

Аннотация

Объём 54 с., 32 рис., 20 источников

МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС, МАГНИТНАЯ ЛЕВИТАЦИЯ

Объектом исследования является установка магнитного надвеса.

Цель работы — является изучение и проектирование магнитного надвеса.

Задачи работы:

- Обзор существующих решений;
- Разработка электрической принципиальной схемы;
- Подбор элементов для реализации макета;
- Сборка макета установки магнитного надвеса;
- Наладка работы установки;
- Экспериментальные расчёты.

Работа состоит из четырёх глав, в которых решены поставленные задачи.

Для теоретических расчётов и проектирования работы макета использовались программные пакеты Elcut 5.1 и Altium Designer

Степень внедрения: разработанная установка является опытным образцом

Области применения данной установки механика, энергетика, приборостроение, космическая отрасль, транспортная сфера.

Содержание

Введение	4
1 Основные теоретические сведения по установке магнитного надвеса	6
1.1 Понятия установки магнитного надвеса.....	6
1.2 Классификация электромагнитных подвесов.....	10
1.2.1 Надвес с постоянными магнитами.....	11
1.2.2 Диамагнитный подвес.....	13
1.2.3 Электромагнитный подвес с нерегулируемыми электромагнитами.....	14
1.2.4 Сверхпроводящий надвес	14
1.2.5 Индукционный подвес	15
1.2.6 Кондукционный подвес	17
1.2.7 Электромагнитный подвес с резонансной цепью (пассивные магнитные подвесы).....	18
1.2.8 Активные магнитные подвесы.....	20
1.2.9 Активные электростатические подвесы.....	22
1.2.10 Пассивный электростатический подвес (электростатический резонансный подвес).....	23
1.2.11 Комбинированные подвесы	24
2 Разработка и расчёт принципиальной электрической схемы установки магнитного надвеса.....	27
2.1 Разработка и расчёт схемы	20
2.2 Структурная модель	30
2.3 Математическая модель.....	34
2.4 Расчёт электромагнитов.....	36
3 Расчёт магнитных полей	40
4 Практическая реализация проекта	47
Заключение	52
Список литературы.....	53

Введение

Объектом исследования данной бакалаврской работы является установка магнитного надвеса. В наше время использование установок на магнитных надвесах набирает свою популярность в технологической сфере. Установка служит для взвешивания объекта в пространстве под действием сил магнитного поля, преодолевая силу притяжения, и нахождение тела в определённой точке равновесия без какого либо механического контакта. Существует множество различных вариаций подобных конструкций.

Первые примеры практического применения магнитных надвесов в сороковых годах двадцатого столетия были получены в измерительных приборах. Их развитием и проведение исследования занимались известные ученые: Д. Хризингер и Д. Бимс (США), А.С. Эдельштейн и О.Г. Кацнельсон (СССР). Первый активный магнитный подшипник был представлен и опытным путём изучен в 1960 году Р. Сиксмитом (США). Обширное практическое использование активных магнитных подшипников за рубежом и в нашей стране началось в начале семидесятых годов двадцатого века и сейчас используется в таких областях науки и техники как: точные измерительные приборы, космические и ядерные установки, роботы, текстильные машины, железнодорожный транспорт, турбины и насосы в вакууме, двигатели и т. д. [5].

Цель данной работы – рассмотреть принцип реализации установки магнитного надвеса. Поставленная в работе цель определяет необходимость решения следующих задач:

1. Изучить основные теоретические данные по данной теме;
2. Рассмотреть различные конструкции магнитных надвесов;
3. Ознакомиться с принципами их действий;
4. Исследовать методы расчета;
5. Разработать принцип работы установки магнитного надвеса;
6. Создать конструкцию установки.

Объектом исследования является магнитный надвес, предметом – принципы реализации установки.

Теоретическое значение работы заключается в дальнейшей разработке актуальных вопросов установки, практическое – в возможности использования материалов на практических занятиях по промышленной электронике, на лекциях по магнитным элементам электронной техники и при написании курсовых и выпускных квалификационных работ.

Цель и задачи работы определили её структуру. Она состоит из введения, четырёх глав и заключения. Работа содержит также выводы по главам, список использованной литературы и приложения.

Материалом для исследования послужили неодимовые редкоземельные магниты, электромагниты, датчики Холла, оптопара и электронные компоненты.

1. Основные теоретические сведения по установке магнитного надвеса

1.1 Понятия установки магнитного надвеса

В работе разбираются теоретические и технические вопросы магнитной левитации – то есть преодоление силы тяжести, направленной на материальный предмет, с помощью воздействия на него магнитного поля. Левитацию, возможно, получить различными способами – в частности за счёт сил, возникающих в магнитном поле. Левитацию этого вида называют магнитным надвесом, когда тело, имеющее вес, находится над магнитным полем. Отсутствие механического соединения в опоре существенно снижает или почти полностью устраняет силу трения. Это открывает возможности использования магнитного надвеса в самых всевозможных областях науки и техники.

Применение магнитного надвеса существенно повышает точность измерений и открывает возможности для разработки многочисленных принципиально новых приборов для измерения силы тяжести и прочих сил, давления, плотности, расхода жидкостей и газа и т.п. Магнитный подвес позволяет значительно уменьшить погрешность гироскопов и создать сверхчувствительные акселерометры.

Магнитный надвес может быть применён для изучения тех задач, где механический контакт нежелателен, так как искажают природу исследуемого явления. Широкие возможности показывает применение магнитного надвеса при балансировке различных узлов машин и роторов [6].

Одним из новых и перспективных направлений применения магнитного подвеса в развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта – поезда на магнитной подушке. Разработки этого вида транспорта начались в начале прошлого века. Патент на высокоскоростную на транспортировку предоставили различные изобретатели во всем мире. Один из первых патентов США для линейного двигателя поезда принадлежит немецкому изобретателю Альфреду Зендену. Изобретатель получил американский патент US 782312 (14 февраля 1905) и US RE12700 E (21 августа 1907 года). В 1907 году, другая, одна из первых,

электромагнитных систем для транспортировки была разработана Ф. С. Смит. Несколько немецких патентов, на поезда с системой магнитного левитирования, оснащенные линейными двигателями, были получены Германом Кемпер в период с 1937 по 1941 года. Первый поезд на магнитной подушке был описан в патенте US 3158765 А, "Магнитная система транспортировки", Дж. Р. Полгрин (25 августа 1959 года). Первое использование поезда на магнитной левитации в патенте США было в "Системе наведения магнитной левитации" Канадской научно-исследовательской организацией. Эмиль Бачелет, в Маунт-Верноне, штат Нью-Йорк, в 1913 году продемонстрировал прототип железнодорожного вагона с системой магнитного подвеса. Первая коммерческая линия, применяющая данный тип поездов, была открыта в 1984 году в Британии. Линия была не скоростная и в 1995 году линию закрыли, признав небезопасной.

С применением сверхпроводников в данной отрасли позволило перевести данный вид транспорта в высокоскоростной. На текущий момент такой вид транспорта, в основном, создаётся в Японии и Германии.

Лидером в скорости является Япония. Её поезд с магнитным подвесом установил рекорд – 580 км/ч в декабре 2003 года. Все тестирования новых технологий происходит на трассе протяженностью 18,4 км. Поезд левитирует в десяти миллиметрах от поверхности пути под действием электромагнита. Магниты расположены в самом составе и по бокам линии. В Японии программу поездов на магнитной подушке начала разрабатывать в шестидесятых годах прошлого века. Японские модели подобных поездов являются наиболее тихими и быстрыми, которым нет аналогов в мире.

Магнитные опоры, которые используются в металлургии, способствуют выявлению нежелательных химических и прочих взаимодействий выплавляемых изделий из сплавов металла с материалом тигля. Магнитные опоры для бестигельной плавки позволяют выплавлять сверхчистые металлы в вакууме или любой другой инертной среде.

В магнитных опорах почти отсутствует трение, что позволяет подшипнику быть долговечным в эксплуатации. Это важно для обычных электроизмерительных приборов и машин (например, для счётчиков

электроэнергии) и особенно для аппаратуры космических кораблей и искусственных спутников Земли. Требования по точности, надежности и долговечности, предъявляемые к гироскопическим системам стабилизации космических аппаратов, очень высоки. Помимо уменьшения трения, приводящего к ошибкам системы ориентации в космическом пространстве, желательно иметь подшипник, сохраняющий работоспособность в условиях, когда перестает работать смазка механических подшипников, и из-за утечки газа невозможна работа газовых подшипников.

Магнитные подшипники – это ярчайший пример из сферы мехатроники. Они содержат в себя не только механические компоненты, но и электронные элементы (датчики, усилители мощности, регуляторы, и др.) и электромеханические преобразователи (электромагниты).

В связи с популяризацией и общедоступностью электронных компонентов и микропроцессорной техники, магнитные подшипники могут так же широко применяться, как и другие традиционные подшипники, что сделает их более выгодным решением классических проблем в машиностроении.

Магнитный подшипник без регулировки является непригодным к употреблению конструктивным элементом. Только в сочетании механики, датчиков, приводов, автоматического регулирования и обработки данных делает магнитный подшипник пригодным к применению, и раскрывают все его многочисленные преимущества.

На данный момент магнитные подшипники применяются в узких областях: используются в турбокомпрессорах и компрессорах для природного газа, водорода и воздуха, в вакуумной технике, в ветрогенераторах и электрогенераторах, в контрольном и измерительном оборудовании, в высокоскоростных фрезерных, полировальных и шлифовальных станках. В станках при применении магнитного подшипника, где шпиндель вращается со скоростью 30000 об/мин, возможна высокоскоростная обработка. А так же в турбомашинах, где при больших температурах магнитный подшипник обладает более продолжительным сроком службы, чем обычный подшипник.

Нужно подчеркнуть, что основные достоинства магнитного подшипника – отсутствие контакта и управляемая динамика.

Для получения левитации недостаточно одной лишь компенсации силы тяжести и других сил, действующих на тело. Положение равновесия, достигаемое при равенстве нулю суммы, действующих на тело сил, должно быть, кроме того, устойчивым. Началом исследования проблемы левитации, по-видимому, следует считать 1839 год. В этом году Ирншоу доказал теорему, являющейся следствием закона Гаусса, согласно которой невозможно устойчивое равновесие тела в силовом поле, в котором сила и расстояние связаны законом, обратным квадратичному. В 1939 году Браунбек рассмотрел систему тел, в которой действуют постоянные гравитационное, электрическое и магнитное поля. Согласно анализу Браунбека подвеска тела за счет сил магнитного поля при этом возможна лишь для тел, изготовленных из материала с относительной магнитной проницаемостью μ , меньшей единицы, т.е. диамагнетиков и сверхпроводников, у которых $\mu=0$. Это означает, что невозможен устойчивый подвес одного постоянного магнита в поле другого. Конечно, всегда можно подобрать пару магнитов, расположенных один над другим и обращенных друг к другу одноименными полюсами, так чтобы сила отталкивания полюсов компенсировала силу тяжести верхнего магнита. Подобное равновесие будет устойчивым по отношению к вертикальным перемещениям и неустойчивым по отношению к горизонтальным перемещениям. Таким образом, устойчивый надвес не получается, как это следует из анализа Ирншоу и Браунбека [9].

Устойчивый магнитный надвес можно получить, если применить автоматическое регулирование напряженности магнитного поля, так чтобы при изменениях положения тела обеспечивалась компенсация силы тяжести и других действующих на тело сил.

Устойчивый магнитный надвес допустим и в применении электродинамических взаимодействий, т.е. благодаря использованию сил взаимодействия магнитного поля и проводника с током или сил взаимодействия двух проводников с токами.

1.2 Классификация электромагнитных подвесов

Существует очень много работ, посвященных электромагнитной левитации тел. Один из первых источников содержащий систематический анализ возможных принципов левитации тел с применением электрических и магнитных полей был приведен в 1956 году А. Боердийком. В 1964 году П. Джерри составил библиографический обзор работ этого направления. На русском языке подробный обзор в 1968 году составил В.Б. Метлин. [5]

Различают два основных вида электромагнитных подвесов: Не регулируемые подвесы и подвесы с авторегулированием. Классификация электромагнитных подвесов изображена на рисунке 1.2.1.



Рисунок 1.2.1–Классификация электромагнитных подвесов.

1.2.1 Надвес с постоянными магнитами

Магнитные надвесы с постоянными магнитами являются одни из самых простых, в сравнении с другими электромагнитными надвесами, потому как магнитное поле вырабатывается постоянными магнитами. Эта категория магнитных надвесов имеет высокую экономичность, простоту изготовления и

большим сроком службы. Основными недостатками таких надвесов являются: небольшая удельная грузоподъемность, низкая механической прочности, необходимость в специальных демпферах.

Тело, подвешенное в магнитном поле, может содержать постоянный магниты и состоять частично или полностью из ферромагнитного материала. Надвес тела осуществляется в системе однополюсно направленных магнитов посредством силы отталкивания, а подвес предмета осуществляется в системе с ферромагнетиком или разнополюсной направленности магнитных полей – путем притягивания. Так как магнитные надвесы с постоянными магнитами являются простейшей конструкцией данного вида опор и не могут позволить выполнить устойчивое пространственную левитацию предмета, то их часто комбинируют вместе с магнитными надвесами относящихся к авторегулируемому типу. На постоянных магнитах невозможно создать устойчивую левитационную опору используя только магнитное поле. К данному выводу пришёл Ирншоу, составивший и доказавший теорему, последующие исследования Браунбека подтвердили эти выводы, которые показывают, что в поле постоянных магнитов устойчивая левитация возможна только тогда, когда магнитная проницаемость материала μ_0 меньше единицы (диамагнетик), либо равно нулю (сверхпроводник).

Распространенные материалы для производства постоянных магнитов являются бариевые и стронциевые магнитотвердые ферриты, редкоземельные магниты (неодим-железо-бор, Самарий-Кобальт) или металлокерамические и литые сплавы. Опоры с постоянными магнитами используются в измерительных приборах (таких как, счетчик электроэнергии), а так же для уменьшения нагрузки механических опор путём снижения трения.

На рисунках 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3 представлены магнитные подшипники на постоянных магнитах.

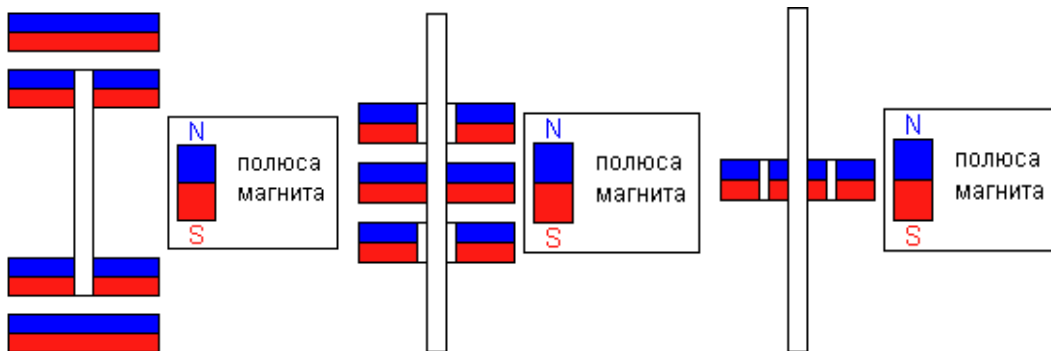


Рисунок 1.2.1–Радиальные магнитные подшипники из цилиндрических и кольцевых магнитов (намагниченных аксиально).

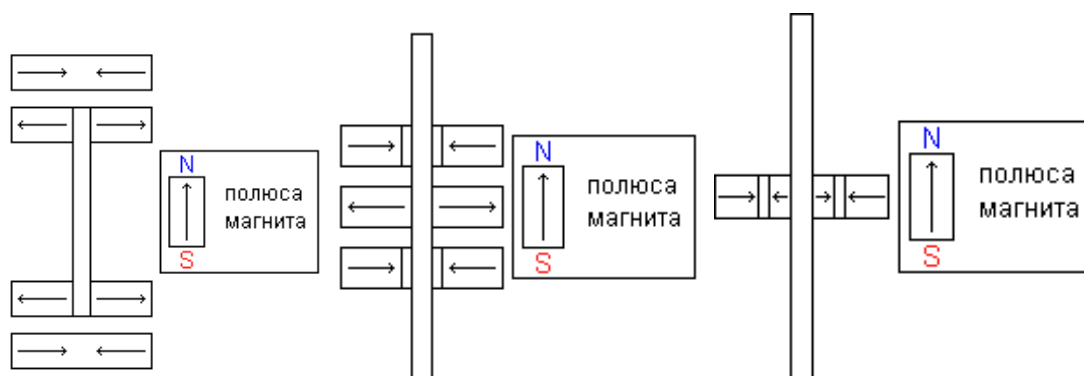


Рисунок 1.2.2 – Радиальные магнитные подшипники из цилиндрических и кольцевых магнитов (намагниченных радиально).

Все магнитные подшипники состоят из внешнего кольцевого постоянного магнита и внутреннего цилиндрического постоянного магнита, которые аксиально намагничены. Чтобы обеспечить стабильность вала в осевом направлении, используется шаровая опора. При помощи регулировочного винта выставляются расположение магнитов относительно друг друга, для того чтобы максимально уменьшилась нагрузка на опору и снизился момент трения [8].

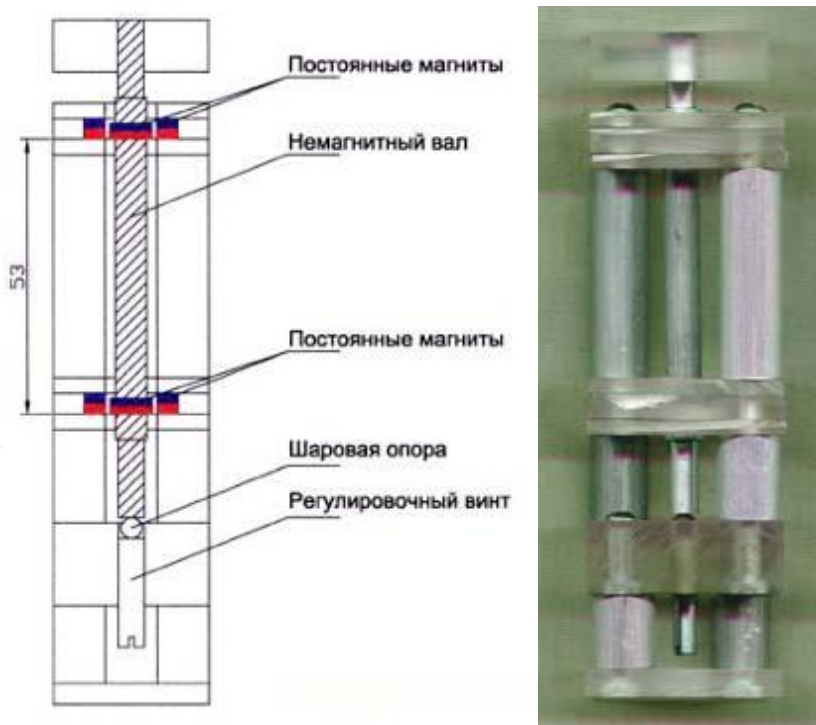


Рисунок 1.2.3 – Макет устройства с двумя пассивными радиальными магнитными подшипниками.

1.2.2 Диаманитный подвес

Вещества с магнитной проницаемостью $\mu \leq 1$, называются диамагнетиками. При отсутствии внешних магнитных полей диамагнетики не магнитны. При помещении диамагнетика в магнитное поле, его атомы приобретают магнитный момент, который пропорционален магнитной индукции B и направлен навстречу этому полю, как показано на рисунке 1.2.4. Диаманитный подвес имеет тот же характер, что и эффект Мейснера (вытеснение магнитного поля из материала).

Лучшими диамагнетиками являются висмут и пиролиитический графит. Для того чтобы надвесить висмут на высоту 2,5мм, необходимо изменение напряженности магнитного поля в $1,5 \cdot 10^6$ А/м. Таким образом, даже при больших напряженностях магнитного поля, высота надвеса буде очень мала. Поэтому диаманитные надвесы не получили должного распространения и применяются в основном в кинематических датчиках, акселерометрах, в датчиках определения мгновенных усилий [5].

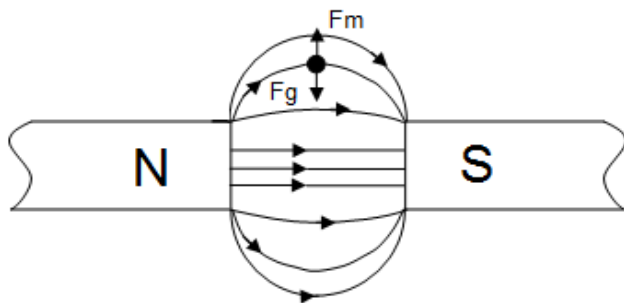


Рисунок 1.2.4 – Диаманитный подвес.

1.2.3 Электромагнитный подвес с нерегулируемыми электромагнитами

Магнитная левитация в установках с нерегулируемыми электромагнитами постоянного тока по воздействию на подвешиваемый предмет теоретически не отличаются от установки надвеса с постоянными магнитами, но технически позволяют достичь большую грузоподъемность в левитационной системе. Высокоскоростной транспорт на магнитной подушке является одной из основных сфер применения установок подвеса на нерегулируемых электромагнитах постоянного тока [5].

1.2.4 Сверхпроводящий надвес

При температуре близкой к нулю (около 4-18 К) некоторые металлы и сплавы достигают состояния сверхпроводника, при котором удельное сопротивление проводника постоянному току равно нулю. У сверхпроводников наблюдается полное или неполное выталкивание магнитного поля из структуры проводника, называемым эффектом Мейснера. При поднесении к сверхпроводнику постоянного магнита или электромагнита (обычного или сверхпроводящего) происходит выталкивание магнитных полей, так как магнитное поле не проходит сквозь сверхпроводящее тело, магнитному полю сопоставляется аналогичное поле в объеме сверхпроводника.

В сверхпроводящем надвесе при очень большом магнитном поле, достигшим определённого предельного значения напряжённости магнитного поля, сверхпроводник утрачивает свои сверхпроводящие качества. Поэтому в системе левитации на сверхпроводимости, также как и в электростатическом, имеется ограниченность в массе подвешиваемого тела. Тем не менее, у криогенного подвеса достаточно большая грузоподъемность, чем в электростатическом. Опоры из сверхпроводников не используют систему автоматического управления тока, что является их бесспорным преимуществом в отношении других систем магнитного левитирования. Такие опоры так же используются в высокочувствительных гироскопических устройствах и акселерометрах, во всяческих измерительных приборах, в подшипниках со сверхпроводящей опорой и обычных электрических двигателей. При развитии криогенной техники развивается и применение бесконтактных опор на сверхпроводниках.

Основные недостатки, связанные с осуществлением сверхпроводящего подвеса, это поддержание сверхнизких температур в установке и расходами энергии. А так же размеры и высокая стоимость затрат на содержание подобных систем не позволяют применять сверхпроводящие подвесы, как опорные системы [5].

1.2.5 Индукционный подвес

Основной принцип работы индукционного подвеса содержится в том, что подвешиваемое ферромагнитное электропроводящее тело, помещено в неоднородное высокочастотное магнитное поле, создаваемое катушками электромагнита. В электропроводящем теле за счет вихревых токов наводимым переменным полем, создаётся магнитная индукция совпадающее по направлению с основным полем, что создает магнитный надвес. Чем больше напряженность (или магнитная индукция) поля индукционного подвеса, тем «выталкивающая» электродинамическая сила больше. При отсутствии значения напряженности эта сила равна нулю.

Так же возможен обратный вариант, когда надвес осуществляет сам индукционный подвес над токопроводящем неферромагнитным телом. Недостатки в: малой грузоподъемности, существенные возмущающие моменты, большие энергетические траты. Достоинства: отсутствие трения, бесшумность, способность работать в вакууме и в агрессивных средах и т.п.

Кроме индукционных сил, которые отталкивают электропроводящее тело, из-за того что магнитное поле в установке высокочастотное, то есть и такие силы, притягивающие это тело, по этому невозможно применять индукционный подвес к ферромагнитному телу, которое обладает большой магнитной проницаемостью.

Самую большую распространенность индукционные надвесы получили в промышленной металлургии (плавка бестигельная сверхчистых металлов), а также транспортной промышленности, машиностроении, лабораторных приборах (гироскопы, компасы, и т.д.) [5].

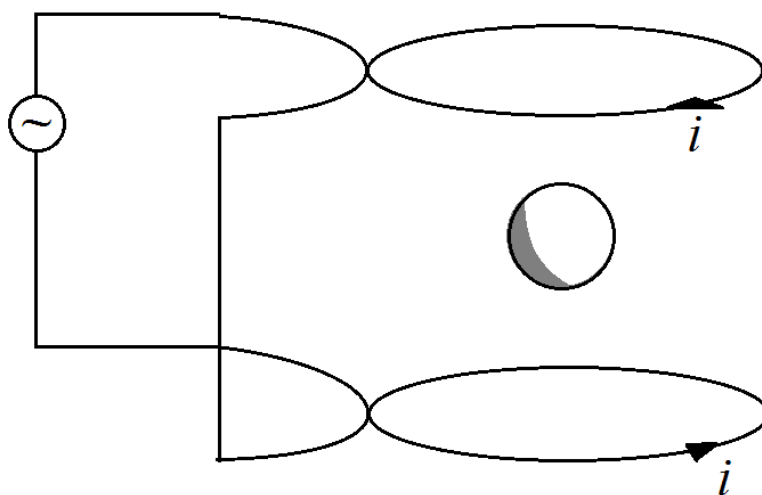


Рисунок 1.2.5 Индукционный подвес.

1.2.6 Кондукционный подвес

Принцип работы кондукционного подвеса заключается в вытеснение проводника с током из магнитного поля. Проводники с током бывают твердыми и жидким (магнитогидродинамический подвес кондукционного типа). Кондукционные подвесы по типу протекаемого по телу току делятся на подвесы

переменного тока (ток и магнитное поле должны совпадать по фазе) и постоянного тока.

Кондукционный подвес, представленный на рисунке 1.2.6, имеет простое устройство и в тоже время имеет достаточно высокую грузоподъемность.

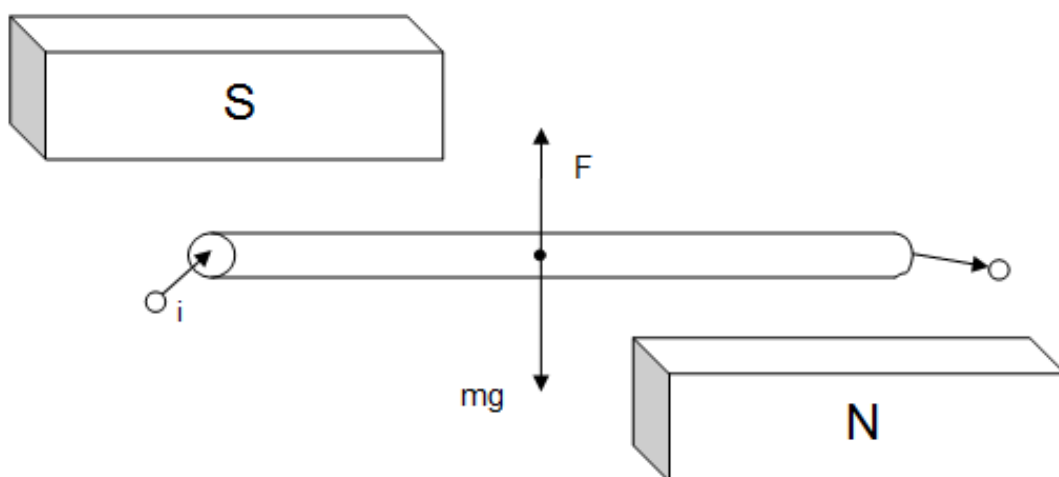


Рисунок 1.2.6 – Кондукционный подвес.

Значительным недостатком, является потребность возбуждения токов непосредственно на левитируемом теле, что приводит к сильному увеличению собственного веса и уменьшению эффективности подвеса, недостаток ограничивает использование кондукционных подвесов. К возможным недостаткам можно отнести необходимость в источнике тока больших величин.

В настоящее время кондукционный подвес используется в промышленной металлургии (для плавки чистых металлов), а также в транспорте [5].

1.2.7 Электромагнитный подвес с резонансной цепью (пассивные магнитные подвесы)

История возникновения магнитных опор переменного тока относится к сороковым годам, когда С. Дрейпер и Р. Гилисон, желая усилить магнитные поля сельсинов, использовали явления резонанса в электрических цепях. Включая конденсаторы последовательно в обмотки статора и, регулируя их емкость, они обнаружили в зарезонансной области эффект самоцентрирования ротора.

Исследовав этот эффект, они убедились, что можно создать сельсины без механических опор, используя в качестве таковых электромагниты переменного тока. [6].

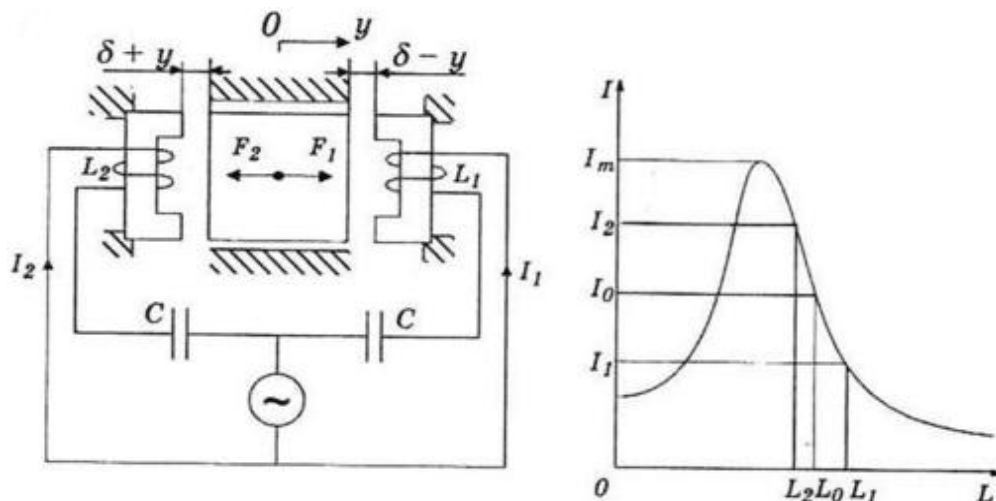
Принцип работы электромагнитного подвеса заключается в подвешивании тела при помощи электромагнитов. Управление магнитным полем осуществляется регулированием электрическим током в катушках удерживающих катушек электромагнита. В электрических схемах используют резонансные свойства электронных цепей, самая распространенная схема электромагнитного резонансного подвеса с применением явления резонанса напряжений в последовательном LC – контуре. Нужная регулировка тока получается в зависимости от различных параметров схемы и от перемещений центрируемого тела.

Электромагнитная бесконтактная опора с резонансной цепью считается одной из самых наиболее простых подвесов, состоящая из следующих узлов:

- электромагнитов;
- резонансных цепей, при помощи которых осуществляется автоматическое регулирование магнитного поля;
- демпфирующие цепочки, если не хватает корректировки по току в цепи;
- источники питания, стабилизированные по частоте и амплитуде.

В подобных подвесах желательно бы применять настройку характеристики схемы рядом с резонансными режимами, так как в данном случае, возможно, обеспечить крутую отношение токов от изменяемых значений. Для построения систем магниторезонансных бесконтактных опор, возможно, применять как резонанс по току, так и по резонансу напряжения.

Схема с резонансной LC цепью – подвеса приведена на рисунке 1.2.7.



а) принципиальная схема;

б) резонансная кривая

Рисунок 1.2.7 – Электромагнитный резонансный LC– подвес.

Левитирующее тело в магниторезонансной опоре, которое является ферромагнетиком, размещается между парой одинаковых электромагнитов с зазором δ . В электрической цепи к обмоткам электромагнитов подсоединены последовательно конденсаторы. Электромагниты включены в сеть с переменным напряжением. Значения емкостей конденсаторов C выбирается так, чтобы на тело, находящееся в центральном расположении, действовали параметры тока во всех обмотках, имеющих индуктивность L , имело значение в пределах значений ниспадающей ветви резонансной кривой. В сбалансированном состоянии силы притягивания равны между собой. А если совершается нарушение баланса тела, и предмет сдвигается, например, влево, то индуктивность одного электромагнита возрастает, а другого падает. Отклонение же сил и токов будет противоположное, в таком случае результирующая сила будет направлена в обратную сторону от направления сдвига, что приводит к восстановлению сбалансированного состояния.

Несложность в создании и настройки схем электрического магниторезонансного подвеса гарантирует их надежность. Контролируемые силы токов являются достаточно точной информацией о расположении центрируемого компонента, так как схемы запитываются переменным током исключается

вероятность постоянного намагничивания подвешенного тела, из-за чего уменьшается воздействие собственного магнитного поля с внешними полями.

В пассивных электромагнитных подвесах имеется несколько недостатков:

- зазоры между подвешенным телом и электромагнитом очень малы;
- небольшая грузоподъемность;
- высокие утечки энергии на, создаваемые электромагнитным полем,

вихревые токи в подвешенном теле и его перемагничивании.

Самое большое распространение магниторезонансные опоры получили в медицинской области (индукционные микрогироскопы в микрохирургии, томографы) [5].

1.2.8 Активные магнитные подвесы

Активные магнитные подвесы – это управляемые электромагнитные устройства, в которых удерживается крутящаяся часть машины (ротора) в определенном расположении относительно неподвижной части (статора).

С помощью электронной системы можно управлять магнитными силами притяжения, которые влияют на подвешиваемое тело со стороны электромагнитов. В связи с этим конструктивно активный магнитный подвес состоит из двух основных частей:

- Электромеханической части (подвешиваемый объект и электромагнит);
- Электронной системы управления.

Для объяснения принципов действия активных магнитных подвесов разберём рисунок 1.2.8, на котором показана структурная схема простого одноосного активного магнитного подвеса. Схема подвеса состоит из; системы, которая отслеживает перемещение подвешенного тела (датчика положения) и сравнивает отклонения от точки равновесия; редуктора обрабатывающий сигнал измерения; усилителя мощности, который, запитывается от внешнего источника и преобразовывает сигнал от редуктора в ток управления на обмотке

электромагнита. Эта система сигналов возбуждает электромагнитную силу, которая удерживает и возвращает подвешенное ферромагнитное тело в точку равновесия.

Одним из главных достоинств активных схем считается возможность получения наиболее эффективной регулировки подвешивающего электромагнитного поля и, следовательно, достижения лучших силовых характеристик. Ещё одним достоинством активного подвеса высокая грузоподъемность, высокая механическая прочность, широкий диапазон конфигурации жесткости и амортизации, бесшумность и отсутствие вибраций, невосприимчивый к загрязнениям, износостойкий, нет потребности в употреблении смазки и т.п. Стабильность подвеса и необходимую жесткость, а так же демпфирование, добивается подбором закона управления. К минусам активного магнитного подвеса относятся высокая стоимость и сложность вызванное наличием электронного блока управления, использование энергии от внешнего источника и т.д.

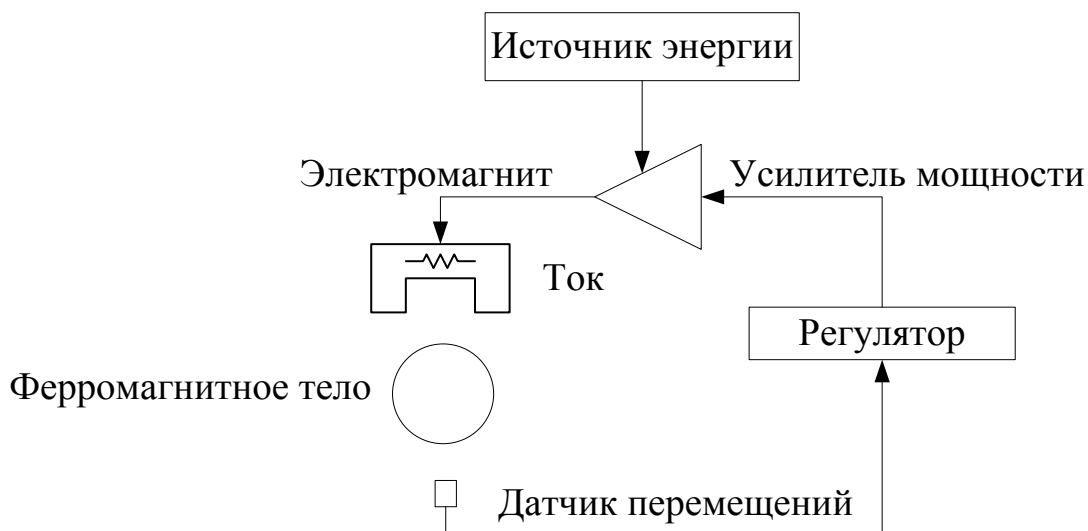


Рисунок 1.2.8 – Активный магнитный подвес.

Главными областями использования активных магнитных подвесов считается космическая отрасль (вакуумные турбомолекулярные насосы), спецтехника в пищевой промышленности, аппаратура для медицины, высокоскоростной наземный транспорт и т.п. [6].

1.2.9 Активные электростатические подвесы

Электростатический подвес можно сравнить с магнитным подвесом. Особо это относится к схемному построению и к методам теоретических исследований. В основе работы электростатического подвеса используются силы притяжений между проводящими поверхностями, имеющие различные электрические потенциалы. Левитация в электростатической системе подвеса происходит в результате электрических взаимодействий неподвижных электродов с левитирующим объектом. Для осуществления электростатического подвеса, нужно расположить незаряженное тело посередине четырёх электродов, как изображено на рисунке 1.2.9.

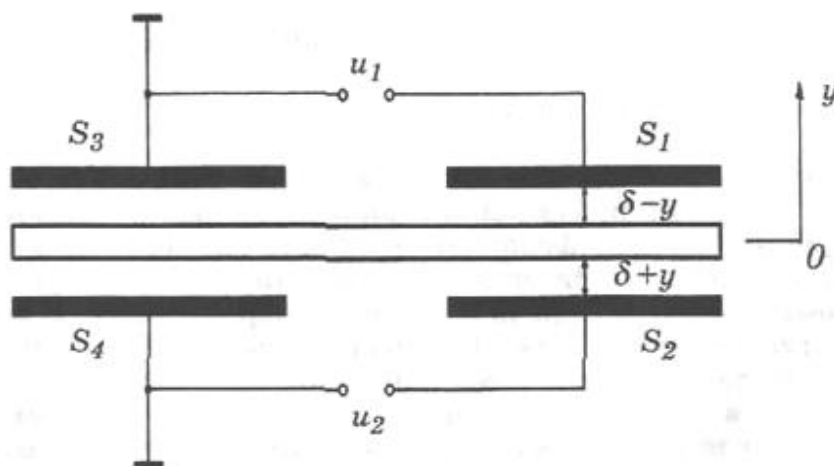


Рисунок 1.2.9 – Четырёхэлектродный электростатический подвес.

На одну из пар электродов подается напряжения U_1 и U_2 так, чтобы сдерживать центрируемый объект в подвешенном состоянии по оси y , а другая пара электродов подключена к земле. Пусть, площади всех электродов одинакова и равна A , а центрируемый объект находится на расстоянии δ от всех электродов, тогда выражение для действующей силы будет выглядеть следующим образом

$$F(y) = \frac{A}{16\pi} \times \left[\left(\frac{u_1}{\delta-y} \right)^2 - \left(\frac{u_2}{\delta+y} \right)^2 \right], \quad (1.2.1)$$

где A – площадь электрода;

S_1, S_2, S_3, S_4 – электроды;

y – положение электродов;

u_1, u_2 – напряжение;

δ – расстояние от электродов до помещаемого тела.

Стабильность электростатического подвеса добивается с помощью регулирования потенциалов на электродах. При этом используется внешняя система управления с ёмкостными датчиками положения. К достоинствам систем левитационных бесконтактных опор электростатических подвесов можно причислить отсутствие шума и тепловых потерь, отсутствие магнитного поля и трения и т.д. Основным недостатком подобных подвесов в том, что существует потребность в большом напряжении и относительно малая грузоподъемность. В основном применяется в циклотроне, сферических гироскопах, акселерометрах, поплавковых гироскопах, и т.п. [5].

1.2.10 Пассивный электростатический подвес (электростатический резонансный подвес)

Пассивные электростатические подвесы подобны активным электростатическим подвесам. Для стабильности электростатических подвесов используется система управления потенциалами на электродах.

В пассивных электростатических подвесах используют явление распределяющие напряжения на реактивных элементах резонансных контуров в системе, при изменении его значений, вызванных сдвигу подвешиваемого объекта относительно положения центрирования. В этом он практически не различается от магниторезонансного подвеса.

На рисунке 1.2.10 показана принципиальная схема электростатического резонансного подвеса, где настроечные индуктивности соединены последовательно с электродами, и обеспечивают работу схемы на необходимом участке резонансной характеристики.

На рисунке 1.2.10 C_1 и C_2 – это электрические емкости, созданные первыми и вторыми парами электродов в соответствии с центрируемым элементом.

Тогда усредненная по времени практическая составляющая силы для двух пар электродов будет принимать вид в соответствии с формулой (1.2.2)

$$\langle F_{\text{ц}} \rangle = - \frac{2 \times q_{0\text{m}}^2 \times A_0 \times \sin \varphi_0}{S \times \epsilon_a \times C_0 \times v} \times x, \quad (1.2.2)$$

где A_0 и φ_0 – значения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик электрического контура ЭРП на частоте, равной частоте питающего напряжения и при $x = 0$;

ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющая пространство между электродами;

S – рабочая площадь электрода;

C_0 – электрическая емкость в одном контуре при $x=0$;

$q_{0\text{m}}$ – максимальный заряд на электродах при центральном положении взвешиваемого тела, x – отклонение.

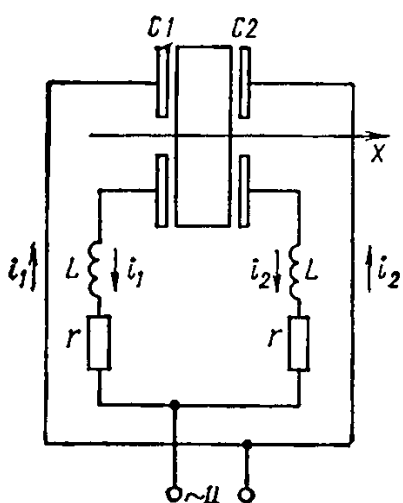


Рисунок 1.2.10– Принципиальная схема электростатического резонансного подвеса.

Основные особенности электростатического резонансного подвеса обнаруживаются во всей резонансной области, где частота питающего напряжения больше собственной частоты электрического контура при $x=0$. Именно в этом главное отличие электростатических резонансных подвесов от магнитных резонансных подвесов, область статической устойчивости которых проявляется в меньшей степени.[7]

Пассивные электростатические подвесы имеют малый эффект запаздывания в контурах регулирования, что дает возможность предъявлять менее строгие требования к величине необходимой для устойчивой внешней амортизации.

Структурная динамическая неустойчивость свойственна для электростатического резонансного подвеса, при отсутствии внешней динамической амортизации, также они имеют небольшую грузоподъемность.

Наиболее часто пассивные электростатические подвесы используются в гироскопах, акселерометрах.

1.2.11 Комбинированные подвесы

Комбинированные магнитные опоры, которые основываются на пассивной схеме регулирования (электромагнитная опора с резонансной цепью, электростатический резонансный подвес), также нашли свое применение. Для того чтобы повысить эффективность силообразования, один из параметров магнитной опоры (частота, напряжение) регулируется отдельно, в зависимости от расположения взвешиваемого тела, и информации снимаемой с самой магнитной опоры. К комбинированным магнитным опорам так же относятся многоосные системы, которые взвешиваются по одним осям за счет пассивных схем, а по другим осям в силу различных факторов – функциональными схемами. [7]

Главными областями использования комбинированных магнитных опор являются металлорежущие системы, а так же в станкостроительной индустрии.

2 Разработка и расчёт принципиальной электрической схемы установки магнитного надвеса

2.1 Разработка и расчёт схемы

В данной работе за основу были рассмотрены два типа установки магнитной левитации.

Первый тип установки магнитного подвеса является одноосным активным магнитным подвесом рисунок 2.1.1.

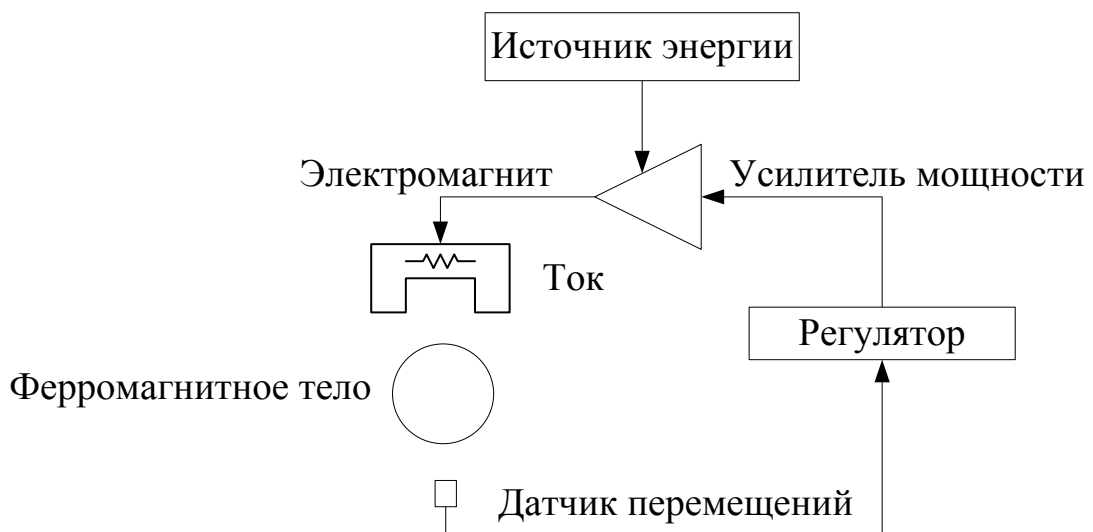


Рисунок 2.1.1 – Активный магнитный подвес.

Второй тип установки магнитного надвеса является комбинированным авторегулируемым подвесом на постоянных магнитах рисунок 2.1.2.

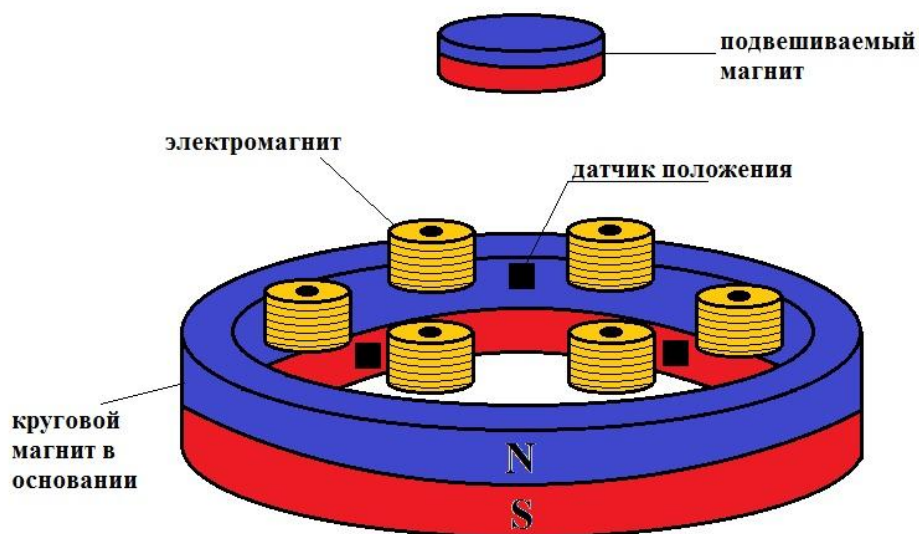


Рисунок 2.1.2 – комбинированный авторегулируемый надвес на постоянных магнитах.

Разработку устройств следует начать с составления функциональной схемы. На основании теоретических данных и полученного задания к данной работе первоначально необходимо определить способ осуществления требуемых функций и принцип аппаратной реализации. На основе этих данных разрабатывается функциональная схема. Процесс разработки функциональной схемы считается итерационным, т.е. при составлении принципиальной схемы понадобится несколько раз возвращаться и вносить корректировки в исходную схему.

Схема электрическая функциональная предназначена для пояснений определенных процессов, проходящих в изделии. Эту схему используют для изучения принципа работы изделия, регулировке, его настройке, контроле (приемке) и наладке. В сравнении со структурной схемой, функциональная схема наиболее подробно раскрывает функцию отдельных элементов и установок. Графическое изображение функциональной схемы следует давать более наглядное представление о процессах, отображаемых на схеме.

Схема электрическая структурная определяет основную часть изделия, его назначение и служит для общего знакомства с изделием. На структурных схемах выявляется не принцип работы отдельных функциональных компонентов, а только согласование между ними. Поэтому составные части изделия отображаются в виде прямоугольников различных размеров, однако разрешается также использовать условные графические обозначения элементов. На линиях связи устройств стрелками указывают направление хода процессов, проходящих в изделии [11].



Рисунок 2.1.3 Функциональная схема активного магнитного подвеса.

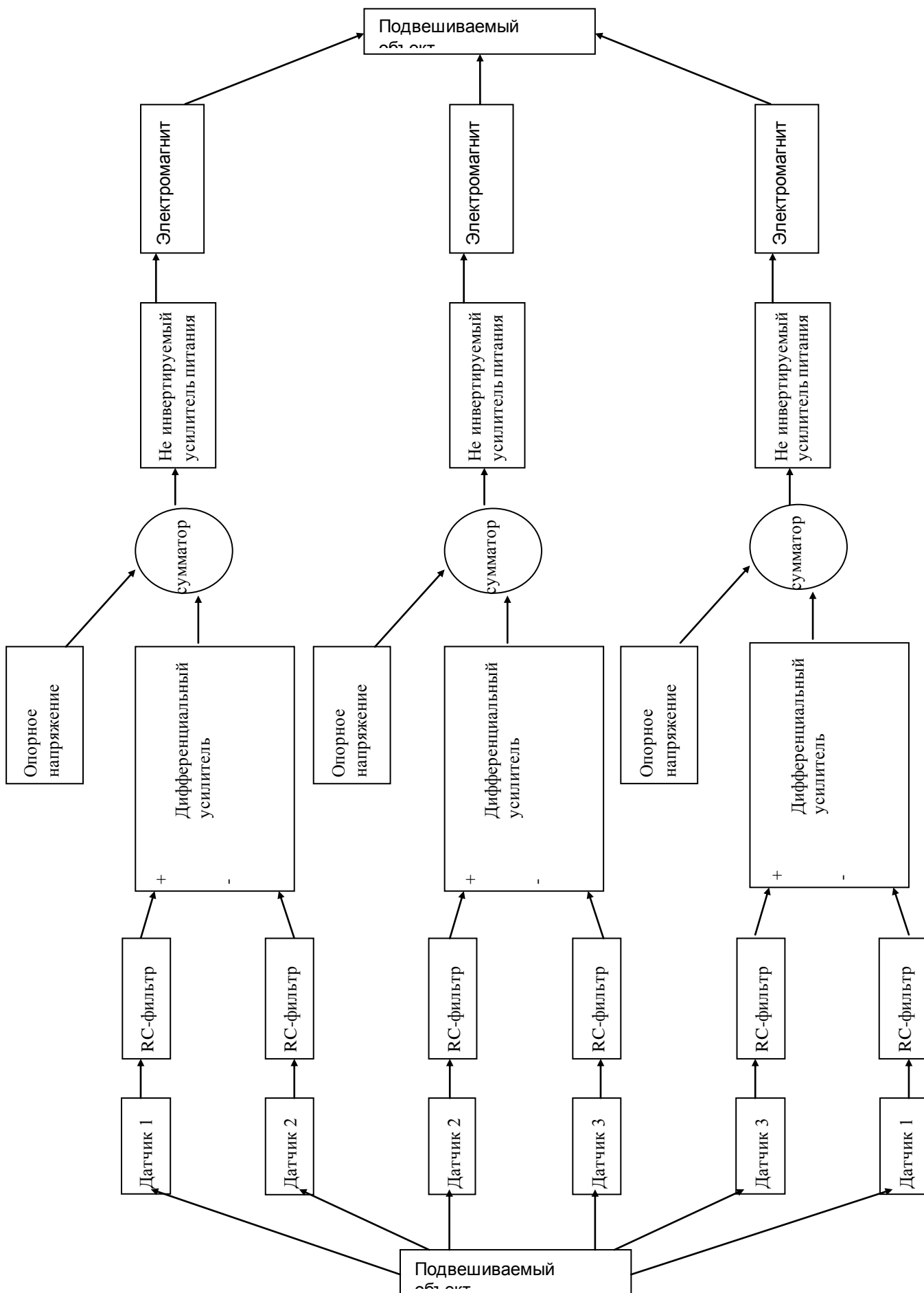


Рисунок 2.1.4 Функциональная схема комбинированного авторегулируемого надвеса на постоянных магнитах.

Функциональная схема активного магнитного надвеса, рисунок 2.1.3, состоит из системы, которая отслеживает перемещение подвешенного тела (датчика положения) и сравнивает отклонения от точки равновесия; редуктора обрабатывающий сигнал измерения; усилителя мощности, который, запитывается от внешнего источника и преобразовывает сигнал от редуктора в ток управления на обмотке электромагнита. Эта система сигналов возбуждает электромагнитную силу, которая удерживает и возвращает подвешенное ферромагнитное тело в точку подвеса. Датчик отслеживает перемещение объекта только в одной плоскости.

Функциональная схема комбинированного авторегулируемого надвеса на постоянных магнитах состоит из 3-х датчиков отслеживающих перемещение левитируемого объекта в горизонтальной плоскости, каждый датчик подключен, через RC-фильтр, к двум усилителям. К одному дифференциальному усилителю на прямой вход к другому на инверсный. С дифференциального усилителя сигнал суммируется с опорным напряжением и подается на не инвертированный усилитель питания. С усилителя питание поступает на нужный электромагнит, который возвращает подвешенное тело в исходную точку.

2.2 Структурная модель

Для создания математической модели подвесов проанализируем систему с одной степенью свободы (одноосевой подвес). Представленное упрощение нужно для получения основных зависимостей.

Благодаря управляемому электромагниту, тело должно располагаться в недвижимом, подвешенном состоянии. Это допустимо, если магнитная сила будет сбалансировать вес тела. Принципиальная схема представлена на рисунке 2.2.1.

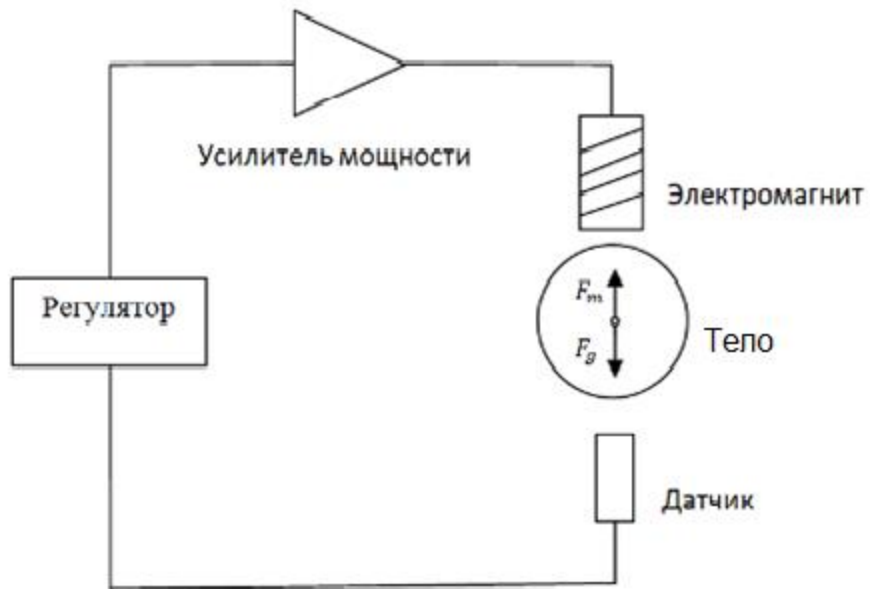


Рисунок 2.2.1 Принципиальная схема подвеса.

Через разнородное магнитное поле катушки, правильно рассчитать силу притяжения тела проблематично. Поэтому поведение объекта управления следует описать с учетом нелинейности характера силы магнитного сопротивления $F_m(X, I)$, которая зависит от тока I и величины воздушного зазора X .

В положение равновесия приводит сумма сил действующих на шар, т.е. $F_g - F_m = 0$, где F_m – магнитная сила, F_g – сила тяжести.

Математическая модель

Для создания математической модели проектируемой системы, нужно разобрать электрическую модель и эквивалентную ей механическую модель рисунок 2.3.1.

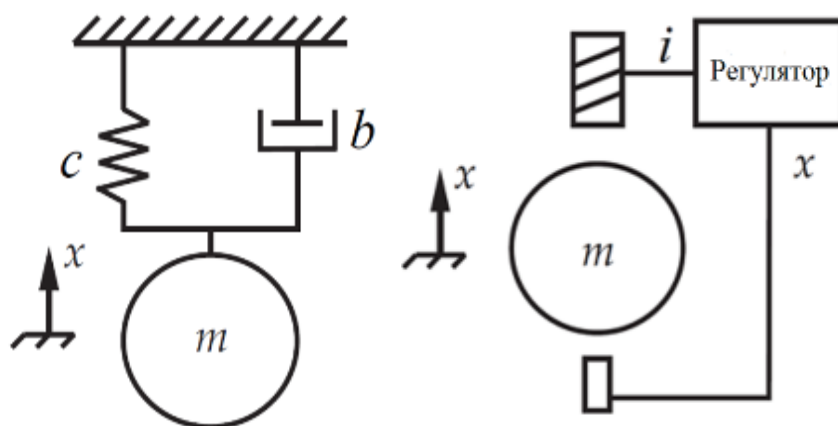
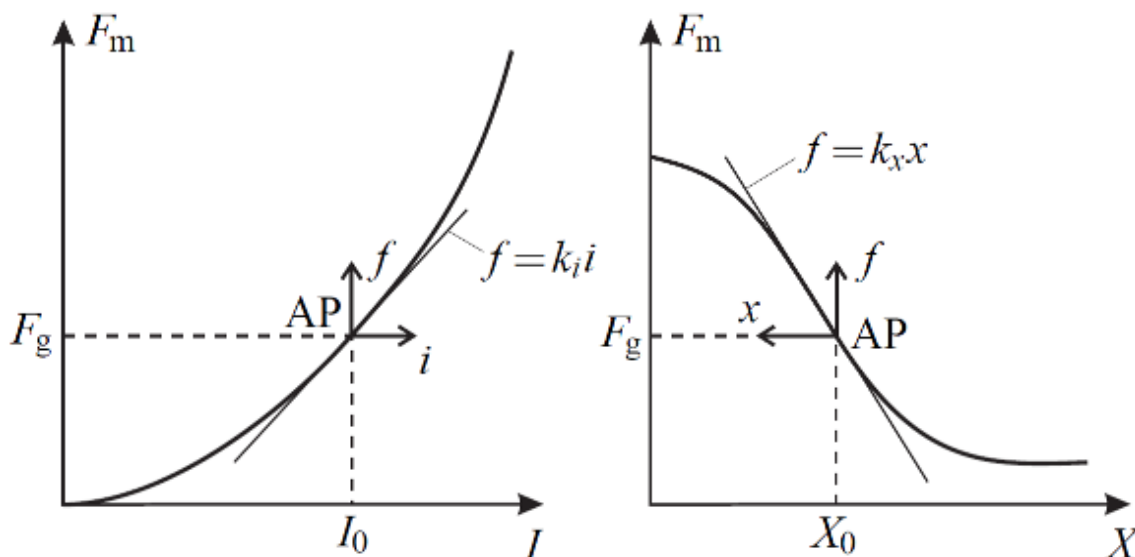


Рисунок 2.3.1 Механическая и электрическая модель.

Сила электромагнита F_m , которая оказывается на тело, зависит от силы тока I в электромагнитной катушке и величины воздушного зазора X .

На рисунке 2.3.2 (б) представлена статическая тяговая характеристика электромагнита с его линеаризацией вокруг рабочей точки $AP = (X_0, F_g)$.



а) график зависимости силы от тока; б) кривая тяговой характеристики электромагнита.

Рисунок 2.3.2 Характеристики электромагнита.

Тяговая характеристика электромагнита на рисунке 2.3.2 (б) по сравнению с характеристикой пружины на рисунке 2.3.3 имеет другой характер. Линейная характеристика пружины имеет непрерывный положительный подъем. Отклонение X вызывает силу упругости $F_f = c * X$. Она направлена в противоположную сторону отклонению X , и стремится вернуть величину отклонения в начальное положение, то есть сила пружины оказывает стабилизирующее воздействие. В отношении магнитной силы F_m такого не происходит.

Магнитная сила следует из правила обратных квадратов $F_m \sim I^2/X^2$, то есть, чем больше расстояние X между магнитом и якорем, тем меньше будет магнитная сила.

Признак наклона статической тяговой характеристики в рабочей точке на рисунке 2.3.2 (б), обуславливает стабильность. Этот наклон означает в технологии магнитных подшипников по аналогии с твердостью пружины, как устойчивость объекта регулирования. На рисунке 2.3.2(б) видно, как по наклонной кривой, появляется отрицательная жесткость. У нерегулируемого объекта управления есть отрицательная жесткость, которая приводит к тому, что нерегулируемый объект управления является неустойчивым. По этой причине нерегулируемый электромагнит нестабилен и ему необходима стабилизация при помощи регулятора.

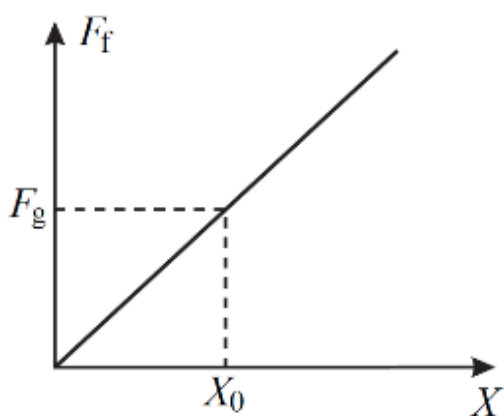


Рисунок 2.3.3 Характеристика пружины.

На практике при проектировании регулятора используют линеаризованную модель. По этой причине нелинейная характеристика $F_m(X, I)$ магнитной силы в рабочей точке $X = X_0, F_m = F_g, I = I_0$ линеаризуется.

Для регулирования комбинированного авторегулируемого надвеса на постоянных магнитах в рабочей точке будем использовать следующие отклонения:

отклонение тока соответствует формуле (2.3.1)

$$i = I - I_0, \quad (2.3.1)$$

отклонение силы соответствует формуле (2.3.2)

$$f = F_m - F_g, \quad (2.3.2)$$

отклонение смещения соответствует формуле (2.3.3)

$$x = X_0 - X. \quad (2.3.3)$$

Таким образом, общая сила высчитывается по формуле (2.3.4)

$$f(x, i) = -\left. \frac{\partial F_m(x, I)}{\partial x} \right|_x + \left. \frac{\partial F_m(x, I)}{\partial I} \right|_i = -k_x \times x + k_i \times i. \quad (2.3.4)$$

Для отклонения от рабочей точки подвеса нужно замерить расстояния k_i и k_x . Общая сила f может быть линеаризована, как функция смещения x и тока i вокруг рабочей точки $AP = (F_g, X_0, I_0)$ $AP = (F_g, X_0, I_0)$. Смещение x считается положительным, если воздушный зазор меньше X . В соответствии с формулой (2.3.5) это изменение координат ведет к изменению знака перед соответствующей частной производной.

$$f(x, i) = k_x \times x + k_i \times i. \quad (2.3.5)$$

Погрешность, появляющаяся при линеаризации дифференциального уравнения, которая описывает динамическую систему, требует оценки.

Уравнение 2.3.5 определено для проектирования регулятора. Линеаризация не применяется к частным случаям, например касание магнита телом, или при включение режима насыщения магнита [8].

2.3 Расчёт электромагнитов

Электромагниты используются в самых разных электротехнических приборах. Они представляют собой катушку из проволоки, намотанную на

металлический сердечник, строение которого может быть самой различной. Металлический сердечник представляет с одной стороны часть магнитопровода, а с другой часть, при помощи которого силовые линии замыкаются в магнитный поток, предназначается якорь. Магнитная система определяется размером магнитной индукции — B , которая находится в зависимости от магнитной проницаемости материала и от напряженности поля. Как раз, поэтому сердечники электромагнитов производят из металла, имеющего высокую магнитную проницаемость. В ту же очередь, от магнитной индукции находится в зависимости силовой поток, имеющий обозначение в формулах буквой Φ .

$\Phi = B * S$ — произведение магнитной индукции — B на площадь поперечного сечения магнитопровода — S . Силовой поток в свою очередь также зависит от так именуемой магнитодвижущей силы (E_m), которая определяется числом ампервитков на один сантиметр длины пути силовых линий и выражается формулой:

$$\Phi = \text{магнитодвижущая сила (} E_m \text{)} * \text{магнитное сопротивление (} R_m \text{)}$$

Здесь $E_m = 1,3 * I * N$, где N — число витков катушки, а I — сила тока, текущего по катушке, в амперах. Вторая составляющая:

$R_m = L/M * S$, где L — средняя длина пути силовых магнитных линий, M — магнитная проницаемость, а S — поперечное сечение магнитопровода. При проектировании электромагнитов весьма полезно получить мощный силовой поток. Достичь этого можно, если снизить магнитное сопротивление. Для этого необходимо использовать магнитопровод с минимальной длиной пути силовых линий и с максимальным поперечным сечением, а в качестве материала — железный материал с большой магнитной проницаемостью. Альтернативный путь приумножения силового потока путем повышения ампервитков не представляется приемлемым, так как в целях экономии питания и проволоки следует стараться уменьшить ампервитки. Как правило, расчеты электромагнитов производятся по специальным графикам. Для упрощения в расчетах мы станем также употреблять некоторые выводы из графиков. Допустим, нужно определить ампервитки и силовой поток сомкнутого металлического магнитопровода и изготовленного из металла самого низкого качества.

Анализируя график намагничивания железа, рисунок 2.4.1, несложно убедиться, что более эффективной является магнитная индукция, находящаяся в пределах от 10 000 – 14 000 силовых линий на 1 см², что соответствует от 2 до 7 ампервиткам на 1 см. Для намотки катушек с минимальным числом витков и более экономичным в смысле питания, для расчетов нужно принимать именно эту величину (10 000 силовых линий на 1 см² при 2 ампервитках на 1 см длины).

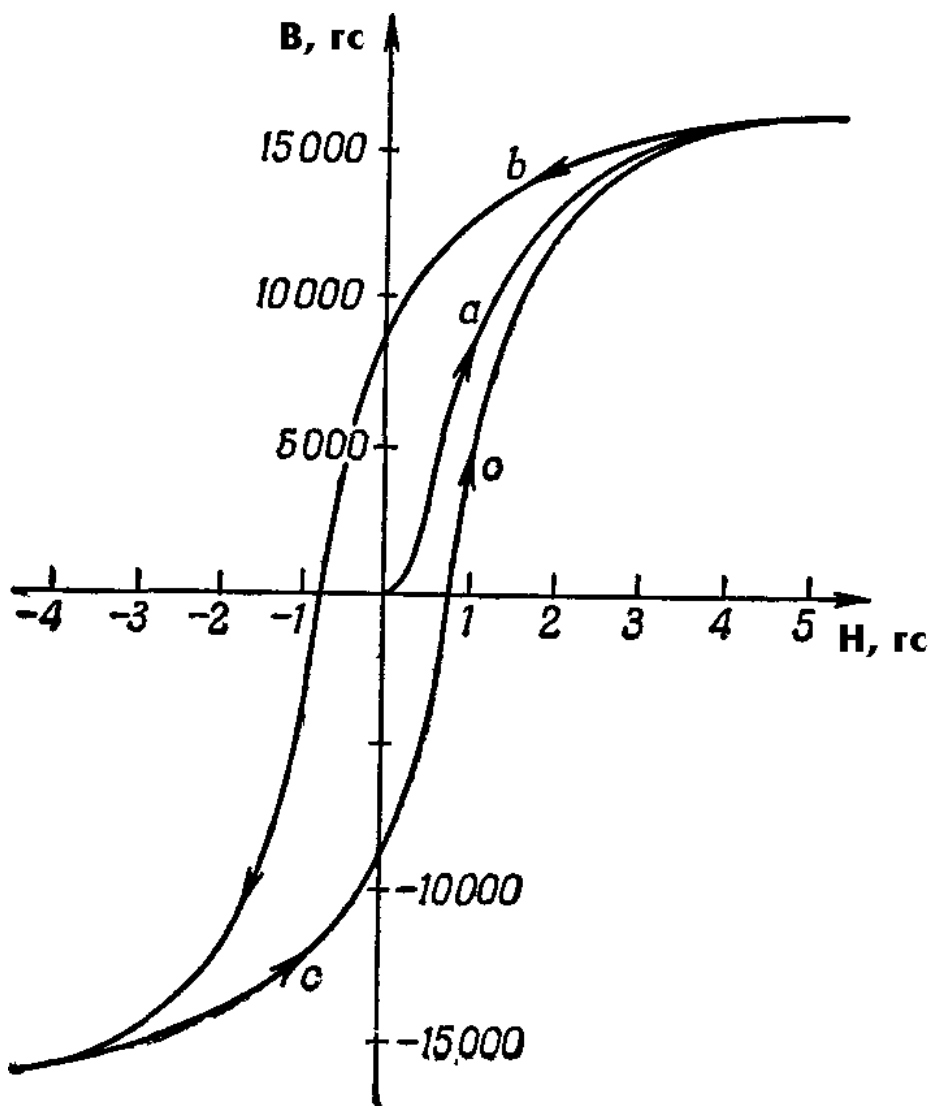


Рисунок 2.4.1 Кривая намагничивания железа.

Рассмотрим, пример, расчёта электромагнита рисунок 2.4.2

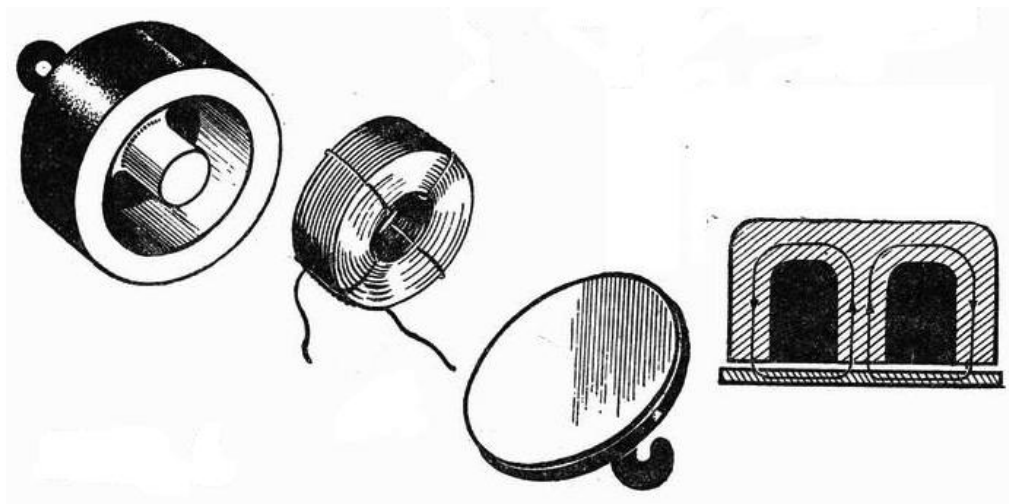


Рисунок 2.4.2 Электромагнит.

Если диаметр D сердечника примем равным 2 см, то его площадь будет равна:

$$S = 3,14 * D^2 / 4 = 3,14 \text{ см}^2.$$

Отсюда возбуждаемый магнитный поток будет равен:

$$\Phi = B * S = 10000 * 3,14 = 31400 \text{ силовых линий.}$$

Можно приблизительно рассчитать и подъемную силу электромагнита (P).

$$P = B^2 * S / 25 * 1000000 = 12,4 \text{ кг.}$$

Для двухполюсного магнита этот результат нужно удвоить.

Следственно, $P = 24,8 \text{ кг} \approx 25 \text{ кг}$. При расчёте подъемной силы нужно помнить, что она зависит не только от длины магнитопровода, но и от площади сопряжения якоря и сердечника. Якорь поэтому должен плотно примыкать к полюсным наконечникам, иначе даже незначительные воздушные прослойки приведут к сильному уменьшению подъемной силы.

Дальше производим расчет катушки электромагнита. В нашем примере подъемная сила в 25 кг обеспечивается 60 ампервитками. Разберём, какими средствами, возможно, получить произведение $N * J = 60$ ампервиткам.

Очевидно, это возможно получить либо способом использования большего тока при небольшом количестве витков катушки, к примеру, 3 А и 20 витков, либо способом повышения числа витков катушки и при уменьшении тока, к примеру, 0,2 А и 300 витков. Следовательно, для того чтобы электромагнит

обладал подъемной силой в 25 кг, на его сердечник возможно намотать и 20 витков и 300 витков, но при этом необходимо поменять величину протекаемого тока. Разумеется, можно использовать и другое отношение. Однако не всегда возможно изменение величины тока в достаточных пределах, так как оно, безусловно, потребует применения провода катушки с другим, возможно большим, диаметром. При кратковременной работе (некоторое количество минут) для проводов диаметром до 1 мм допустимая плотность тока, при которой провод сильно не перегревается, возможно, принять равным 5 А/мм^2 . В нашем примере провод должен быть следующего сечения: для тока в 3 А — $0,6 \text{ мм}^2$, а для тока в 0,2 А — $0,04 \text{ мм}^2$, диаметр провода будет равен 0,8 мм или 0,2 мм соответственно. Провод с каким сечением лучше выбрать? Выбор диаметра проволоки может быть определён имеющимся проводом, или же выбор по возможности источника питания, как по напряжению, так и по току. В действительности, две катушки, первая, которая изготовлена из толстого провода в 0,8 мм и с малым числом витков — 20, а другая — из провода в 0,2 мм и числом витков 300, будут обладать резко различным сопротивлением. Узнав диаметр применяемого провода и его длину, возможно, легко узнать его сопротивление. Длина провода L равна, произведению общего числа витков катушки на среднюю длину одного из них:

$$L = N * L_1, \text{ где } L_1 \text{ — длина одного витка, численно равная } 3,14 * D.$$

$$\text{В примере } D = 2 \text{ см, тогда } L_1 = 6,3 \text{ см.}$$

Таким образом, для первой катушки длина проволоки будет

$$20 * 6,3 = 126 \text{ см, сопротивление обмотки постоянному току будет менее } 0,1 \text{ Ом, а для второй —}$$

$$300 * 6,3 = 1890 \text{ см, } R \approx 10 \text{ Ом.}$$

Используя закон Ома, легко рассчитать необходимое напряжение. Для создания тока в обмотках 3А необходимо напряжение равное 0,3 В, а для тока в 0,2А — 2 В.

Разрабатывая электромагниты, нужно не только осуществлять указанный расчет, но также необходимо уметь выбирать материал для сердечника и его форму, продумывать способ изготовления. Удовлетворительными материалами

для изготовления сердечников являются различные металлические изделия: болты, гвозди, шурупы и т. д. Чтобы избежать сильных потерь на наводимых магнитным полем токах Фуко, сердечники для устройств переменного тока нужно изготавливать из изолированных друг от друга тонких листов электрической стали. Немаленькое значение имеет так же и корректный выбор формы сердечника. Самые оптимальные из них кольцевые и П-образные.[12].

3 Расчёт магнитных полей

В данной работе при изучении установок магнитной левитации, нельзя обойти стороной магнитные поля создаваемые установками. В них и заключается весь принцип работы данных установок. Магнитные поля, создаваемые установками, компенсируют гравитационную силу тяжести подвешиваемого в них объекта, в установках создаются магнитные поля от постоянных магнитов, от электромагнитов постоянного тока, от электромагнитов переменного тока, индукционные магнитные поля, вытесненного магнитного поля из объема сверхпроводника, встречное магнитное поле от диамагнетика.

Для изучения и теоретического расчёта в данной работе используется программа для инженерного моделирования электромагнитных, механических и тепловых задач методом конечных элементов – Elcut. Это мощный комплекс программ для расчетов электромагнитных параметров и тепловых режимов машин применяемый ведущими электромашиностроительными заводами страны.

При расчетах магнитного поля наибольший интерес представляют следующие величины:

- индуктивность;
- магнитная индукция;
- напряженность магнитного поля;
- потокосцепления с различными обмотками;
- магнитостатические силы и моменты.

Программное обеспечение Elcut возможно применить для решения линейных, а также нелинейных задач магнитостатики в плоской и осесимметричной постановке. Применяется формулировка задачи сравнительно векторного магнитного потенциала. Задачи магнитостатики, возможно, решать в линейной и нелинейной постановках. Источником поля могут служить: сосредоточенные и распределенные токи и токовые слои, постоянные магниты, а также внешние магнитные поля.

При решении этих задач используется уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала A ($B = \text{rot } A$, B – вектор магнитной индукции). В рассматриваемых задачах вектор индукции B всегда лежит в плоскости модели (xy или zr), а вектор плотности стороннего тока j и векторный потенциал A перпендикулярны к ней. Иными словами, электрический ток, создающий магнитное поле, направлен перпендикулярно плоскости чертежа, или движущиеся заряды, создающие постоянное магнитное поле, перемещаются перпендикулярно плоскости чертежа. Отличны от нуля только компоненты j_z и A_z в плоскопараллельном случае или j_θ и A_θ в осесимметричных задачах. Мы будем обозначать их просто как j и A . Для плоскопараллельных задач уравнение имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right),$$

а для осесимметричного случая

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cz}}{\partial r} - \frac{\partial H_{cr}}{\partial z} \right),$$

где компоненты тензора магнитной проницаемости μ_x и μ_y (μ_z и μ_r), составляющие коэрцитивной силы H_{cx} и H_{cy} (H_{cz} и H_{cr}) а также плотность тока j – постоянные величины в пределах каждого из блоков модели.

Источники поля могут быть заданы в блоках, на ребрах или в отдельных вершинах модели. В магнитостатике под источниками поля понимаются 11 сосредоточенные и распределенные токи и токовые слои, а также постоянные магниты, намагниченность которых задается величиной коэрцитивной силы. Источник, заданный в конкретной точке плоскости xy (zr), описывает ток, проходящий через эту точку в направлении третьей оси. В осесимметричном случае точечный источник представляет ток в тонком кольцевом проводнике вокруг оси симметрии. Ток, заданный на ребре, соответствует поверхностному току в трехмерном пространстве. Задание плотности тока в токовом слое эквивалентно неоднородному граничному условию Неймана и осуществляется с его помощью. Пространственно распределенный ток описывается либо

посредством плотности электрического тока, либо полным числом ампер-витков, ассоциированных с блоком. Плотность тока в катушке может быть получена по формуле

$$j = \frac{nI}{S}$$

где n – количество витков катушки, I – полный ток, S – площадь поперечного сечения катушки.

Условие Дирихле, задающее на части границы наперед известный векторный магнитный потенциал A_0 в вершине или на ребре модели. Это граничное условие определяет поведение нормальной составляющей индукции на границе. Оно часто используется для задания нулевого значения, например, на оси симметрии задачи или для указания полного затухания поля на удаленной от источников границе. Кроме того, Elcut позволяет задать условие Дирихле как линейную функцию координат в виде

$$A_0 = a + bx + cy \text{ – для плоских задач;}$$

$$rA_0 = a + bZR + cr^2/2 \text{ – для осесимметричных задач.}$$

Условие Неймана имеет вид:

$$H_t = y \text{ – на внешних границах,}$$

$$H_t^+ - H_t^- = y \text{ – на внутренних границах,}$$

где H_t – тангенциальная компонента напряженности поля, индексы «+» и «-» означают «слева от границы» и «справа от границы» соответственно, σ – линейная плотность поверхностного тока. Если σ равно нулю, граничное условие называется однородным.

Постоянные магниты. Поскольку коэрцитивная сила рассматривается в Elcut как кусочно-постоянная функция координат, ее вклад в уравнение эквивалентен поверхностным токам, протекающим по границам постоянных магнитов в направлении, ортогональном плоскости модели. Плотность такого эффективного тока равна величине скачка тангенциальной компоненты коэрцитивной силы на границе магнита. Например, прямоугольный магнит с коэрцитивной силой H_c , направленной вдоль оси x , может быть заменен совокупностью поверхностных токов, протекающих по его верхней и нижней

границам. Эффективный ток, протекающий по верхней границе, численно равен H_s , а по нижней границе – $-H_s$. Таким образом, постоянный магнит может быть описан как с помощью задания коэрцитивной силы, так и с помощью неоднородных граничных условий Неймана на его границах. Выбор того или иного способа определяется соображениями удобства и наглядности. Особо следует рассмотреть случай постоянных магнитов, обладающих нелинейными магнитными характеристиками. При задании кривой размагничивания такого магнита сначала необходимо указать начальное значение коэрцитивной силы магнита, а это поле недоступно, пока не задано значение магнитной проницаемости. Поэтому сначала следует указать любое положительное значение магнитной проницаемости, затем коэрцитивную силу магнита, и, выставив флажок «анизотропный магнетик», начать редактирование кривой размагничивания. Вычисляемые физические величины. При анализе результатов расчета магнитного поля Elcut позволяет оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами. Локальные величины:

- векторный магнитный потенциал A (функция потока ΓA в осесимметричном случае);
- вектор магнитной индукции $B = \text{rot } A$
- вектор напряженности магнитного поля $H = \mu^{-1} B$, где μ - тензор магнитной проницаемости.

Интегральные величины:

- суммарная магнитостатическая сила, действующая на тела, заключенные в заданном объеме:

$$F = \frac{1}{2} \oint (H(n * B) + B(H * n) - n(B * H)) dS, \quad \text{где интегрирование ведется по}$$

поверхности, окружающей заданный объем, а n - единичный вектор внешней нормали к поверхности;

- энергия магнитного поля:

$$W = \frac{1}{2} \int (H * B) dV \quad \text{– в линейном случае;}$$

$$W = \int \left(\int_0^B H(B') dB' \right) dV \quad \text{– в нелинейном случае;}$$

– Потокосцепление на один виток обмотки:

$$\Psi = \frac{\oint AdS}{S} \text{ – в плоскопараллельном случае;}$$

$$\Psi = \frac{2\pi \oint rAdS}{s} \text{ – в осесимметричном случае;}$$

интегрирование в данной формуле ведется по поперечному сечению обмотки, а S обозначает площадь этого поперечного сечения. Для плоских задач все интегральные величины рассматриваются на 1 м длины в осевом направлении. Область интегрирования задается в плоскости модели в виде контура (при необходимости замкнутого), состоящего из отрезков и дуг окружностей [10].

Расчёты в Elcut.

Задача магнитостатики. Осесимметричная модель. Нарисовали геометрию нижних кольцевых магнитов. Задали область расчёта. Нижние магниты являются редкоземельными NdFeBr марки N50 с коэрцитивной силой 876 кА/м, остаточная магнитная индукция 14 кГс.

Картина поля изображена на рисунке

3.1.

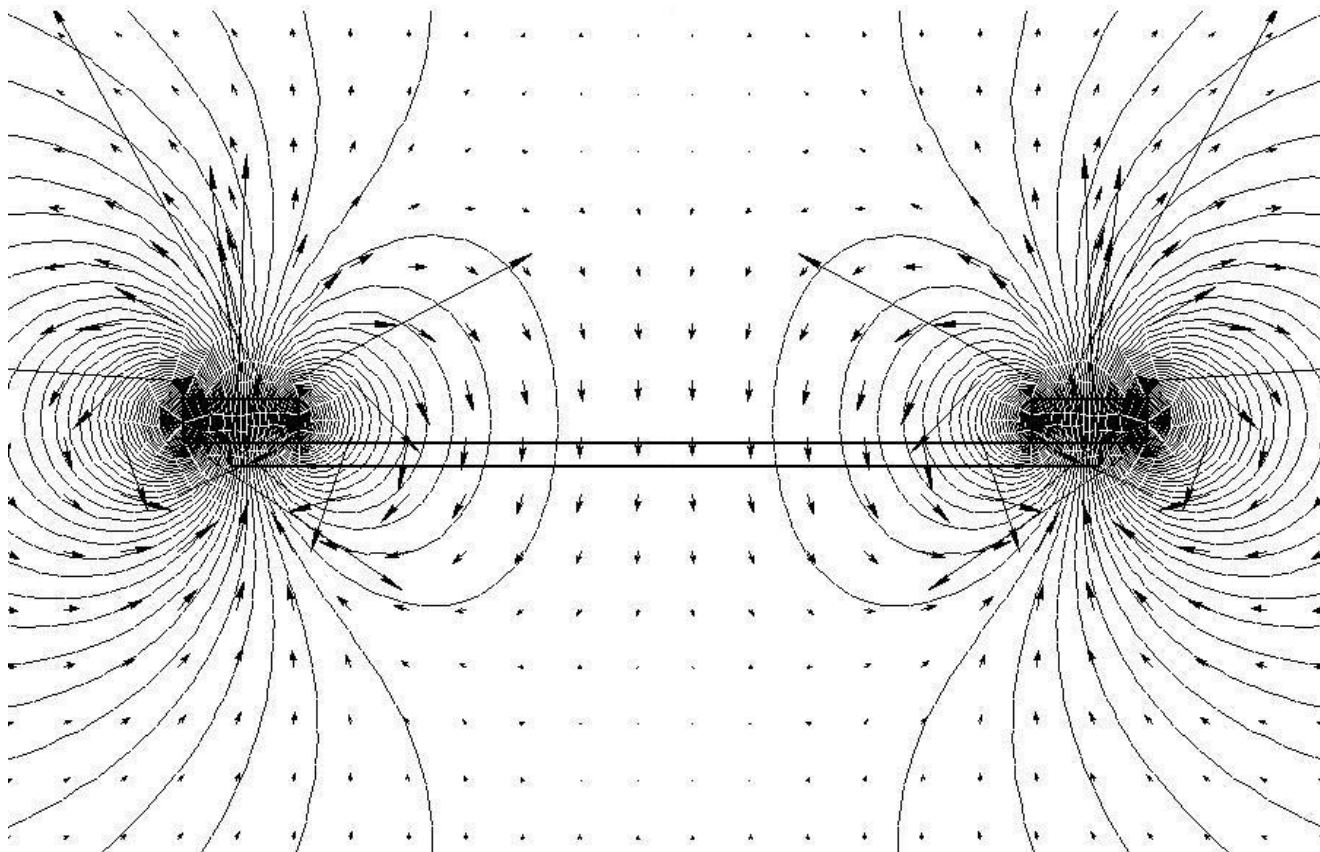


Рисунок 3.1 Поле кольцевого магнита в основании платы.

Добавляем геометрию подвешиваемого магнита, размещаем её в приблизительную точку смены направления магнитного поля кругового магнита над центром платы. Характеристики подвешиваемого магнита такие же, как в основании. Полученная картина магнитного поля изображена на рисунке 3.2

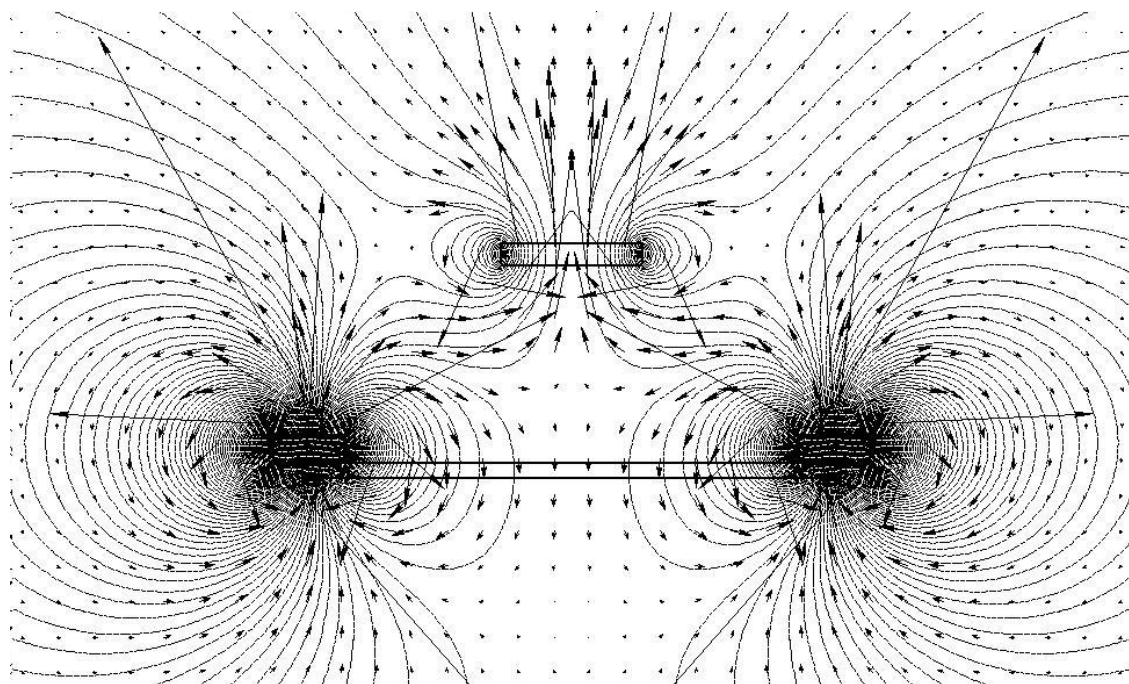


Рисунок 3.2 Взаимодействие кольцевого магнита с подвешиваемым магнитом.

В программе Elcut использовали подпрограмму LabelMover, которая решает задачи магнитостатики по изменяющим данным. Вычисляем пондеромоторную силу, действующую на подвешиваемый магнит. Изменяя при этом положение магнита по оси X с шагом 2 миллиметра вниз, то есть к плате. После трёх шагов по графику видно, что сила резко меняет своё направление, это значит, что в этой точке верхний магнит отталкивается от нижнего магнита. Установив в эту точку магнит, он будет заблокирован магнитным полем для перемещения в вертикальном, положении. При изменении положения магнита в горизонтальной плоскости, он будет возвращен магнитным полем электромагнитов. Примерная картина поля с электромагнитами изображена на рисунке 3.4.

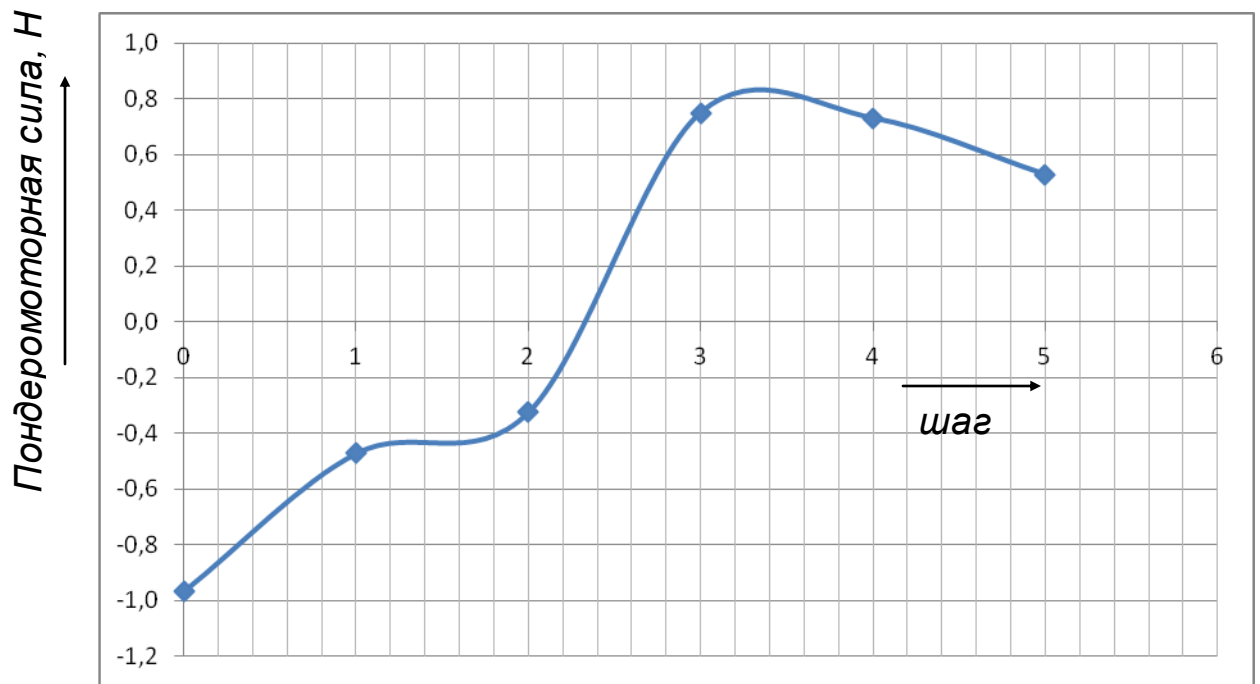


Рисунок 3.3 График зависимости пондеромоторной силы от положения тела.

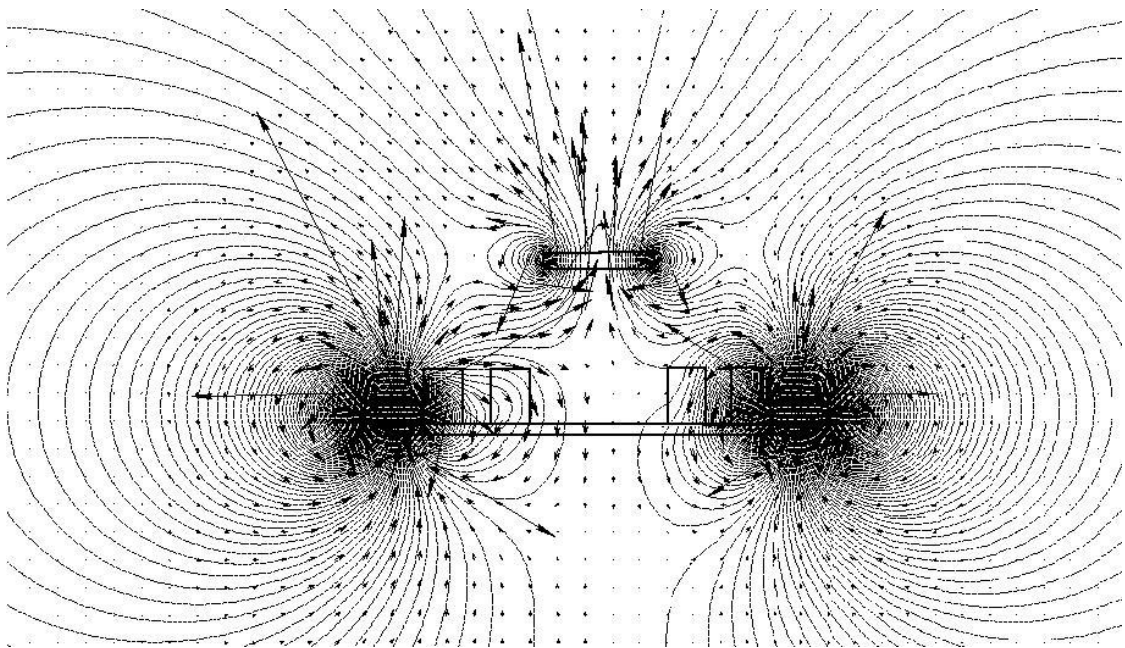


Рисунок 3.4 Примерное магнитное поле с электромагнитами.

4. Практическая реализация проекта

При практической реализации проекта было рассмотрено два типа установок электромагнитной левитации. Первая это комбинированный авторегулируемый надвес на постоянных магнитах, второй тип активный магнитный подвес. Первый тип установки был выбран по причинам небольших размеров самой установки, а также данный тип установки также является хорошим примером работы магнитного левитатора с постоянным магнитным полем и авторегулируемым электромагнитным полем. Второй тип установки является примером принципа работы магнитного подшипника и многих других электромагнитных опор.

Для реализации первой установки ознакомились с функциональной схемой данного магнитного надвеса. По функциональной схеме с моделировали принципиальную электрическую схему, рисунок 4.1, разработали печатную плату и конструкцию макета.

Предполагаемый принцип работы. В основании макета по кругу расположены неодимовые магниты. Суммарное магнитное поле, которое представляет магнитное поле кольца, наподобие такого, который изображен на рисунке 4.2, в точке 1 и в точке 2 видно, что магнитное поле меняет направление. Если в точку 1 или 2 поместить магнит, то перемещение по вертикале блокирует магнитное поле кольца, а по горизонтали он норовит притянуться к магнитам в основании. Для удержания магнита в сбалансированной точке, отслеживаем отклонения от центра при помощи датчиков и с помощью трёх пар электромагнитов, расположенных в основании установки, возвращаем магнит в исходную точку.

Энергия электромагнита тратится только на компенсацию незначительных перемещений магнита, в действительности запасённая энергия катушки перекачивается из одной в другую. Потребление энергии в такой системе намного меньше, чем в системах, где электромагнит должен компенсировать силу тяжести, действующее на левитирующее тело.

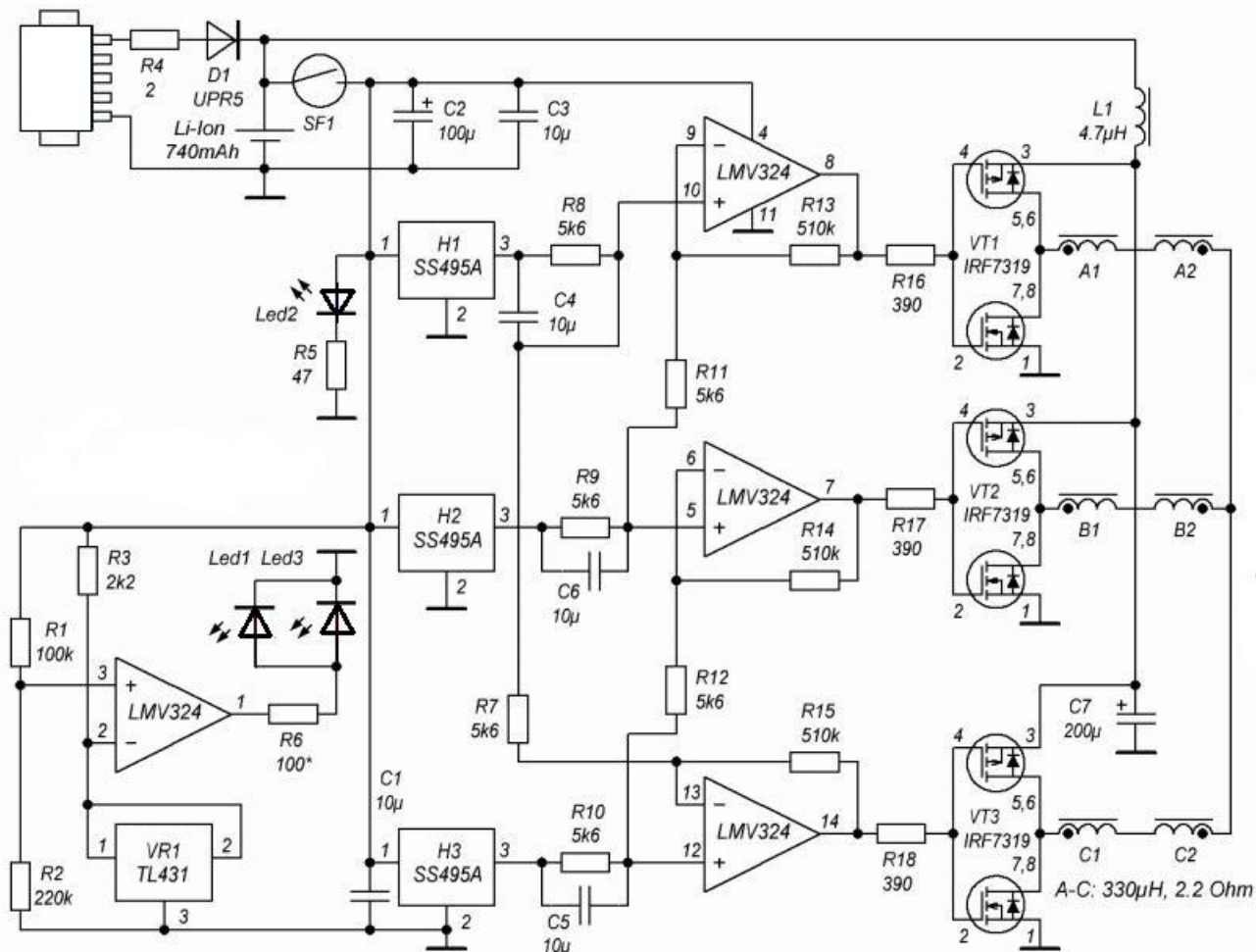


Рисунок 4.1 Принципиальная электрическая схема комбинированного авторегулируемого надвеса.

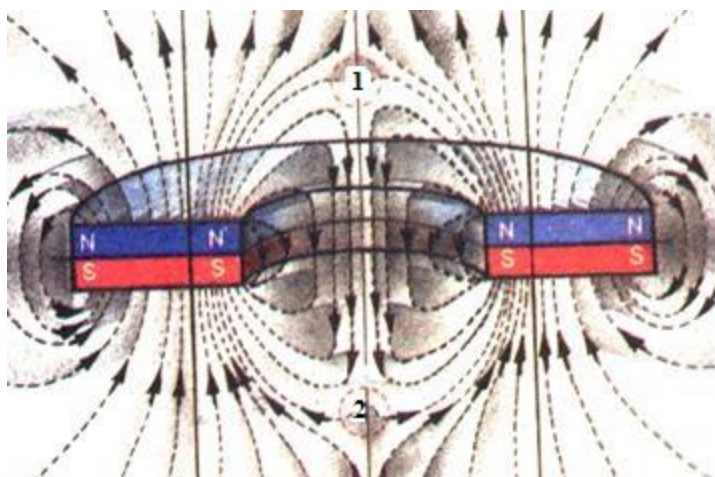


Рисунок 4.2 Магнитное поле кольца.

Элементная база. В качестве датчиков отслеживаемых левитируемый объект применили датчики Холла (SS495A). Датчики Холла реагирует на

магнитное поле, создаваемое подвешенным объектом и при приближение к нему объекта, подают сигнал на дифференциальный усилитель, у данных датчиков сигнал является аналоговым, чем ближе объект к датчику, тем сильнее сигнал. Датчик включается при индукции в 670 Гаусс. Сигнал с датчика подаётся на операционный усилитель, включенный в дифференциальном режиме. В качестве усилителя взяли микросхему AD8544 с четырьмя каналами операционного усилителя, каждый датчик подключен к двум каналам дифференциального усилителя, к одному на прямой вход усилителя, к другому на инверсный вход. Частота единичного усиления микросхемы 1 МГц. Далее с усилителя сигнал идёт на усилительный каскад, построенный на микросхемах IRF7319. Микросхема содержит внутреннюю схему на двух биполярных транзисторах n и p-типа. С усилительного каскада усиленный сигнал подаётся на электромагниты, которые воздействуют на подвешенное тело. Схема питается от 4-х вольт напряжения и в сбалансированном состоянии потребляет от 100 до 300 миллиампер. Схему можно запитать от литиевой аккумуляторной батареи. На последнем канале операционного усилителя построен супервизор питания с использованием микросхемы TL431, которая отключает нижнюю подсветку при напряжении менее 3,6 вольта это сигнал к подзарядке аккумулятора [20].

Разводка схемы на печатную плату была выполнена в программе Altium Designer, рисунок 4.3, 4.4.

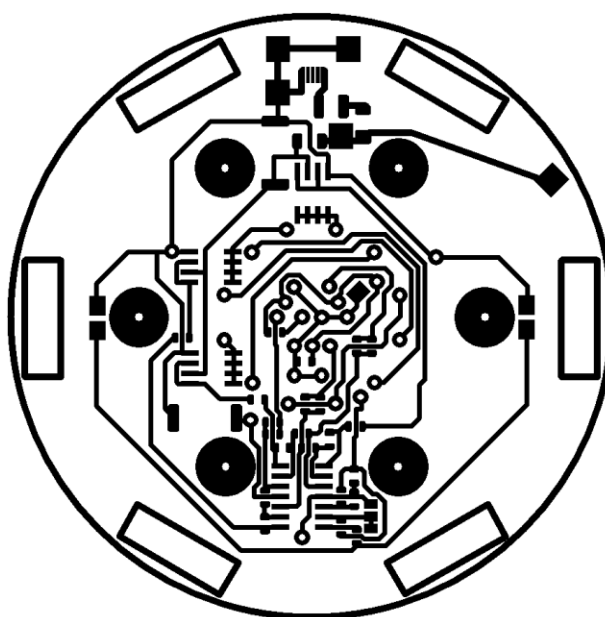


Рисунок 4.3 Печатная плата комбинированной магнитной установки.

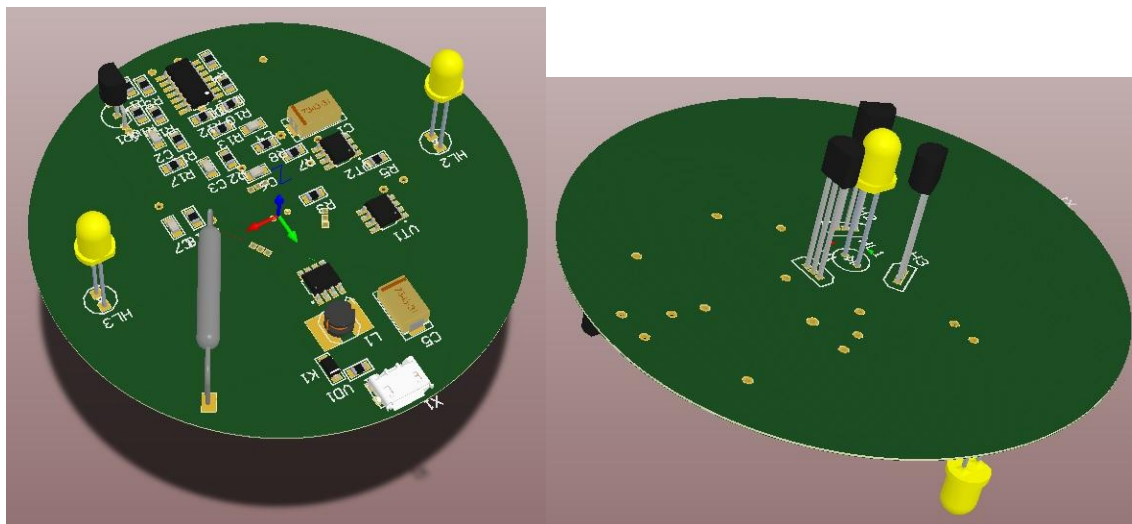


Рисунок 4.4 3D плата в Altium Designer.

Электромагниты были выполнены на пластиковом каркасе и имеют следующие характеристики (рисунок 4.5):

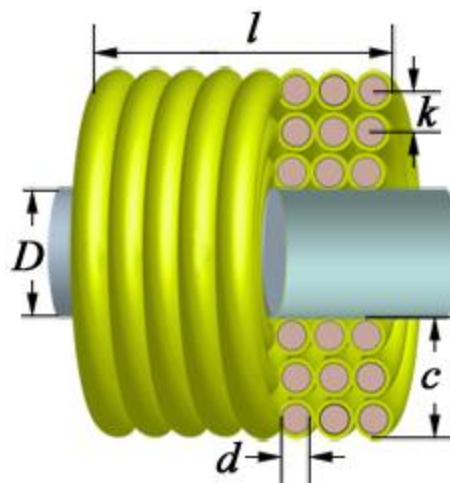


Рисунок 4.5 Многослойная катушка.

Диаметр каркаса D : 5 мм

Длина намотки l : 10 мм

Толщина катушки c : 7 мм

Сопротивление катушки постоянному току 4 Ом

Диаметр провода с изоляцией k : 0,3 мм

Расчётная индуктивность: 2997,04 мкГн

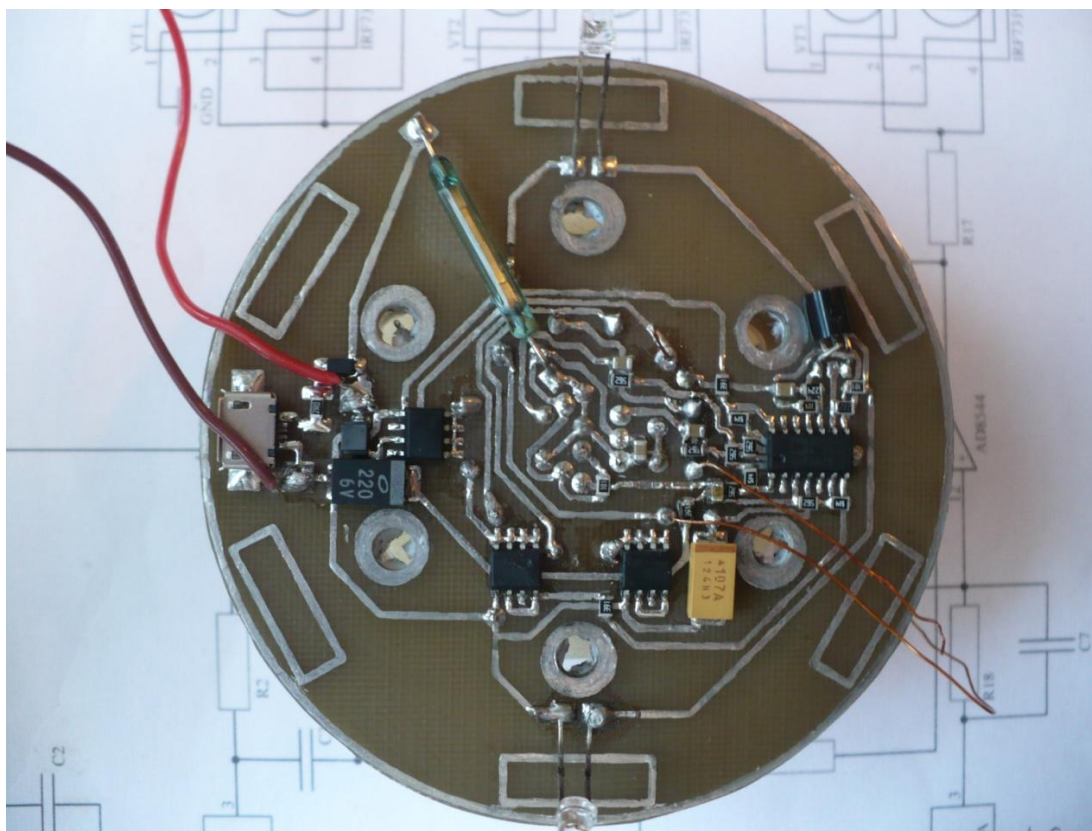


Рисунок 4.6 Разведённая и спаянная плата.

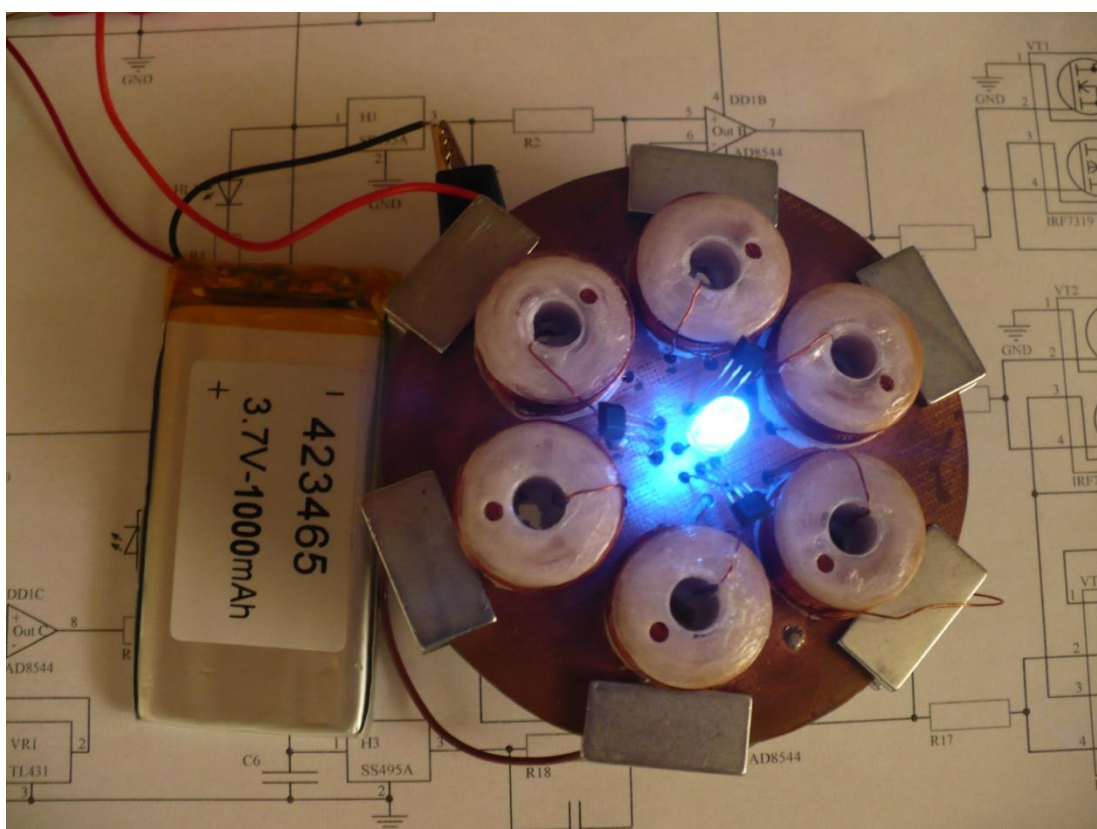


Рисунок 4.7 Вид платы на датчики и электромагниты.

Заключение

В данной бакалаврской работе осуществлено теоретическое исследование, проектирование, математическое моделирование, изготовление и отладка установки магнитного надвеса.

Установка позволяет удерживать в подвешенном положении магнитный диск диаметром 20 миллиметров и весом, приблизительно, 20 грамм. Данная установка может использоваться в качестве демонстрационного экспонатов ходе учебного процесса, на выставках и при агитации абитуриентов.

Список литературы

1. Егоров О. Д., Подураев, Ю. В. Конструирование мехатронных модулей. – М.: Издательство МГТУ «Станкин», 2004. – 368 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008 – 368 с.
3. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости: Монография. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 360 с.
4. Цыган А.Б., Цыган Б.Г., Мокроусов С.Д. Современное вагоностроение: Монография: в 4-х т. – Том I: Железнодорожный подвижной состав. — Харьков: Корпорация «Техностандарт», 2008. – 432 с.
5. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. — СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
6. Вышков Ю. Д., Иванов В. И. Магнитные опоры в автоматике. — М.: Энергия, 1978. – 160 с.
7. Осокин Ю. А., Герди В. Н., Майков К. А., Станкевич Н. Н. Теория и применение электромагнитных подвесов. — М.: Машиностроение, 1980. – 284 с.
8. Буль Б. К., Буль О. Б., Азанов В. А., Шоффа В. Н. Электромеханические аппараты автоматики: Учеб. для вузов по спец. «Электрич. аппараты». — М.: Высш. шк., 1988. – 303 с.
9. Мартыненко Ю.Г. О проблемах левитации тел в силовых полях. Статья Соросовского Образовательного журнала, 1996. – с. 1-8.
10. ELCUT®. Моделирование двумерных магнитных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя // Производственный кооператив ТОР. - Санкт-Петербург, 2005. – 345 с.
11. Кузнецов Б.Ф. Проектирование электронных промышленных устройств. Методические указания по курсовому проектированию / Ангарск. Изд-во: Ангарской государственной технической академии, 2011. – 56 с.

12. Брагин В.П., Булатов Н.П., Гаршенин В.Г., Павлов П.С., Сметания Б.М., Цейтлин И.Е., Шаферов В.П. Техническое творчество. Пособие для руководителей технических кружков / Б.М. Сметанин. - Москва: Издательство «Молодая гвардия», 1956. – 520 с.
13. Фризен В. Э., Черных И. В., Бычков С. А., Тарасов Ф. Е.. Методы расчета электрических и магнитных полей : учебный комплект. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 176 с
14. Ковалев Л.К., Конеев С.М., Полтавец В.Н., Гончаров М.В., Ильясов Р.И. Магнитные подвесы с использованием объемных ВТСП элементов для перспективных систем высокоскоростного наземного транспорта. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 38, 2007. – с. 36-40.
15. Буль О.Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / О. Б. Болеславович. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336с.
16. Хмельник С.И., О притяжении постоянных магнитов. Доклады независимых авторов. Журнал «Физика и Астрономия». Выпуск №10, 2008. – с. 211-222.
17. Байда Е.И. Б 12 Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: учебно-методическое пособие. – Х.: 2015. – 147 с.
18. Анцев Г.В., Богословский С.В., Сапожников Г.А. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом. М.: Наука, 2010. - 422 с.
19. Александров К.К., Кузьмина Е.Г. Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатом издат. 1990. – 288 с.
20. Levitator Автор: crocodil, crocodil@mail.ua Опубликовано 15.01.2014. <http://radiokot.ru/circuit/analog/games/26/> дата посещения: 15.05.2016.