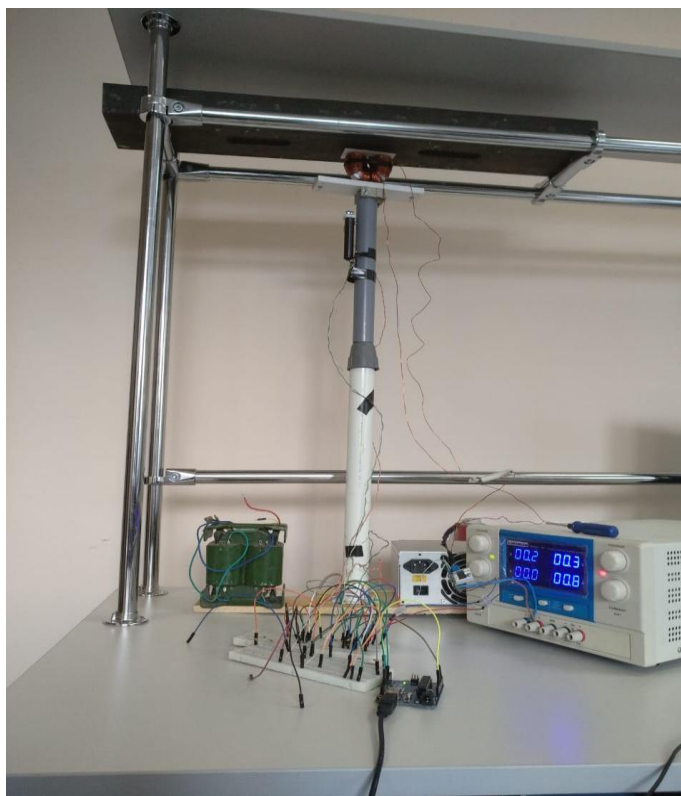


Рисунок 3.11– Физическая модель электромагнитного подвеса

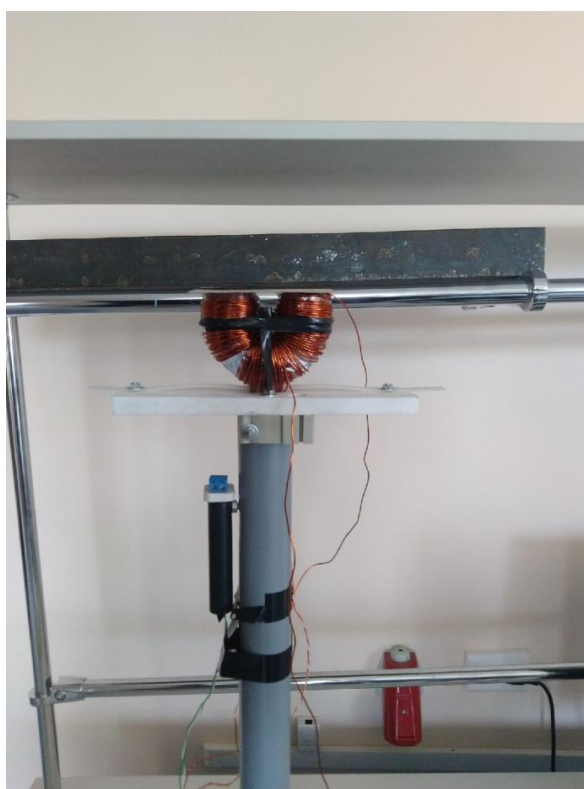


Рисунок 3.12 – Физическая модель электромагнитного подвеса

Код, записанный для управления системой электромагнитного подвеса в микроконтроллер Arduino UNO, представлен в приложении А.

Собрана экспериментальная модель электромагнитного подвешивания. Исследовано изменения коэффициента заполнения ШИМ от времени при различных коэффициентах ПИД-регулятора. Так же получен график отклонения действительного воздушного зазора от его желаемого значения, изображен на рисунке 3.14.

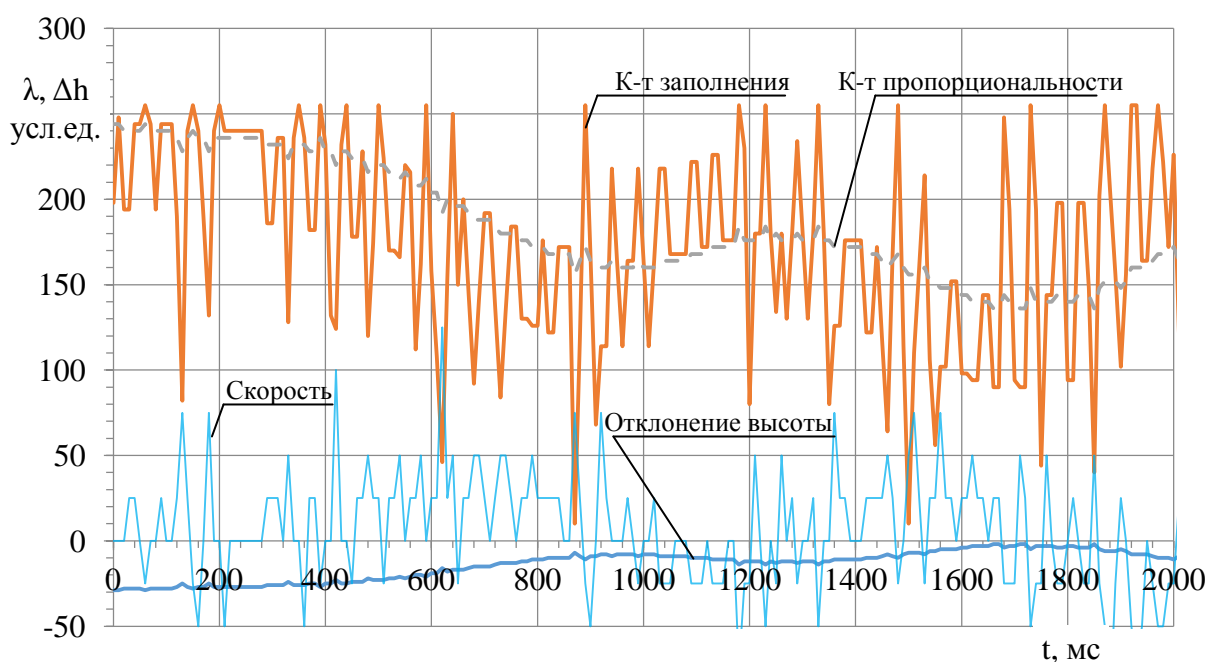


Рисунок 3.14 – Изменения коэффициента заполнения ШИМ и отклонения высоты от времени

В управляющей программе коэффициент заполнения ШИМ измеряется в условных единицах. Полностью открытому транзистору соответствует уровень 255 единиц. Проведено множество опытов с системой электромагнитного подвешивания, один из которых с оптимальными данными сведен в таблицу 3.6.

В установившемся состоянии магнит совершает колебания относительно средней высоты подвеса с периодом 700 мс и амплитудой 10 условных единиц, что соответствует отклонению на 1 мм.

Таблица 3.6 – Результаты опыта

Коэффициент заполнения	Высота воздушного зазора, усл.ед	Скорость изменения высоты воздушного зазора	Коэффициент пропорциональности
198	29	0	244
248	29	0	244
194	28	0	240
194	28	25	240
244	28	25	240
244	28	0	240
255	29	-25	244
244	28	0	240
194	28	0	240
244	28	25	240
244	28	0	240
244	28	0	240
190	27	25	236
82	25	75	228
240	27	25	236
255	28	-25	240
240	27	-50	236
190	27	0	236
132	25	75	228
240	27	0	236
255	27	0	236
240	27	-50	236
240	27	0	236
240	27	0	236
240	27	0	236

Исследована зависимость потребляемой мощности от массы поднимаемого груза, график которой изображен на рисунке 3.15. Несмотря на то, что фактический рабочий ток установки близок к расчетному, получена удельная мощность 80 – 100 Вт/кг для массы поднимаемого груза 0 и 220 г соответственно. Завышенные значения удельной мощности объясняются тем, что необходимо введение дополнительного сопротивления для снижения постоянной времени и достижения устойчивой работы контроллера. А также завышенная мощность модели электромагнитного подвеса по сравнению с

предварительным расчетом вызвана допущением, не учитывающим потери в стали и потери краевые эффекты рассеивания.

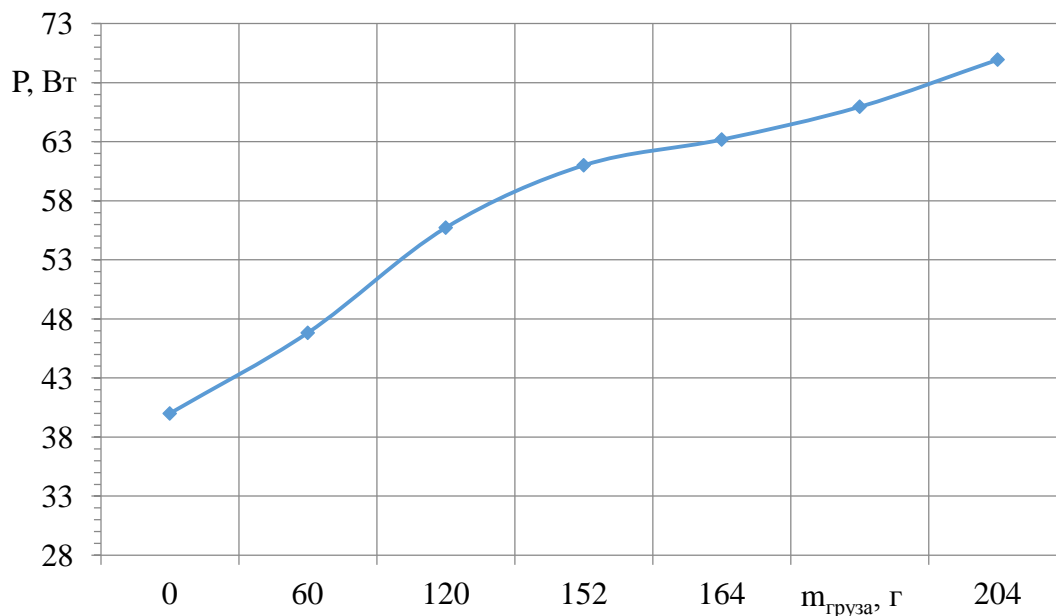


Рисунок 3.15 – График изменения затрачиваемой электромагнитом мощности от массы дополнительного груза

Полученные данные сведены в таблицу 3.7 с применением расчетных формул 2 главы и приведены графики их зависимости на рисунке 3.16-3.17.

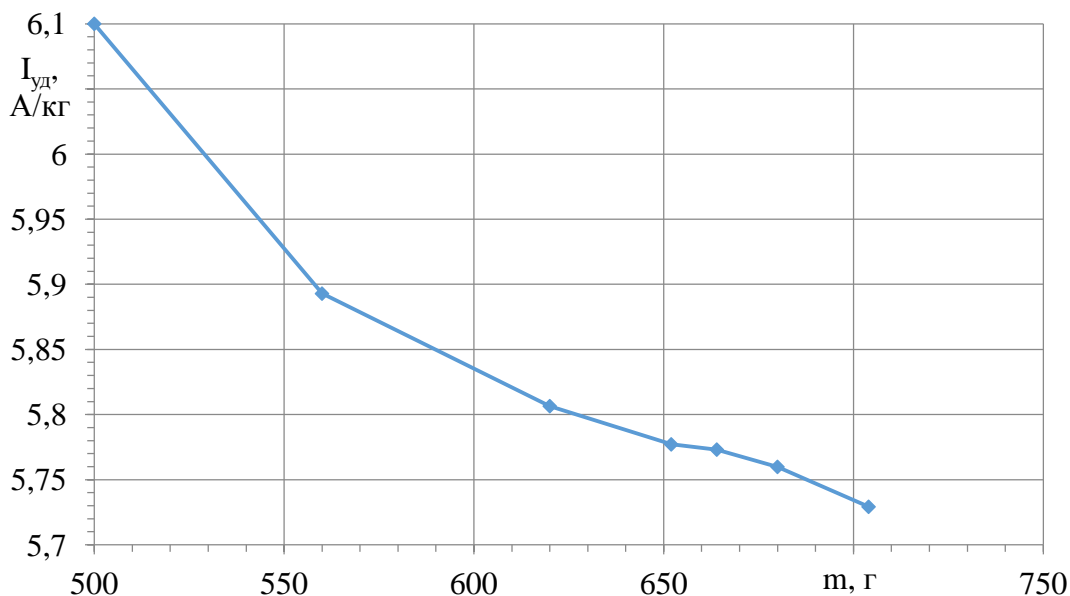


Рисунок 3.16 – График изменения удельного потребления тока от массы электромагнита с дополнительным грузом

Таблица 3.7 – Результаты опыта с измерением падения напряжения на резисторе

Масса, г	Падение напряжения на резисторе, В	Сопротивление, Ом	Ток, А	Мощность, Вт	Удельный ток, А/кг	Удельная мощность, Вт/кг
500	9,15	4,3	3,05	40	6,1	80
560	9,9	4,3	3,3	46,8	5,9	84
620	10,8	4,3	3,6	55,7	5,8	89,88
652	11,3	4,3	3,8	61	5,8	93,57
664	11,5	4,3	3,8	63,19	5,8	95,16
680	11,75	4,3	3,9	66	5,7	97
704	12,1	4,3	4	70	5,7	99

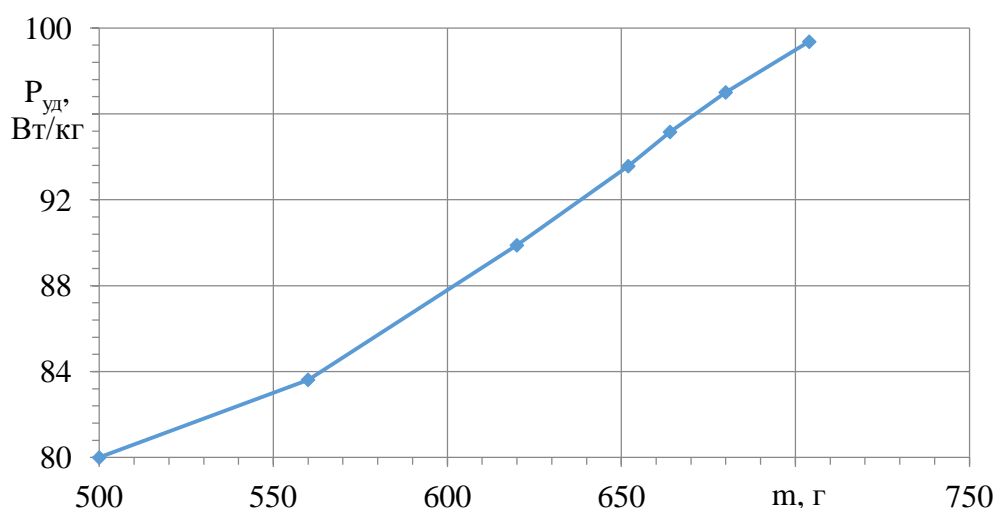


Рисунок 3.17 – График изменения удельной мощности от массы электромагнита с дополнительным грузом

Для проверки подъемной силы экспериментальной физической модели системы электромагнитного подвеса, в программе Femm построена ее модель. Все данные необходимые для ее построения взяты с данных реальной физической модели. На рисунке 3.18 показана физическая модель электромагнита в программе Femm.

Ток протекающий по катушке был взят равным 4 А, что соответствует в физической модели массе электромагнита с грузом равным 704 грамма. Данная система электромагнитного подвеса при таком токе находится в стабильном состоянии левитации. Это означает, что подъемная сила электро-

магнита составила, 7 Ньютон. В программе Femm для этой физической модели электромагнита подъемная сила составила, 10,26 Ньютон. Данное различие подъемной силы системы электромагнитного подвешивания физической модели объясняется в первую очередь потерей энергии в соединительных проводах и нагреве элементов деталей.

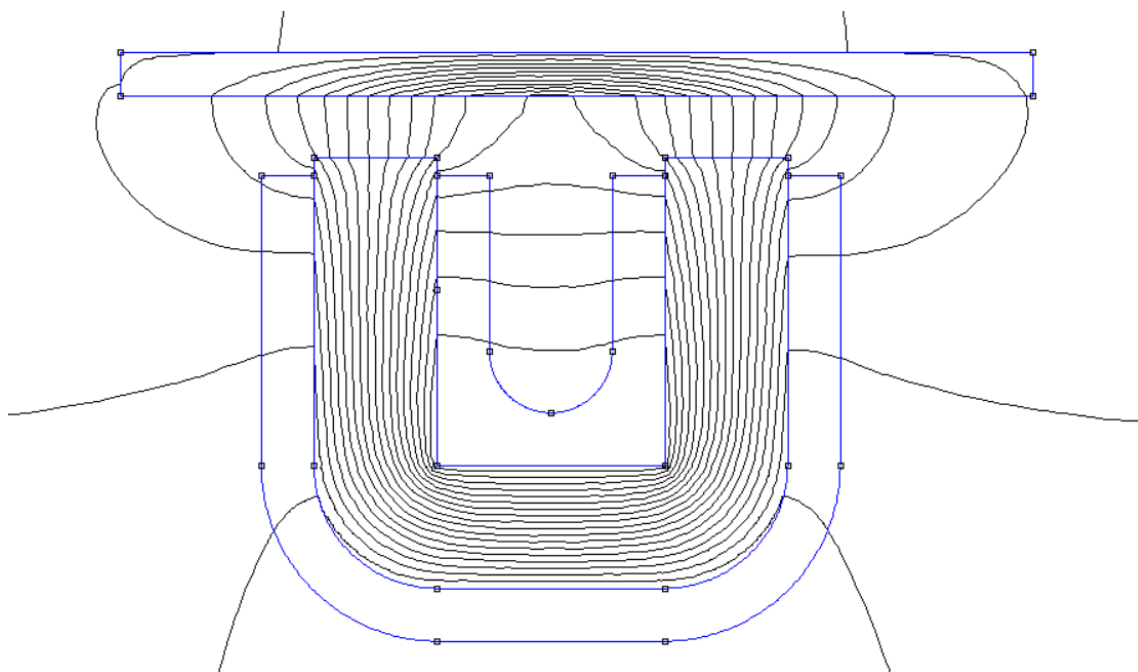


Рисунок 3.18 – Физическая модель электромагнита в Femm

3.3 Выводы

– Реализована модель системы магнитного подвеса в Simulink. Повторный расчет, выполненный на модели, подтвердил правильность определения основных параметров магнита;

– Собрана физическая модель системы электромагнитного подвеса. Проведены эксперименты энергопотребления данной системы при различных нагрузках. Также выполнена проверка данных результатов экспериментов с данными предварительного расчета и проведена проверка системы в программе Femm.

4 ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА ДЛЯ РЕАЛЬНОГО ПОЕЗДА

Существенным недостатком транспорта с EMS является высокое потребление энергии системой подвешивания и боковой стабилизации транспорта при прохождении поворотов. Сокращение энергопотребления может быть достигнуто оптимизацией конструкции электромагнита и системы управления. Боковая стабилизация осуществляется тем же электромагнитом. Для исследования характеристик электромагнита необходимо выполнить его моделирование в программе FEMM.

В программе FEMM был построен электромагнит, в котором сердечник имеет ширину 50 мм, длину 800 мм, выполнен из электротехнической стали Э41. Катушка индуктивности электромагнита выполнена из круглого медного провода сечением $5,26 \text{ мм}^2$ с количеством витков равным 281 и протекающим по ней током 70 А. Данный электромагнит способен развивать подъемную силу в 37,3 кН, который изображен на рисунке 4.1 с линиями магнитного потока, построенного в программе FEMM. На рисунке 4.2 изображена структура системы электромагнитного подвеса на поезде с боковой стабилизацией, осуществленной совместно с подъемным электромагнитом.

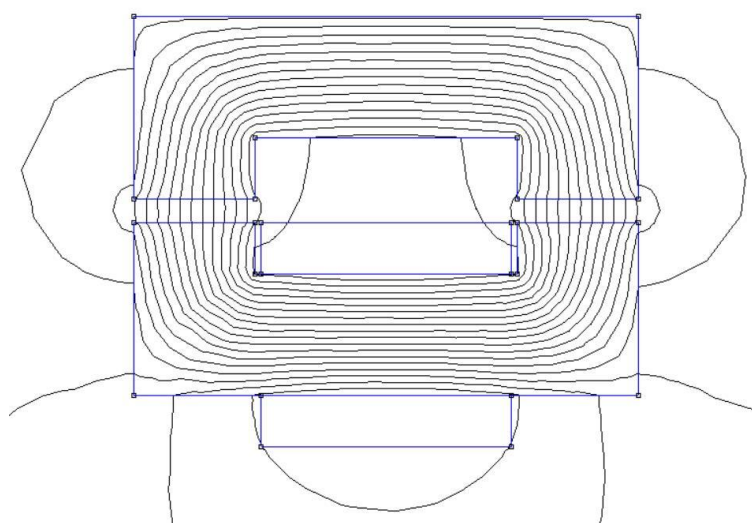


Рисунок 4.1 – Электромагнит с линиями магнитного потока

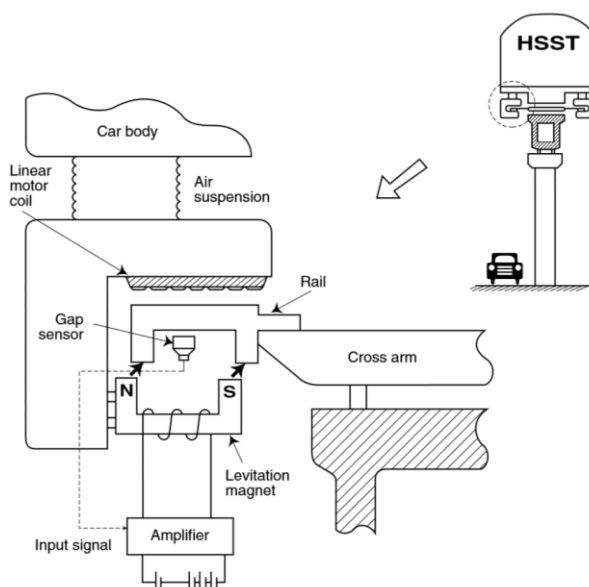


Рисунок 4.2 – Структура системы электромагнитного подвеса

В данной работе рассматривалось несколько изменений формы магнитопровода, это изменение отношения длины обмоточного пространства к его высоте и влияние наличия полюсного наконечника на подъемную силу. В ходе исследования было получено, что при уменьшении отношения длины обмоточного пространства к его высоте, подъемная сила также уменьшалась. Это связано с тем, что возрастали потоки рассеяния между двумя полюсами электромагнита. Существенное увеличение этого отношения приводит к увеличению габаритов, массы электромагнита и неэффективному использованию пространства на подвижном составе. В итоге оптимальным отношением длины обмоточного пространства к его высоте равняется 5, как и показано на рисунке 4.1. Наличие полюсного наконечника также привело к незначительному уменьшению подъемной силы на 300 Н.

4.1 Угол наклона путевой структуры

При прохождении поворотов поезда на магнитном подвесе возникает центробежная сила, которая вытесняет поезд за пределы путевой структуры. Первым этапом проведено исследование максимального бокового смещения электромагнита. Было получено, что при боковом смещении в 8 мм, боковая сила составляет 2889 Н, а подъемная сила - 35760 Н, что допустимо при мас-

се поезда приходящейся на один электромагнит 3,5 тонны. При дальнейшем увеличении смещения, подъемная сила уменьшается, что приводит к дестабилизации воздушного зазора между электромагнитом и направляющим рельсом.

Вторым этапом произведен расчет скорости прохождения поворота при различных его радиусах. При расположении путевой структуры под углом, противодействовать центробежной силе способствует сила тяжести. Проекция силы тяжести будет соответствовать максимально возможной боковой силе электромагнита, как показано в формуле (4.1).

$$k_3 \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha = F_{x.max}, \quad (4.1)$$

где $k_3=1.4$ – коэффициент запас;

$m=3500$ кг – масса поезда приходящая на один электромагнит;

g – ускорение свободного падения;

α – угол наклона путевой структуры;

$F_{x.max}=2889$ Н – боковая сила электромагнита.

На основании формулы 1, получен угол наклона путевой структуры в 3.5° . Для расчета скорости прохождения поворотов применена формула (4.2).

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha + F_{x.max} = \frac{m \cdot v^2}{R}, \quad (4.2)$$

где v – скорость поезда; R – радиус поворота.

На основании формулы (4.2) составлена таблица 4.1 при различных радиусах поворота.

Таблица 4.1 – Зависимость скорости поезда от радиуса поворота

Радиус поворота, м	Скорость, км/ч
30	23
80	38
200	60
500	96
800	121

4.2 Выводы

– Были получены оптимальные геометрические размеры электромагнита, при которых развилась подъемная сила 37.3 кН, также было показано, что наличие полюсного наконечника снижает подъемную силу;

– Найден оптимальный угол наклона путевой структуры 3.5° , при котором поезд способен развивать скорость 96 км/ч при радиусе поворота 500 м не снижая подъемную силу ниже допустимой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ актуальности применения магнитного подвеса, рассмотрены различные схемы его конструкции, а также установлены основные научные проблемы, связанные с созданием магнитного подвеса.

2. Проведен предварительный расчет для системы электромагнитного подвеса, установленной на реальном вагоне поезда. На основании формул этого расчета, были получены параметры для создания физической модели электромагнита. А также этот расчет был повторен для проверки результатов эксперимента на физической модели.

3. Для исследования процессов энергопотребления и стабилизации воздушного зазора было произведено имитационное моделирование в прикладной программе MATLAB Simulink. Особенностью реализованной модели является использование обратной связи для определения величины магнитного потока. На созданной модели определены параметры регулятора тока, обеспечивающего постоянный воздушный зазор.

Собрана экспериментальная модель электромагнитного подвешивания. Исследовано изменения коэффициента заполнения ШИМ от времени при различных коэффициентах ПИД-регулятора. Получена зависимость отклонения действительного воздушного зазора от его желаемого значения. Исследовано энергопотребление системы, которое составляет 80-100 Вт/кг, в зависимости от прилагаемой на систему нагрузки. Проведена проверка экспериментальной модели в программе Femm.

4. Исследована зависимость изменения геометрических размеров электромагнита на энергопотребление системы электромагнитного подвеса. Осуществлен подбор оптимальных геометрических параметров для электромагнита, установленного на реальном вагоне поезда, в программе Femm. Произведен расчет оптимального угла наклона путевой структуры по отношению к горизонтальной плоскости, который равен 3.5° , при котором поезд

способен развивать максимальную скорость при различных радиусах поворота, не снижая подъемную силу ниже допустимой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поезд на магнитной подушке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/3563000/> – загл. с экрана.
2. Поезд на магнитном подвесе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vse-elektrichestvo.ru/novosti/poezda-na-magnitnom-podvese.html> – загл. с экрана.
3. Маглев, или поезд на магнитных подушках – транспорт нового уровня [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ekoenergia.ru/ecotransport/poezd-maglev-magnitoplan.html> – загл. с экрана.
4. Поезда на магнитных подушках - Маглев. Как работает? Рекорд скорости. Из серии "Перспективный высокоскоростной транспорт". [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cont.ws/@dmitri1967/220321> – загл. с экрана.
5. Поезда на магнитной подушке – транспорт, способный изменить мир [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itc.ua/articles/poezda-na-magnitnoy-podushke-transport-sposobnyiy-izmenit-mir/> – загл. с экрана.
6. Поезда на магнитных подушках - это транспорт будущего? Как работает поезд на магнитной подушке? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fb.ru/article/165360/poezda-na-magnitnyih-podushkah---eto-transport-buduschego-kak-rabotaet-poezd-na-magnitnoy-podushke> – загл. с экрана.
7. Линейный двигатель - Linear motor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.qwe.wiki/wiki/Linear_motor – загл. с экрана.
8. О поездах на магнитной подвеске [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bourabai.ru/toe/maglev.htm> – загл. с экрана.
9. Магнитоплан M-Bahn [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://transphoto.org/articles/3653/> – загл. с экрана.
10. The world's first maglev lines that no longer operate [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.maglev.net/worlds-first-maglev-lines-no-longer-operate> – загл. с экрана.

11. Шанхайский Маглев поезд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chinahighlights.ru/culture/maglev-train.htm> – загл. с экрана.
12. Linimo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.japanvisitor.com/japan-transport/linimo> – загл. с экрана.
13. Incheon airport maglev train [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.seoul-airport.com/maglev.php> – загл. с экрана.
14. Магнитные железные дороги в Китае – еще один повод для гордости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.artchina.ru/articles/magnitnye-zheleznyye-dorogi-v-kitae/> – загл. с экрана.
15. Пекинский маглев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пекинский_маглев – загл. с экрана.
16. Китай к 2019 году разработает низкоскоростной поезд на магнитной подушке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.interfax.ru/world/619745> – загл. с экрана.
17. В Китае реализуют два новых проекта маглев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/v-kitae-realizuyu-dva-novykh-proekty-maglev/> – загл. с экрана.
18. Синкансен [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hsrail.ru/aboutsr/trains/Shinkansen/> – загл. с экрана.
19. Kireev A.V., Kozhemyaka N.M., Kononov G.N. Comparison between a Maglev Electromagnetic Suspension System and a Hybrid Suspension System Equipped With Permanent Magnets // International Journal of Applied Engineering Research – 2017. – Vol. 12, No.18. pp.7219-7224.
20. Long Z., Wang Z., Cheng H., Li X. A Novel Design of Electromagnetic Levitation System for High-Speed Maglev Train // Transportation Systems and Technology – 2018. – Vol. 4, No.3. pp. 212-224.
21. Guanchun L., Zhen J., Guang H. and Jie L. Analysis of eddy current induced in track on medium-low speed maglev train // School of Engineering Research Center of Maglev Technology – 2017.

22. Yim B. H. Curving Performance Simulation of an EMS-type Maglev Vehicle // *Vehicle System Dynamics* – 2009. – Vol. 47, No.10, pp.1287–1304.
23. H. S. Han , B. H. Yim , N. J. Lee, Y. J. Kim Prediction of ride quality of a Maglev vehicle using a full vehicle multi-body dynamic model // *Vehicle System Dynamics* – 2009. – Vol. 47, No.10, pp.1271-1286.
24. Jong-Boo H., Hyung-Suk H., Sung-Soo K., Seok-Jo Y., Ki-Jung K. Design and validation of a slender guideway for Maglev vehicle by simulation and experiment // *Vehicle System Dynamics* – 2016. Vol. 54, No.3, pp.370-385.
25. Линейные двигатели нового поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://electroprivod.ru/linear_public.htm – загл. с экрана.
26. Shin B. C. Progress of Urban Maglev Program in Korea // *Proc. of 9th World Congress on Railway Research* – May 2011.
27. Бочаров В. И. Основы проектирования электроподвижного состава с магнитным подвесом и линейным тяговым электроприводом / В. И. Бочаров, Ю. А. Бахвалов, И. И. Талья // Ч. 1. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. унта, 1992. – 432 с.
28. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе: монография / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова // – СПб.: ПГУПС, 2011. – 160 с.
29. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов/ П.В. Сахаров // – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
30. Jong-Boo H. Design and Validation of a Slender Guideway for Maglev Vehicle by Simulation and Experiment // *Vehicle System Dynamics* – 2016. Vol. 57, No.3, pp.370-385.
31. Ярославцев М. В. Исследование подъемной и боковой сил магнита транспортного средства на электромагнитном подвесе / М. В. Ярославцев, Р. Н. Латышев // *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Нац. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвящ. 20-летию создания кафедры электроэнергетики, Тюмень, 18–20 дек. 2019 г.:* в 2-

х т. – Тюмень : Изд-во ТИУ, 2019. – Т. 2. – С. 384–386. - ISBN 978-5-9961-2250-9.

32. Ярославцев М. В. Исследование подъемной и боковой сил магнита транспортного средства на электромагнитном подвесе / М. В. Ярославцев, Р. Н. Латышев // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Нац. с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посвящ. 20-летию создания кафедры электроэнергетики, Тюмень, 18–20 дек. 2019 г.: в 2-х т. – Тюмень : Изд-во ТИУ, 2019. – Т. 2. – С. 384–386. - ISBN 978-5-9961-2250-9.

33. Ярославцев М. В. Исследование энергии потребляемой системой электромагнитного подвешивания / М. В. Ярославцев, Р. Н. Латышев, Е. А. Земляков // Интеллектуальный потенциал Сибири : сб. ст. 27 регион. науч. студ. конф., Новосибирск, 23–25 сент. 2019 г. : в 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 3. – С. 280–286. - 50 экз. - ISBN 978-5-7782-4053-7.

34. Ярославцев М. В. Имитационная модель транспортного средства на электромагнитном подвесе = Simulation model of a vehicle with electromagnetic suspension / М. В. Ярославцев, Р. Н. Латышев, Е. А. Земляков // САПР и моделирование в современной электронике : сб. науч. тр. 3 междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 24–25 окт. 2019 г. – Брянск : БГТУ, 2019. – С. 210–213. - 100 экз. - ISBN 978-5-907271-06-7. - DOI: 10.30987/conferencearticle_5e0282128ae520.40347277.

35. Ярославцев М. В. Модель системы электромагнитного подвешивания / М. В. Ярославцев, Р. Н. Латышев, Е. А. Земляков // Интеллектуальный потенциал Сибири : сб. науч. тр. 27 регион. науч. студ. конф., Новосибирск, 23–25 сент. 2019 г. : в 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 252–254. - 50 экз. - ISBN 978-5-7782-4022-3.

36. Zemlyakov, E. A. Issues of creating a public transport on electromagnetic suspension / E. A. Zemlyakov., M. V. Yaroslavtsev. – Текст : непосредст-

венный // *Aspire to Science* : материалы междунар. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск, 2019. – С. 317–321.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Код программы для управления системой электромагнитного подвеса

```

#include <PWM.h>

// Определение констант:
#define flight_time 2000           // Длительность полета, мс
#define height_rel 160            // Желаемый зазор, усл. ед.
#define kp 0.2                    // К-т ОС пропорциональный
#define kd 450                    // К-т ОС дифференциальный
#define tau 0.1                   // Пост времени магнита, усл. ед.
char state = 0;

// Состояние системы: 0 - подготовка, 1 - работа, 2 - отключение
int d_rel;                        // Зазор в относительных единицах (0-1024)
int d_rel0, d_rel00, d_rel000, d_rel0000; // Зазор на предыдущем шаге
long t_off;                       // Время отключения, мс
int dist[350];
int outp[350];
int i=0;
int up, ui, ud;                   // выходы ПИД-регулятора:  $up = up + ui + ud$ 
int d_des = height_rel; // желаемый зазор, усл. ед.
int dd0, dd1;                    // разности желаемого и действительного значений
// Настройка (однократно выполняемые команды):
void setup() {
  InitTimersSafe();
  pinMode(A1, INPUT); // Чтение обратной связи (зазор)
  pinMode(9, OUTPUT); // Команда управления (ШИМ для MOSFET)
  SetPinFrequency(9, 1000);
  digitalWrite(9, HIGH); // Отключение силовой цепи
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Start");
  delay(200);
  d_rel = analogRead(A1);
}

```

```

// Главный рабочий цикл:
void loop() {
  // Выбор режима работы:
  if ((state==0) && (d_rel < 190)) {
    // Подъем, начало отсчета времени полета:
    Serial.println(d_rel);
    state = 1;
    t_off = millis() + 3500;
  }
  if ((state == 1) && (millis() > t_off)) {
    // Время полета истекло, отключение системы питания:
    state = 2;
    digitalWrite(9, HIGH);
    // Вывод сохраненных данных на экран:
    for (int j=0; j<20; j++) {
      Serial.println(" ");
    }
    Serial.print(i);
    Serial.println("_results");
    Serial.println(" ");
    for (int j=0; (j<400)&&(j<i); j++) {
      Serial.print(outp[j]);
      Serial.print("_");
      Serial.println(dist[j]);
    }
    Serial.println("Finish");
  }
  // Работа ПИД – регулятора обратной связи в режимах 0 и 1:
  if (state < 2) {
    // Контроль зазора:

```

```

d_rel0000 = d_rel0;
d_rel000 = d_rel0;
d_rel00 = d_rel0;
d_rel0 = d_rel;          // предыдущая координата для расчета скорости
d_rel = analogRead(A1);
dd0 = d_des - d_rel;     // Отклонение высоты от равновесия
dd1 = d_rel0000 - d_rel; // Приращение высоты = скорость
ui += 0.02 * dd0;
up = 128 + 4 * dd0 + 50 * dd1 + ui;
if (up < 0) up = 0;
if (up > 255) up = 255;
pwmWrite(9, up);
delay(1);
}
// ВЫВОД ДАННЫХ:
if (state == 0) {
  Serial.println(d_rel);
}
if ((state == 1) && (i < 350)) {
  /*Serial.print(up)939;
  Serial.print("_");
  Serial.println(d_rel);*/
  dist[i] = dd0;          // Сохранение в массив
  outp[i] = up;
  i++;
  if (i==350) {
    Serial.println(t_off + flight_time - millis());
  }
}
}
}

```