

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

Институт транспортных систем и технологий

ИТСТ НАНУ «Трансмаг»

На правах рукописи

НОВИКОВ Владимир Фёдорович

УДК 629.423.31.016.56

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

05.22.09 – Электротранспорт

***Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук***

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
доцент В.Э. Воскобойник

Днепропетровск-2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
Общая характеристика работы	4
1 Тяговые линейные двигатели высокоскоростного наземного транспорта	11
1.1 Высокоскоростной транспорт	11
1.2 Первые патенты	15
1.3 Бесконтактный высокоскоростной транспорт	18
1.4 Использование линейного двигателя в традиционном железнодорожном транспорте	22
1.5 Линейный синхронный электродвигатель	24
1.6 Основные магнитные характеристики постоянных магнитов	25
1.7 Методы измерения индукции магнитного поля	30
1.8 Поле блока постоянных магнитов	38
2 Расчётно-экспериментальный метод определения параметров двигателя высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа	43
2.1 Постоянные магниты как источник поля возбуждения	43
2.2 Идея расчётно-экспериментального метода	44
2.3 Идея создания математической модели	46
2.4 Исследование источников постоянного магнитного поля	47
2.5 Определение зависимости величины и качества тягового усилия от конструкции	48
2.6 Экспериментальное определение тягового усилия для различных конструкций экипажа	50
3 Моделирование линейного двигателя высокоскоростного транспортного средства	51

3.1 Допущения, принятые при разработке математической модели двигателя с возбуждением от постоянных магнитов	51
3.2 Разработка математической модели линейного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов	53
4 Исследование взаимодействия блока постоянных магнитов с катушкой путевой структуры	63
4.1 Метод определения потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения	63
4.2 Анализ гармонических составляющих зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения	71
5 Выбор рациональных параметров экспериментального экипажа линейного стенда на основе разработанных теоретических положений	87
5.1 Конструкция экспериментального стенда	87
5.2 Исследования матмодели ЛСД при питании от источника напряжения и разных конфигурациях системы возбуждения	94
5.3 Анализ исследования матмодели ЛСД при питании от источника напряжения	104
5.4 Метод измерения тягового усилия	105
5.5 Экспериментальное исследование тяговых характеристик ЛСТЭП линейного стенда	107
5.6 Исследование влияния конструкции двигателя на электромеханические параметры линейного синхронного электродвигателя	112
Заключение	115
Перечень ссылок	118
Приложения	130

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В начале третьего тысячелетия полноценный рост производительных сил и решение возникающих в связи с этим транспортных проблем невозможно без высокоскоростных наземных транспортных систем (ВСНТ), осуществляющих перевозку пассажиров и грузов со скоростями порядка 500 км/ч и выше, и, подобно глобальному метрополитену, связывающих в одно целое основные научно-промышленные центры. Такой транспорт сблизит время междугородных перевозок и внутригородских переездов, что позволит более эффективно использовать кадровый и экономический потенциалы разных регионов и стран. Поэтому создание ВСНТ является назревшей проблемой для дальнейшего технического, экономического и социального развития общества.

Перспективным направлением решения этой проблемы является разработка бесконтактного транспорта на магнитном подвесе, в котором левитация (подвес) и движение транспортного средства осуществляются при помощи магнитного поля.

Существуют две основные системы магнитного подвеса (левитации) для ВСНТ:

1. Электромагнитный подвес (ЭМП), в котором используется притяжение электромагнитов поезда к ферромагнитной путевой структуре (Германия, Китай, США).

2. Электродинамический подвес (ЭДП), основанный на эффекте отталкивания, который возникает при взаимодействии магнитного поля автономного движущегося источника постоянного магнитного поля с полем вихревых токов, наведенных им в электропроводящей путевой структуре (Япония, США, Украина).

В системе ЭДП используются автономные источники постоянного магнитного поля, при этом зазор между экипажем и путевой структурой достигает 100-200 мм, что делает невозможным применение асинхронного двигателя, и требует применения привода на базе линейного синхронного

электродвигателя (ЛСД) с возбуждением от автономных источников постоянного магнитного поля, которые также обеспечивают левитацию и стабилизацию направления. Ранее для этих целей использовались сверхпроводящие магниты, работающие в режиме «замороженного потока», но, в последнее время, резко снизилась стоимость и выросла коэрцитивная сила постоянных магнитов. При сохранении данного тренда вырисовывается перспектива их использования в высокоэнергетичных системах левитации и тяги, что значительно снижает стоимость строительства и эксплуатации ВСНТ.

Практическая реализация такой системы сдерживается наличием целого комплекса нерешенных научно-технических проблем. Недостаточно разработаны методы расчета силовых взаимодействий в линейных синхронных двигателях с возбуждением от постоянных магнитов, известные конструктивные решения таких двигателей не удовлетворяют современным требованиям.

Следует подчеркнуть, что данные исследования представляют значительный интерес не только для создания ВСНТ, но и для других областей техники, где используется взаимодействие источника постоянного магнитного поля с катушкой. Таким образом, указанная проблема имеет общенаучное и общетехническое значение. Все это свидетельствует о перспективности, важности и актуальности диссертационного исследования.

Связь работы с научными программами, планами и темами.

Работа выполнялась по Постановлениям Кабинета Министров Украины от 1996 р № 517 и Президиума НАН Украины от 1995 № 47, темам НАН Украины от 1996 № 1.3.6.9 (№ госрегистрации 0196U001412) «Решение проблем создания перспективных транспортных систем и разработка средств их автономного энергообеспечения», от 2001 № 1.3.6.11 (№ госрегистрации 0101U004480) «Исследования и разработки в области создания магнитолевитирующих транспортных систем и модулей бортового энергообеспечения», от 2002 № 1.3.6.12 (№ госрегистрации 0102U005341)

«Развитие методов исследования динамики и нагруженности новых и нетрадиционных видов транспорта», от 2007 № 1.3.6.14 (№ госрегистрации 0107U001166) «Развитие методов исследования механики транспортных средств и энергетических систем».

Цель и задачи исследования.

Целью работы является обоснование эффективных принципов и методов расчёта рациональных параметров тягового линейного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов высокоскоростного электротранспорта.

Выполнение этой цели возможно при решении следующих заданий:

1) разработка математической модели линейного синхронного электродвигателя для высокоскоростного электротранспорта с возбуждением от источника постоянного магнитного поля, в которой не используются взаимные индуктивности эквивалентных катушек с катушками путевой структуры, кроме того, отсутствует зависимость параметров их взаимодействия от времени;

2) разработка методов и средств исследования источников постоянного магнитного поля возбуждения для таких двигателей;

3) разработка метода определения зависимости величины и качества тягового усилия от различных параметров конструкции путевой структуры и экипажной части линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля;

4) разработка метода и средств исследования величины и качества тягового усилия линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля;

5) обоснование и постановка эксперимента для подтверждения адекватности разработанной модели и эффективности разработанных методов.

Объектом исследования является процесс преобразования энергии в тяговом линейном двигателе высокоскоростного электротранспорта

Предметом исследования являются конструктивные параметры тягового линейного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного электротранспорта

Методы исследования.

При выполнении работы использовались:

- анализ и обобщение научно-технических публикаций по высокоскоростному наземному транспорту, линейным электродвигателям и постоянным магнитам для выбора подходов к решению поставленных задач в первой главе;
- методы математического и физического моделирования тягового линейного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля для теоретического и практического исследования его работы в третьем и пятом разделах;
- методы анализа и синтеза с помощью рядов Фурье для аналитической линеаризации нелинейных зависимостей, что необходимо для снижения трудоемкости расчетов двигателя в третьем, четвертом и пятом разделах;
- методы непосредственного измерения и численного анализа полученных результатов для определения связи различных параметров конструкции линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля с величиной и качеством тягового усилия в четвертом и пятом разделах;
- экспериментальные исследования для подтверждения полученных результатов в пятом разделе.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые получены аналитические зависимости величины потокосцепления источника постоянного магнитного поля возбуждения с катушкой путевой структуры, позволяет, на основе предложенной математической модели, определить рациональные конструктивные параметры тягового линейного электродвигателя высокоскоростного электротранспорта.

2. Впервые разработан расчетно-экспериментальный метод определения потокосцепления источника постоянного магнитного поля с катушкой путевой структуры любой формы и различного расположения на заданной плоскости за счет изменения границ интегрирования, что позволило получить эмпирические и аналитические зависимости для различных конструктивных параметров линейного двигателя.

3. Впервые разработан метод измерения знакопеременного тягового усилия, возникающего при взаимодействии постоянного магнитного поля возбуждения с катушкой путевой структуры, основанный на преобразовании усилия из знакопеременного в переменное усилие одного знака путем подачи в систему измерения дополнительной постоянной нагрузки, превышающей отрицательное значение тягового усилия, что позволило подтвердить адекватность предложенной математической модели и применимость разработанных методов.

Практическое значение полученных результатов.

1) разработаны математические модели тягового линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля и методы определения тягового усилия в нем для питания от источника тока и источника напряжения, которые могут быть использованы при проектировании ВСНТ;

2) разработан и создан стенд для исследования источников постоянного магнитного поля с помощью которого получены зависимости их взаимодействия от разных параметров конструкции линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля, что позволило разработать рекомендации для рационализации геометрических размеров и взаимного расположения катушек путевой структуры, а также конфигурации системы возбуждения, расположенной на экипаже с точки зрения величины и качества тягового усилия.

3) разработан и создан стенд для испытания линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного

поля, что позволило провести физическое моделирование работы линейного электродвигателя ВСНТ;

Результаты исследований внедрены при проектировании 3-й очереди горно-обогатительного комбината ООО ПКФ «Велта» и в учебном процессе Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна при изучении дисциплины «Высокоскоростной наземный транспорт» студентами 4-го курса специальности 7.05070203 - Электрический транспорт.

Личный вклад соискателя.

Постановка цели и задачи исследований выполнена совместно с научным руководителем. В публикациях, в которых отражены основные результаты диссертации автор диссертации принимал участие в обсуждении постановки задачи и результатов, а также проведении исследований: в [1-5], в [6] автор разработал метод, участвовал в подготовке и проведении эксперимента, обработал результаты. Работа [7] автором выполнена самостоятельно.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались на IX Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" Днепропетровск – 1996г., X Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта". Днепропетровск. – 2000 г., Конструктори електротранспорту: Наукові читання з циклу: “Видатні конструктори України”. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут. Державний політехнічний музей. – Київ – 2003 г., XI Международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» Днепропетровск. – 2004 г., 65 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» Днепропетровск. – 2005 г., 66 Международной научно-практической конференции "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта" Днепропетровск. –

2006 г., 67 Международной научно-практической конференции "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта" Днепропетровск. – 2007 г., 76-й Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» –2016 г.

Публикации.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных трудах, в том числе 7 статей в специализированных изданиях, из которых 1 статья [7] опубликована в издании, входящем в перечень научно-метрической базы Index Copernicus, 7 в тезисах докладов и материалах конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, перечня использованной литературы и приложений. Основной текст диссертации изложен на 114 страницах. Диссертация содержит 57 рисунков, в т.ч. 3 отдельных страницы, 6 таблиц, 98 наименований литературных источников, размещённых на 12 страницах, 2 приложения на 3 страницах.

Полный объём диссертации 132 страницы.

1. ТЯГОВЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

С давних пор человечество стремилось, не только обеспечить коммуникации между различными территориями, но и уменьшить усилия и время, затрачиваемые на перемещение людей и грузов. Использование верховых и вьючных животных, а также плавательных средств, привело к постепенному снижению затрат усилий и времени. Но, кардинальное решение этой триединой задачи стало возможным после появления механических и электрических систем привода. Их развитие привело к созданию высокоскоростного транспорта в современном понимании этого слова.

1.1. Высокоскоростной транспорт

В настоящее время высокоскоростной транспорт имеет два вектора развития:

- авиационно-космический;
- наземный.

Последний, в свою очередь, подразделяется на два крупных вида:

- свободного перемещения;
- путенаправляемый.

Классическим примером транспорта свободного перемещения является автомобильный, но для достижения высоких скоростей движения транспорт свободного перемещения становится частично путенаправляемым, т.к., при соблюдении требований безопасности, быстро ездить можно только по хорошим дорогам, а очень быстро – по очень хорошим.

Классическим примером путенаправляемого транспорта является железнодорожный.

В настоящее время высокоскоростным считается транспорт, скорость движения которого более чем в 2-3 раза превышает среднюю скорость движения соответствующего вида транспорта.

Для условий Украины, например, при средней скорости движения поездов 50-70 км/ч высокоскоростными считаются поезда со скоростью 160 км/ч и выше. Поскольку ж/д транспорт с реактивными двигателями [8], который разрабатывался в Днепропетровске под руководством академика В.А.Лазаряна [9], не вышел за стадию экспериментального образца, а дизельный транспорт в высокоскоростном движении не применяется, в дальнейшем рассматривается электрифицированный транспорт.

Повышение скорости движения традиционного железнодорожного транспорта вызывает необходимость решения следующих проблем:

- уменьшение коэффициента сцепления колеса с рельсом;
- уменьшение коэффициента трения тормозных колодок;
- увеличение динамических нагрузок в системе колесо – рельс;
- передача электроэнергии на движущийся поезд через скользящий токосъём.

Первые три проблемы связаны непосредственно с тем, что в традиционном железнодорожном транспорте колесо выполняет две функции:

- функция движителя;
- функция опирания.

Первые две проблемы связаны непосредственно с функцией движителя.

Движущая сила в традиционном рельсовом транспорте реализуется в месте контакта колесо-рельс (рис. 1.1) [10]. На величину усилия, которое можно реализовать через этот контакт, влияют многие факторы: физико-механические свойства материала, степень изношенности и загрязнённости контактной поверхности колеса и рельса, кроме того, усилие, прижимающее колесо к рельсу (нагрузка на ось), а также, при прочих равных условиях, скорость движения. Эта эмпирическая зависимость, выраженная через

коэффициент сцепления, который является отношением максимального тягового усилия к нагрузке на ось, имеет вид, представленный на рис. 1.2 [10]. Для увеличения силы тяги необходимо повышать нагрузку на ось, что ограничивается прочностью материалов и конструкции пути, и увеличивать количество ведущих осей. Отсюда понятно, почему высокоскоростные поезда в Европе являются моторвагонным подвижным составом.

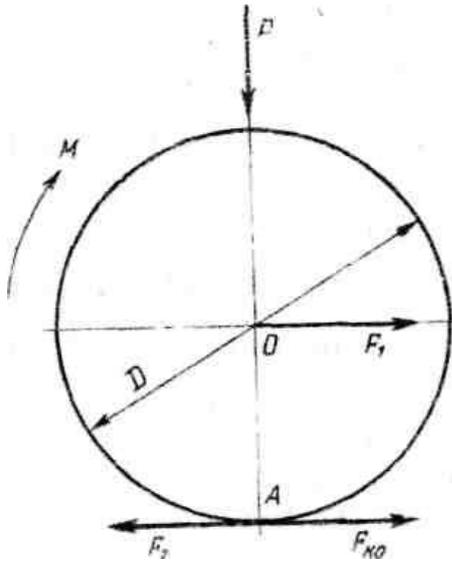


Рисунок 1.1 Возникновение тягового усилия на ободу колеса
 M - момент вращения;
 F_1 - сила тяги; P - нагрузка на ось;
 F_2 - сила сцепления;
 $F_{к0}$ - реакция рельса.

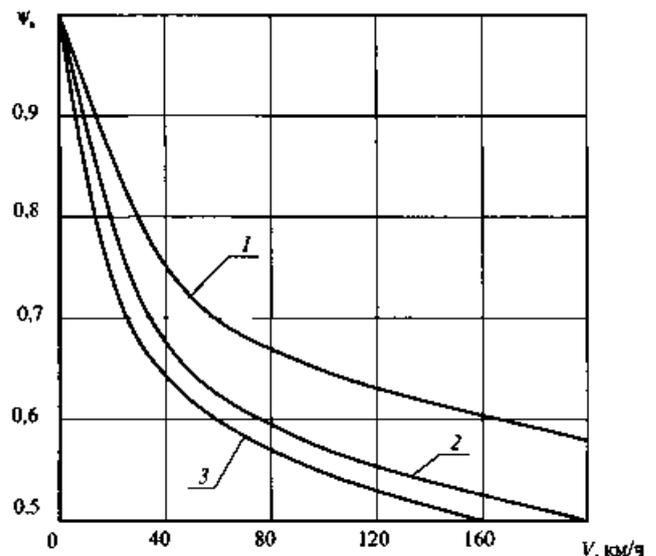


Рис. 1.2. График скорости для определения расчетного коэффициента сцепления колес с рельсами:
 1 — пассажирский подвижной состав,
 2 — локомотивы,
 3 — грузовые вагоны

В режиме торможения для создания замедляющего усилия, которое также реализуется в точке контакта колесо-рельс, используются колодочные или дисковые тормоза. При этом, кроме сцепления колеса с рельсом, важную роль играет трение между колодкой и бандажом колеса. Эмпирическая зависимость между коэффициентом сцепления, представляющим собой отношение возникающей в зоне контакта силы трения к силе прижатия колодки к колесу, имеет вид, представленный на рис. 1.3 [10]. Для повышения тормозного момента на оси колеса необходимо увеличивать количество тормозных колодок и усилия на них, что приводит к усложнению,

утяжелению и, как следствие, снижению надёжности рычажной передачи и тормозной системы в целом.

Зависимость действительного коэффициента трения стандартных чугунных тормозных колодок от скорости движения (v) и нажатия на колодку (K).

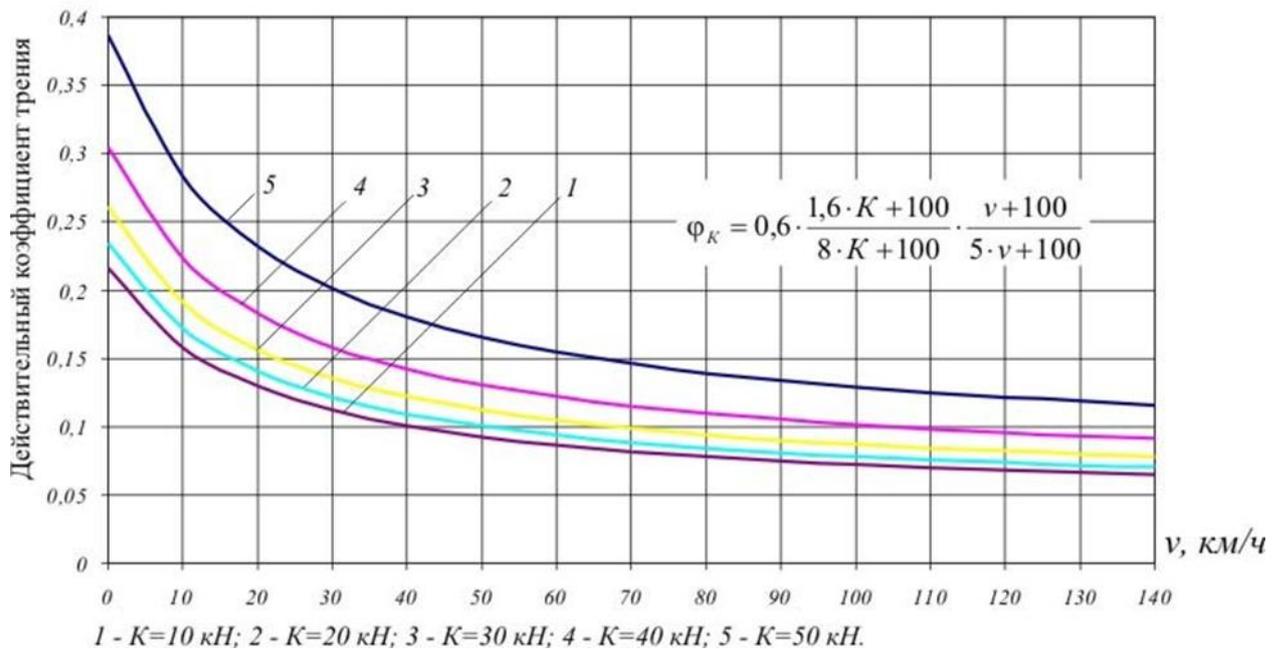


Рис. 1.3. График для определения коэффициента трения тормозных колодок о колесо для различных нажатий

Сложение этих двух факторов приводит к резкому падению тормозной силы при увеличении скорости движения, что однозначно противоречит требованию обеспечения безопасности движения. Для решения этой проблемы используются тормоза, не связанные с колёсной парой (аэродинамические, магниторельсовые и т.п.) [11, 12].

Дополнительно сцепление колеса с рельсом ухудшается вследствие ударных нагрузок, которые возрастают с ростом скорости. Для уменьшения ударных нагрузок используется т.н. «бархатный путь» и снижение неподрессоренных масс. Данная проблема лишь частично связана с функцией колеса, как движителя.

Проблема токосъёма при высоких скоростях решается путём смягчения токоприёмника и уменьшением тока, пропускаемого каждым токоприёмником за счёт увеличения их количества

. В настоящее время существует несколько подходов к решению основных проблем высокоскоростного железнодорожного транспорта:

- микширование данных проблем путём ужесточения требований к путевому полотну, распределения тяговых усилий по большому количеству колёсных пар, подрессоривания двигателей и т.п. (TGV);
- переход на бесконтактный транспорт (MAGLEV, TRANSRAPID, INDUCTRUCK);
- использование колёс только для опирания и направления, а для тяги и торможения использование линейного электропривода (Bombardier).

Последние два подхода предполагают использование линейного электропривода.

1.2. Первые патенты

Патенты на высокоскоростные транспортные системы выдавались множеству изобретателей по всему миру. Ранние патенты Соединенных Штатов для поезда движимого линейным двигателем предоставлялись изобретателю А. Зедену (Германия). Изобретатель получил U.S. Patent 782,312 (21 июня 1902) [13] и U.S. Patent RE12,700 (21 августа 1907) [14]. В 1907, другая ранняя электромагнитная система была разработана F. S. Смитом [15]. Ряд немецких патентов для поездов на магнитной подушке с линейным двигателем были выданы Hermann Kemper между 1937 и 1941 (GR643316(1937), GR44302(1938), GR707032(1941)). Ранний современный тип поезда maglev был описан в U.S. Patent 3,158,765, Магнитная система транспортировки, G. R. Polgreen (25 августа 1959) [16]. Первое использование термина "maglev" было в патенте Соединенных Штатов "Система направления при магнитном подвесе", полученном фирмой Canadian Patents and Development Limited [17]. В Англии в 1902 году

А. Зеденом был получен патент на конструкции трехфазных линейных асинхронных двигателей с плоским (одно- и двусторонним) индуктором и массивным (стальным, или немагнитным) вторичным элементом.

Учитывая открытие в 1911 году Х. Камерлинг-Оннесом (Нидерланды) явления сверхпроводимости, за которое он получил Нобелевскую премию в 1913 году, вышеприведенные изобретения привели к развитию теории магнитолевитирующего транспорта.

В 1910 году Э. Башеле во Франции построил первую модель вагона на магнитном подвесе (по другим источникам, в 1912 году). Практически в то же время, в 1911 году профессор Томского технологического института Б.П. Вейнберг изобрел поезд на электромагнитном подвесе, приводимый в движение линейным синхронным электродвигателем [18,19]. Использование электромагнитов позволяло реализовывать усилия, необходимые для поддержания на весу вагонов с пассажирами и позволяло видеть в магнитопланах не просто оригинальные физические опыты, а реальное транспортное средство.

В том же году Вайнбергом была построена экспериментальная стендовая установка с вагончиком весом 10 кг (рис. 1.4). Опыты, проведенные в 1911-1913 году, оказались успешными (в отсутствие силовой полупроводниковой электроники).

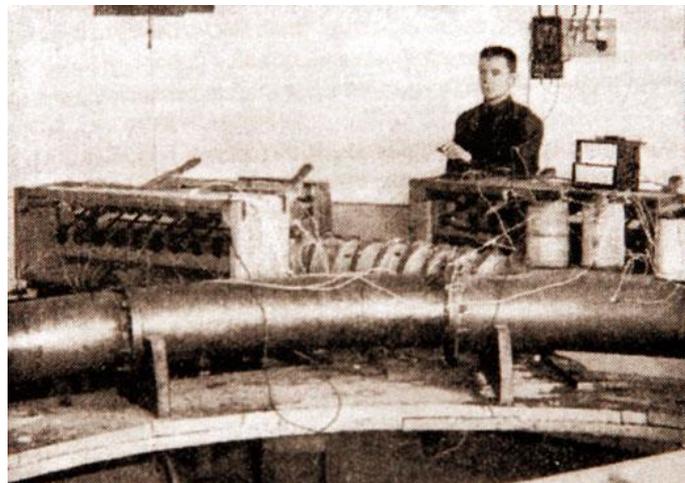


Рисунок 1.4. Экспериментальная установка Вейнберга

Был разработан проект натурной экспериментальной трассы, на которой предполагалось достичь скорости 800-1000 км/ч (рис. 1.5). Для разгона и торможения возле каждой станции предполагалось соорудить дополнительные линейные двигатели длиной около трех верст. Вагоны должны были двигаться внутри балки, представляющей собой полую трубу; для снижения сопротивления воздуха на трансзвуковой скорости, было предусмотрено создавать в трубе разрежение.

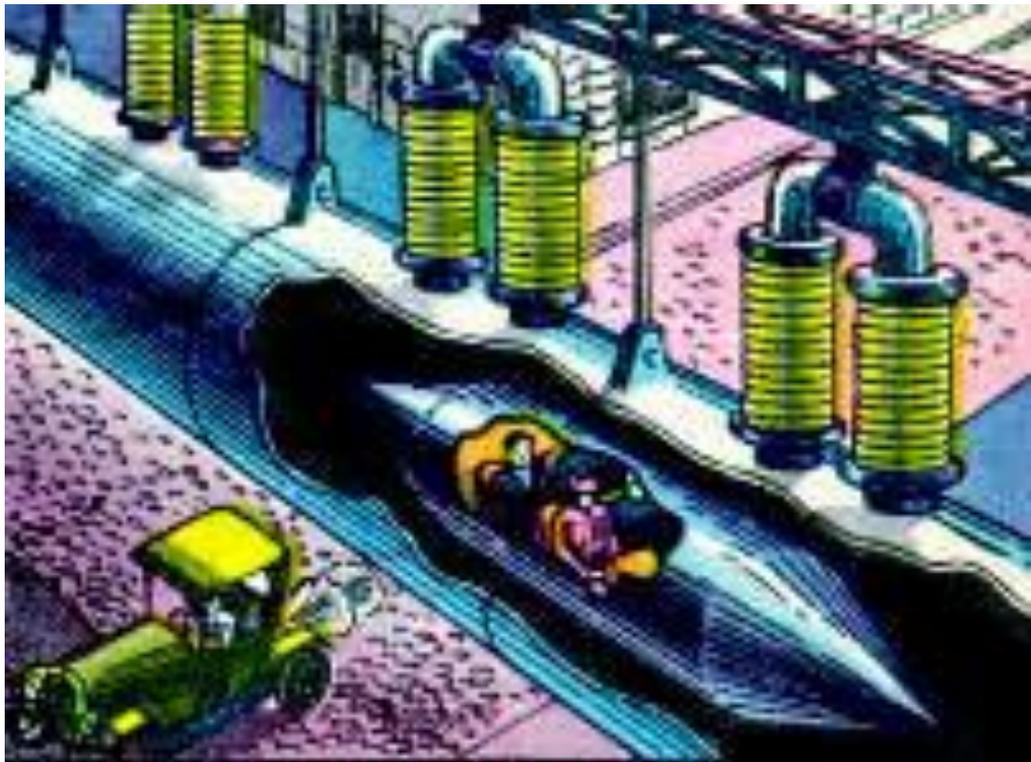


Рисунок 1.5. Проект экспериментальной трассы Вейнберга

В 1922 году Г. Тромбетта в Англии запатентовал и изготовил конструкцию трехфазного асинхронного двигателя с дуговым статором, а также разработал конструкцию кузнечного молота с приводом на основе трехфазного линейного асинхронного двигателя. Впервые сформулировал физическую сущность концевых эффектов в линейных и дуговых двигателях.

В 1935 г. П. А. Фридкин (СССР) изобрел конструкцию дугостаторной синхронной электрической машины с магнитоэлектрическим возбуждением.

В 1939 г. Фирма "General Electric Co" (США) создала и продемонстрировала электромагнитное устройство для бесконтактного подвеса немагнитного токопроводящего тела в виде диска.

В 1945 г. Фирма "Вестингауз" (США) создала линейный асинхронный электропривод для ускорения самолетов во время взлета на авианесущих кораблях. Линейный двигатель с развернутой короткозамкнутой вторичной частью, мощностью почти 7500 кВт, осуществлял разгон самолета массой $4.5 \cdot 10^3$ кг, на полосе взлета 100 м до скорости 360 км/ч за 4,2 с.

В 1946-1947 гг. в СССР Т.Е. Штурман впервые дал аналитическое определение концевых эффектов в линейных асинхронных двигателях. Разработал основы теории концевых эффектов в асинхронных машинах с разомкнутым магнитопроводом.

Всё это создало условия для бурного развития бесконтактного транспорта.

1.3. Бесконтактный высокоскоростной транспорт

С середины XX-го века во многих странах мира стали активно проводиться исследования в направлении практического применения высокоскоростного транспорта.

В 1960-ых, исследование maglev в Соединенных Штатах были недолгими. В Великобритании, однако, Эрик Лэйтвэйт спроектировал функциональный поезд maglev. Его maglev имел одну милю (1.6 км) колеи и был полностью проверен, но его исследование было закрыто в 1973 из-за нехватки финансирования, и его продвижение не было достаточно. В 1970-ых, Германия и Япония также начали исследование и после некоторых неудач, обе нации добились хороших результатов к 1990-ым. Однако, затраты связанные со сверхпроводником остаются барьером к широкому распространению данной технологии

Первым поездом maglev с линейным движителем, лицензированным для перевозки пассажиров был Transrapid 05. В 1979 линия длиной 908 м. была открыта в Гамбурге для Первой международной транспортной выставки (IVA 79). Интерес к проекту был так велик, что линия была увеличена спустя три месяца после окончания выставки, после перевозки более чем 50 000 пассажиров. Линия была пересобрана в Касселе в 1980.

Первой коммерческой автоматизированной системой в мире была экспериментальная линия с медленным maglev-шаттлом, который курсировал от здания Бирмингемского международного аэропорта к соседней Бирмингемской международной железнодорожной станции с 1984 до 1995. Длина линии, разработанной по заказу британского правительства в лабораториях Британского железнодорожного исследовательского отдела в Дерби, была 600 метров (1 969 футов), а поезда "парили" в высоте 15 миллиметров (0.6 дюймов). Линия использовалась в течение почти одиннадцати лет, но проблема морального износа электронных систем (нехватка запасных частей) сделали линию ненадежной в ее более поздних годах эксплуатации, и она была заменена канатной системой. Один из оригинальных вагонов теперь находится в аэропорту и большинство прохожих даже не подозревают о его существовании.

Благоприятные условия для осуществления проекта в Бирмингеме:

1. Вагон весил 3 тонны, но было возможно увеличение веса до 8 тонн.
2. Электроэнергия была легко доступна.
3. Аэропорт и ж/д вокзал были удобными конечными станциями.
4. Требовалось только одно пересечение с общественной дорогой, и не использовались крутые повороты.
5. Земля принадлежала Железной дороге или Аэропорту.
6. Местные бизнесмены и власти были заинтересованы.
7. Государственные вложения и раздельное владение линией привело к тому, что ее стоимость не была высока.

Скорости Маглев на испытательной линии Миядзаки (Япония) регулярно превышали 517 км/ч до 1979, но после несчастного случая, который разрушил поезд, было решено создать новый проект. В течение 1980-ых годов продолжались тесты в Миядзаки перед переходом к намного большей и сложной испытательной линии (20 км длиной) в Yamanashi в конце 1990-ых.

В Tsukuba, Япония (1985), HSST-03 (Linimo) обрел все большую популярность, несмотря на то, что движется на скорости 30 км/ч и проезжает на низкой скорости по Тсукубской мировой выставке.

В Окадзаки, Япония (1987), JR-Maglev совершил испытательную поездку во время проведения выставки в Окадзаки и ездит до сих пор.. В Saitama, Япония (1988), HSST-04-1 выставленный на выставке Saitama, проводимой в Kumagaya, ездит до сих пор. Лучшая скорость в 30 км/ч.

В Йокохама, Япония (1989), HSST-05 получил права на перевозку пассажиров на выставке Йокохамы и проходит испытательную поездку. Максимальная скорость 42 км/ч.

В Ванкувере, Канада (1986), JR-Maglev совершил испытательную поездку во время проведения транспортной выставки в Ванкувере и ездит до сих пор.

В Гамбурге, Германия (1988), TR-07 представлял Гамбург на международной транспортной выставке (IVA88).

В Западном Берлине, M. Bahn был построен в конце 1980-ых. Это была полностью автоматическая маглев система с 1.6-километровой линией, соединяющей три станции. Испытание с пассажиропотоком, началось в августе 1989, а регулярное использование началось в июле 1991. Хотя линия в значительной степени проходила на подвешенном путепроводе, она заканчивалась на станции метро Gleisdreieck, где она использовала платформу, которая не использовалась на то время; платформа была от той линии, которая шла из восточного Берлина. После падения Берлинской стены, было запланировано снова пустить эту линию (сегодняшний U2).

Разрушение линии M. Bahn началось спустя два месяца после того, как она была пушена в регулярную эксплуатацию и было закончено в феврале 1992.

Самый известный быстродействующий maglev в настоящее время используемый в коммерческих целях - линия демонстрации в Германии, построенный фирмой Трансрапид поезд в Шанхае, Китай. Он транспортирует людей 30 км (18.6 миль) к аэропорту за 7 минут 20 секунд, достигая максимальной скорости 431 км/ч (268 миль в час), средняя скорость 250 км/ч (150 миль в час).

Другие коммерчески используемые линии существуют в Японии, типа Linimo линия. По всему миру проекты Маглев рассматриваются на предмет их использования [20,21]. В СССР, а позднее в Украине проводились и проводятся в настоящее время исследования в области магнитолевитирующего транспорта [22-59].

Все эксплуатационное выполнение maglev совершенно не похоже на обычный колесный транспорт и не совместимо с обычной рельсовой линией. Поскольку они не могут использовать существующую инфраструктуру, поезда маглев должны разрабатываться как отдельные системы транспортировки. Термин "maglev" относится не только к транспортным средствам, но и к путевому полотну, определенно разработанному для магнитного подвешивания и движения.

Есть два первичных типа maglev технологии:

1. Электромагнитное подвешивание (ЭМП) - использует притягивающую магнитную силу магнита ниже рельса, чтобы поднять поезд.

В современных системах ЭМП поезд левитирует над стальным рельсом (Рис. 1.6), в то время как электромагниты, присоединенные к поезду, располагаются ниже рельсов. Электромагниты с помощью обратной связи поддерживают постоянный зазор между поездом и рельсом примерно 15 мм.

2. Электродинамическое подвешивание (ЭДП) - используют отталкивающую силу между двумя магнитными полями, чтобы отодвинуть поезд от рельса.

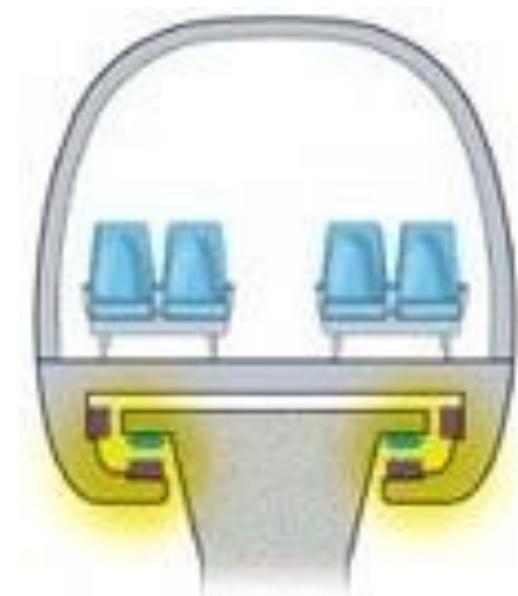


Рисунок 1.6. Электромагнитное подвешивание

При электродинамическом подвешивании (ЭДП) движущееся магнитное поле генерирует в электропроводящем рельсе ток, препятствующий причине своего появления, и поезд поднимается с помощью отталкивающей силы с зазором до десятков сантиметров. (Рис. 1.7).

Другая экспериментальная технология, разработанная, доказанная математически, и запатентованная, но еще не построенная – магнитодинамическое подвешивание (МДП), использует притягивающую магнитную силу постоянного магнита к стальному рельсу, чтобы поддерживать и контролировать поезд.

1.4. Использование линейного двигателя в традиционном железнодорожном транспорте.

Использование магнитного подвеса кардинально решает все проблемы взаимодействия путевого полотна с подвижным составом, но фактор стоимости и техническая сложность вышеприведенных решений привели к

тому, что появились промежуточные решения, основанные на идее полного или частичного лишения колеса функции движителя.

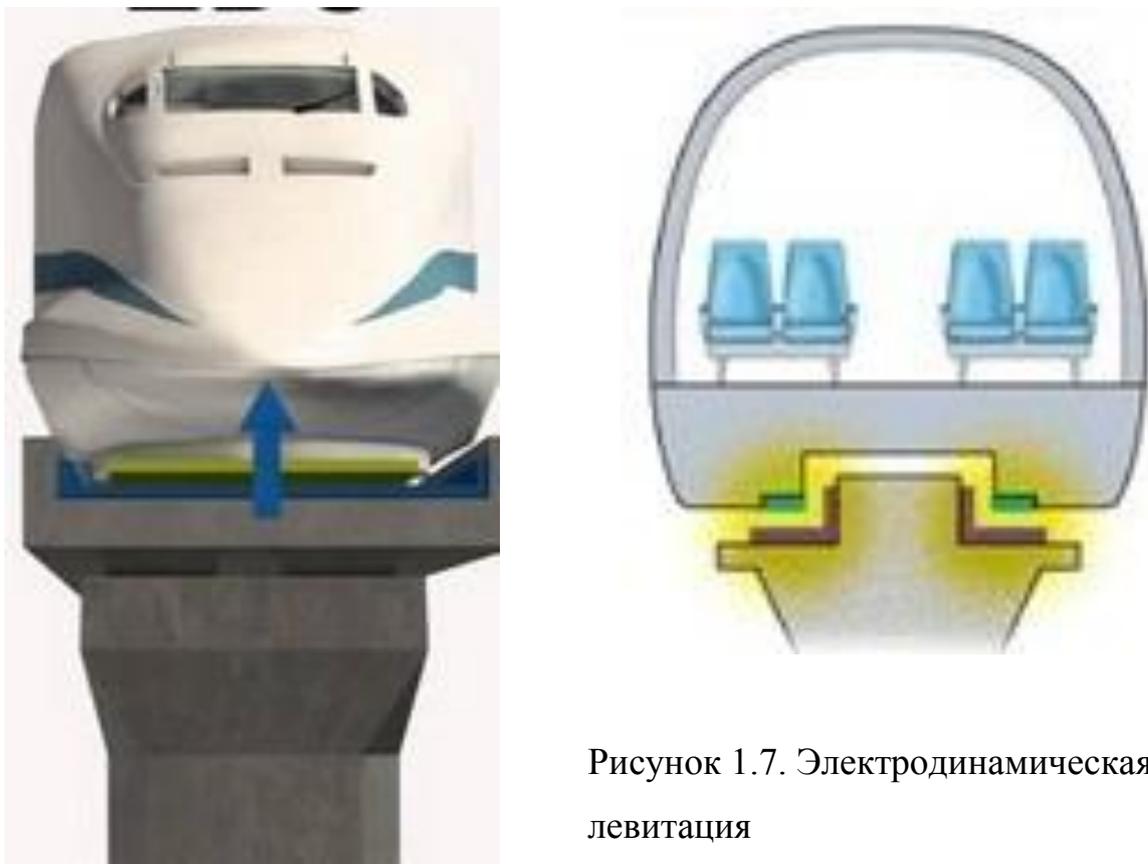


Рисунок 1.7. Электродинамическая левитация

Наибольшего успеха в данном направлении достигла канадская фирма Bombardier Transportation. Транспортная система INNOVIA и INNOVIA APM [60] распространены по всему миру. По эстакаде движется электропоезд, в котором пара колесо-рельс выполняет функцию опирания и направления. Разгон и торможение осуществляется при помощи линейного асинхронного двигателя. Индуктор расположен на подвижном составе, а короткозамкнутая обмотка на путевой структуре. В этом двигателе роль короткозамкнутой обмотки выполняет алюминиевый кожух, который защищает шихтованный магнитопровод от механических повреждений и атмосферных осадков. В некоторых системах колёса обрешинены. Колёсный тормоз используется только при остановке для фиксации положения поезда. В системе INNOVIA

АРМ отсутствует экипаж, и движение происходит под управлением центрального диспетчерского пункта.

Отечественные учёные проводили исследования в направлении использования линейного двигателя в качестве ускорителя или дополнительного привода для железнодорожных поездов и карьерного транспорта [25,61-73]. В силу определённых исторических условий, исследования, в основном, были направлены в сторону использования асинхронного двигателя, что не способствовало развитию теории и методов расчёта линейного синхронного двигателя.

1.5. Линейный синхронный электродвигатель

Исторически сложилось, что линейные двигатели применялись либо в приборах и станках, либо в высокоскоростном транспорте. Для работы синхронной машины с большим воздушным зазором требуется мощный источник постоянного магнитного поля. Ранее, в основном, в синхронных двигателях вращения применялись электромагниты, а в линейных машинах – сверхпроводящие магниты в режиме замороженного потока. Постоянные магниты применялись, обычно, в маломощных приводах, измерительной и прецизионной технике. Вследствие этого методы расчёта мощных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов были слабо разработаны.

В последнее время, благодаря резкому увеличению объёмов производства высококоэрцитивных магнитов, и, соответственно, снижением их стоимости, стало возможным их применение в мощных электрических машинах [74,75]. Для электрических машин с магнитопроводом, с определёнными оговорками, можно применять существующие методы расчётов. Для линейных двигателей применяется метод эквивалентных катушек, который заключается в замене постоянного магнита набором катушек с током, которые создают магнитное поле похожей конфигурации.

Данный метод, к сожалению, очень громоздок, поскольку кроме собственно расчёта машины требует точного определения конфигурации магнитного поля постоянного магнита и набора катушек. При использовании нескольких магнитов задача усложняется в разы, а может быть и на порядки.

Это привело к необходимости разработки обобщённых методов расчёта, учитывающих взаимодействие путевой катушки со сложным источником постоянного магнитного поля неопределённой конфигурации. На данный момент, наиболее сложным для расчёта является магнитное поле группы постоянных магнитов.

1.6. Основные магнитные характеристики постоянных магнитов

Постоянные магниты, как и все магнитные материалы, характеризуются петлей гистерезиса, которая отражает зависимость индукции в теле ферромагнитного материала от напряженности магнитного поля в нем. На рис.1.8 представлены петли гистерезиса по индукции $B=f(H)$ и намагниченности $\mu_0 J=f(H)$. По оси ординат здесь, кроме индукции (B), отложена индукция намагниченности $\mu_0 J$, позволяющая применить для построения петли гистерезиса по намагниченности, тот же масштаб, что и для петли гистерезиса по индукции. Из рис.1.8 видно, что кривая $B=f(H)$ является петлей гистерезиса $\mu_0 J=f(H)$ в другом масштабе.

Для анализа основных параметров постоянных магнитов на рис.1.9 представлена часть петли гистерезиса, называемая кривой размагничивания материала. Эта кривая обычно используется для оценки качеств магнита.

Постоянный магнит характеризуется рядом параметров [76]:

Остаточная индукция B_r . При уменьшении напряженности намагничивающего поля до нуля ($H=0$), индукция в теле магнита не исчезает совершенно, а уменьшается до определенной величины B_r .

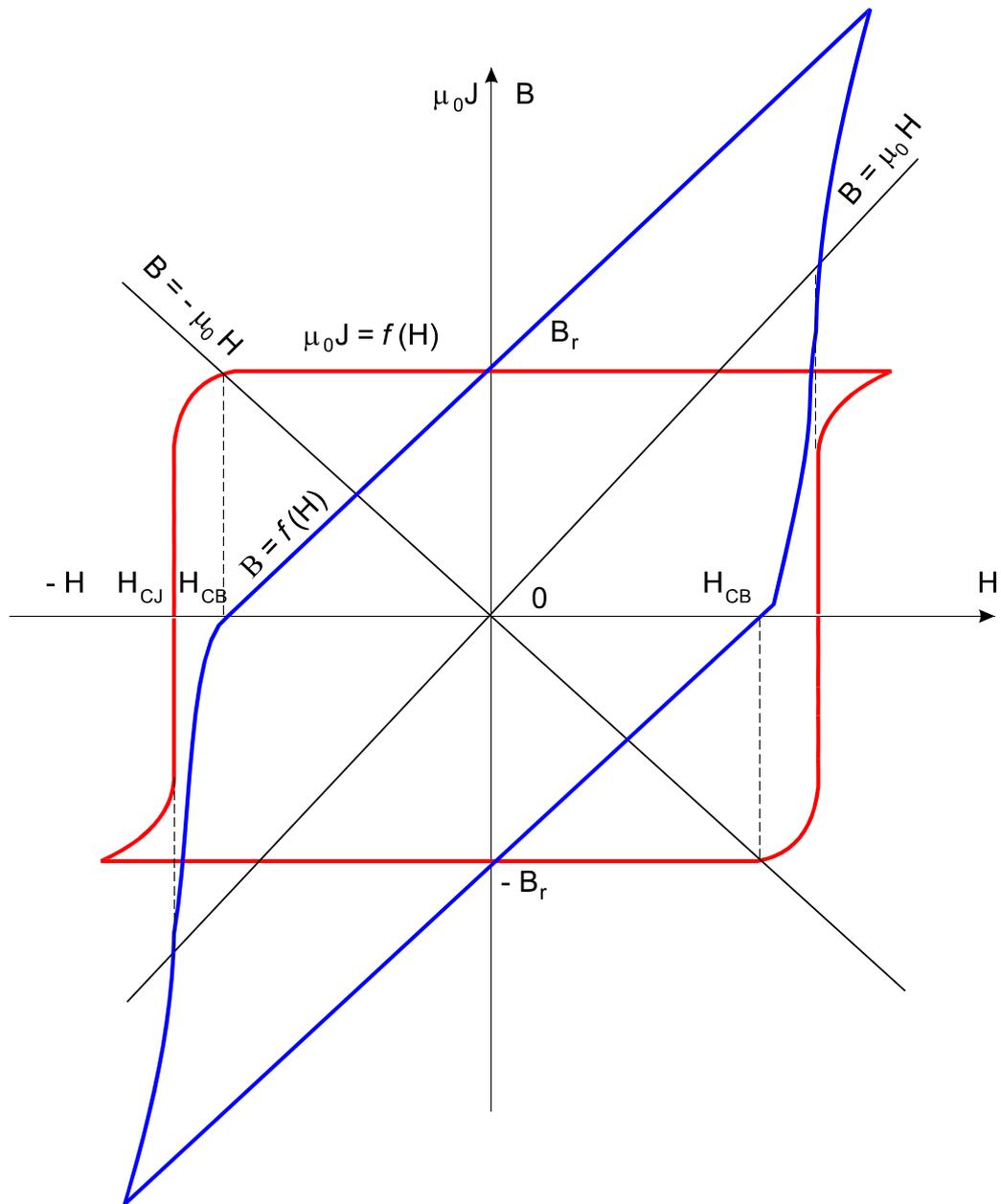


Рисунок 1.8 – Предельные петли гистерезиса $\mu_0 J = f(H)$ и $B = f(H)$

- Коэрцитивная сила по индукции H_{CB} . Это напряженность размагничивающего поля, при которой индукция в предварительно полностью намагниченном материале доходит до нуля.
- Коэрцитивная сила по намагниченности H_{CJ} . Это напряженность размагничивающего поля, при которой намагниченность J , предварительно полностью намагниченного материала доходит до нуля.

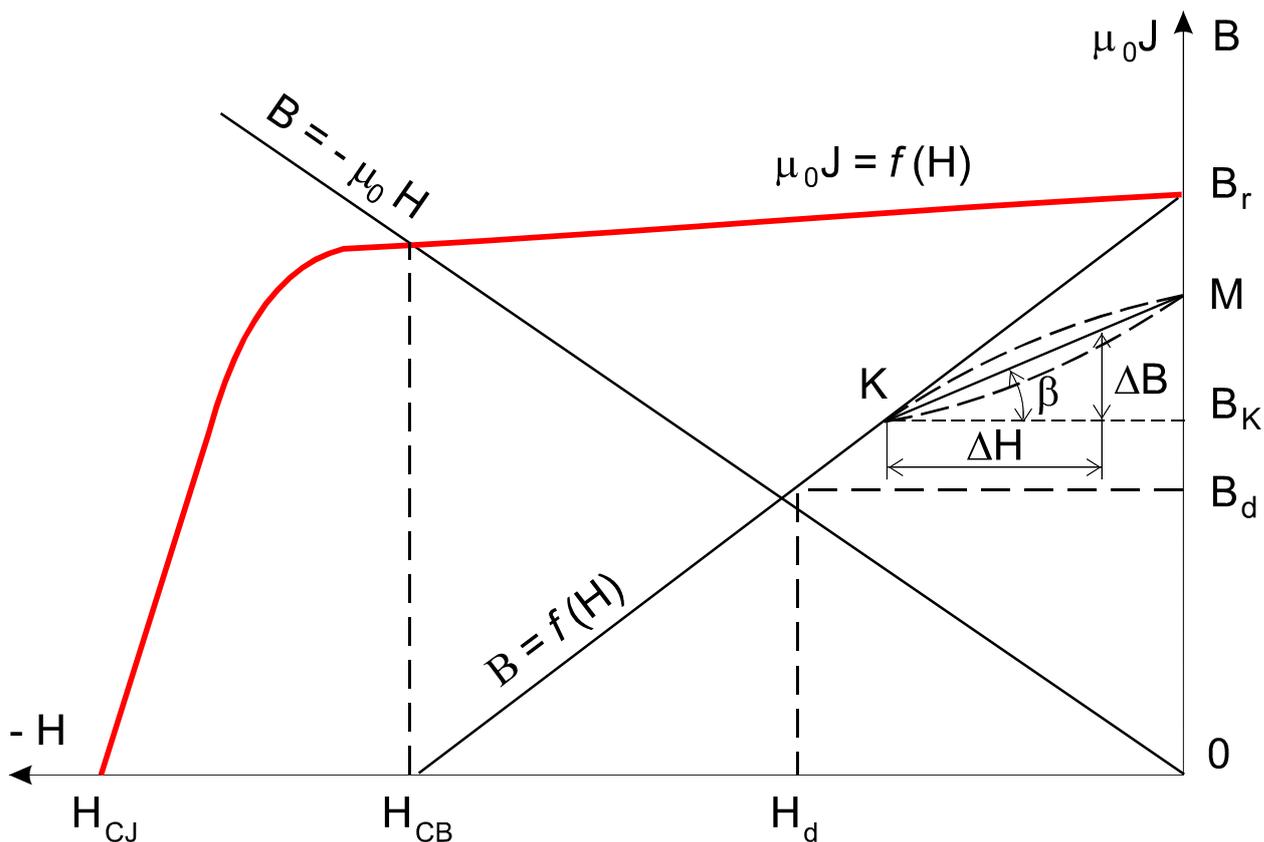


Рисунок 1.9 – Пример кривых размагничивания для объяснения основных параметров постоянных магнитов

- Коэффициент возврата ρ . После снятия размагничивающего поля в какой либо точке К на кривой размагничивания (рис.1.9), магнит, вследствие необратимости процесса возвращается не в первоначальное состояние, определяемое точкой B_r , а в некоторое новое состояние (точка М). При циклических изменениях размагничивающего поля в интервале К-М, индукция изменяется по частичной гистерезисной петле К-М, которую приближенной заменяют прямой, называемой прямой возврата. Коэффициент возврата ρ определяет тангенс угла наклона прямой возврата к оси абсцисс.

$$\rho = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \operatorname{tg} \beta, \text{ Гн/м.} \quad (1.1)$$

- Максимальная удельная магнитная энергия, развиваемая магнитом во внешнем пространстве:

$$A_{\max} = (B_d - H_d)_{\max} - 0,5, \text{ Дж/м} . \quad (1.2)$$

где B_d и H_d – координаты точки на кривой размагничивания, соответствующей максимуму магнитной энергии.

Все существующие магнитно-твердые материалы по признаку получаемых из них материалов можно разделить на две группы. В первую входят материалы, изделия из которых, будучи намагничены вместе с арматурой, полностью восстанавливают свой поток после временного отсоединения арматуры. Вторую группу образуют материалы, изделия из которых при таких условиях теряют заметную часть потока.

Причина столь резкого различия свойств постоянных магнитов, кроется в различии кривых размагничивания по индукции $B=f(H)$. На рис.1.10 представлены кривые размагничивания $\mu_0 J=f(H)$ для двух материалов. Кривая 1 – характерна для материала первой группы, а кривая 2 – для второй. Там же построены две производные кривые 1 и 2 на основании соотношения:

$$B = \mu_0 (J - H), . \quad (1.3)$$

Для построения служит вспомогательная прямая OA с угловым коэффициентом μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная). Любая ордината кривой $B=f(H)$ есть разность ординат кривой $\mu_0 J=f(H)$ и прямой OA . Поэтому абсциссы точек C_1 и C_2 пересечения прямой OA с кривыми 1 и 2 определяют величины коэрцитивной силы H_{CB1} и H_{CB2} . Кривые 1 и 2 имеют линейный участок, заключенный между осью абсцисс и началом колена (точки A_1 и A_2). У кривой 1 точка a_1 лежит левее точки C_1 , а у кривой 2 точка a_2 правее C_2 . Участок кривой 1 между точкой C_1 и осью ординат практически прямолинеен, поэтому участок кривой 1 также прямолинеен. А участок кривой 2 между точкой C_2 и осью ординат криволинеен, поэтому кривая $B=f(H)$ имеет вид гиперболы. В соответствии с этим материалы первой группы следует называть закритическими, а материалы второй группы – докритическими.

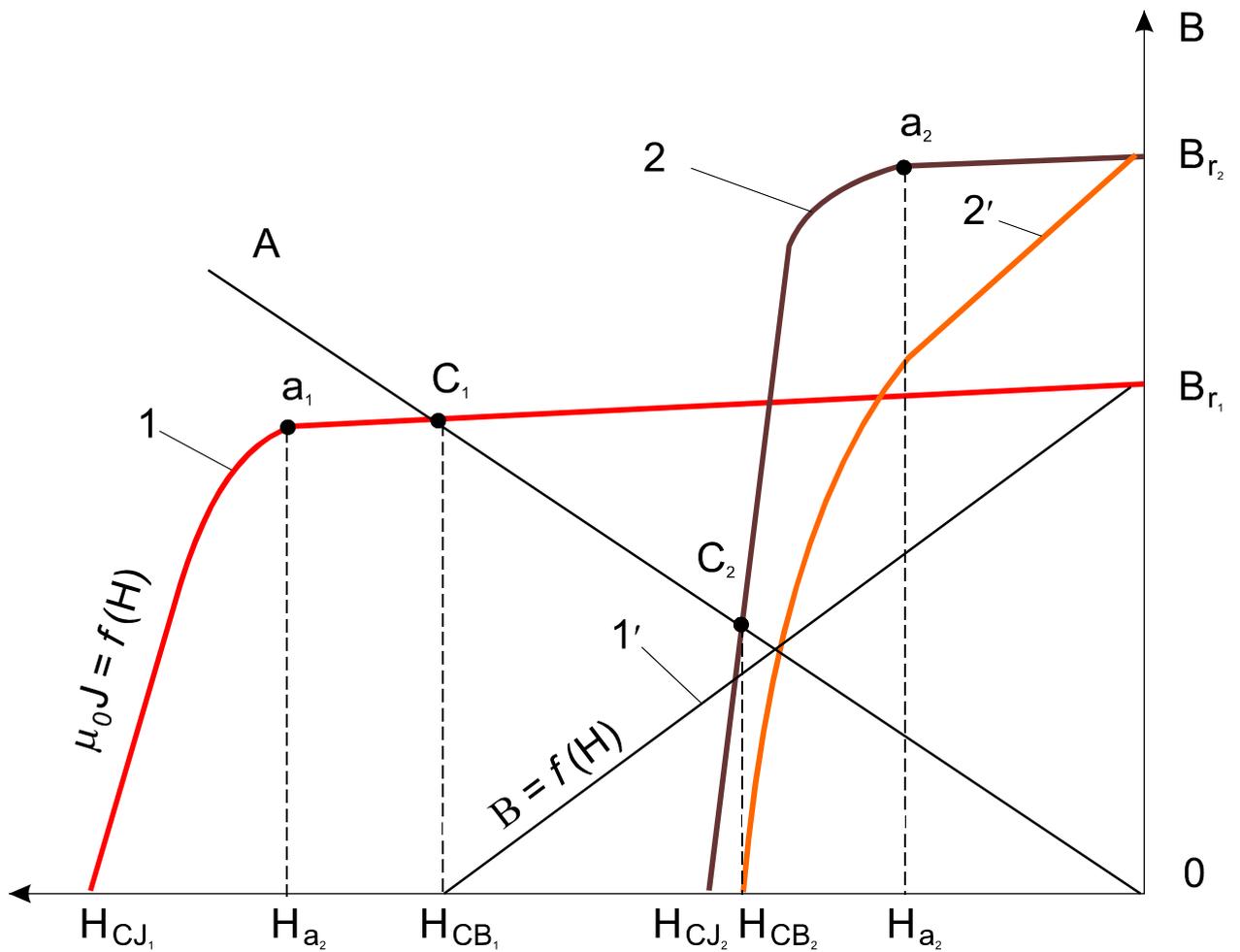


Рисунок 1.10 – Кривые размагничивания материалов 1-й и 2-й группы

В группу закритических материалов входят интерметаллические соединения редкоземельных металлов и те из магнитотвёрдых ферритов, у которых в пределах второго квадранта линия $B=f(H)$ прямолинейна. Магниты этой группы имеют способность полностью восстанавливать магнитный поток в процессе магнитного возврата (в частности, после воздействия стороннего размагничивающего поля, напряженность которого $H_{СТ}$ соизмерима и даже превышает коэрцитивную силу H_{CB}). Эта способность объясняется тем, что у них характеристика $B=f(H)$ отражает только прямолинейный участок кривой $\mu_0 J=f(H)$, лежащий выше колена, а у всех магнитотвердых материалов, на этом участке прямая магнитного возврата совпадает с характеристикой размагничивания.

1.7. Методы измерения индукции магнитного поля.

Для измерения индукции или напряжённости магнитного поля применяются следующие устройства и методы [77]:

- Катушка поля;
- Электродинамический метод;
- Измерительный генератор;
- Вибрирующая катушка;
- Феррозонд;
- Магнитный резонанс протонов;
- Магнетрон;
- Магниторезистор;
- Электрострикционный способ измерения напряженности постоянного магнитного поля;
- Датчик Холла.

Ниже будут описаны особенности измерения магнитных полей различными методами.

1.7.1 Катушка поля.

Катушки поля предназначаются для измерения напряженности магнитного поля в воздушном пространстве (круглые катушки) или на поверхности образца (плоские катушки).

Круглая катушка представляет собой каркас из изоляционного материала, на который намотано некоторое число витков провода. Диаметр и длина катушки зависят от размеров пространства с однородным магнитным полем, величину напряженности которого требуется определить. Произведение числа витков w_K на сечение S_K калиброванной катушки, т. е. ее постоянную, определяют экспериментально.

Для измерения напряженности магнитного поля катушку помещают на поверхности образца так, чтобы ее ось совпала с направлением поля; концы

ее присоединяют к баллистическому гальванометру. Для определения напряженности магнитного поля с помощью катушек поля необходимо изменить их потокосцепление с измеряемым полем. При измерении постоянных магнитных полей это выполняется путем выноса катушки из магнитного поля, выключением или переключением тока в соленоидах или электромагнитах, создающих поле, поворотом катушки поля на 180° (двойное изменение потокосцепления и т.п.). При измерениях переменных полей изменение магнитного потокосцепления происходит автоматически.

Минимальная величина напряженности поля, измеряемая с помощью катушек поля, составляет $0,1 - 5$ А/см.

В ряде случаев необходимо измерять напряженность магнитного поля в очень малых объемах (теоретически — в точке) пространства. Для этого применяют шаровые и цилиндрические катушки [78] со сложной намоткой. При определенном соотношении между внутренним и наружным диаметрами и длиной цилиндрической катушки можно с достаточной степенью точности считать, что с их помощью измеряется напряженность магнитного поля в точке пространства, совпадающей с центром катушки [79]. Более подробно специальные типы катушек поля описаны в [80,81].

1.7.2 Электродинамический метод

Электродинамический метод измерения напряженности поля основан на пондеромоторном взаимодействии измеряемого поля и тока рамки. Для повышения чувствительности установки легкую подвижную рамку укрепляют на растяжках и приклеивают к ней зеркальце. Метод отсчета угла поворота рамки объективный — по отклонению светового зайчика на шкале. Такую рамку можно установить у поверхности образца на расстоянии $1 - 1,5$ мм. Угол поворота рамки пропорционален произведению тока в ней на напряженность поля. Минимальная величина напряженности поля,

измеряемая описываемым методом, имеет порядок 10^{-1} – 10^{-2} А/см. Погрешность измерений порядка 3–5%.

1.7.3 Измерительный генератор

Измерительный генератор состоит из катушки поля, помещенной на оси синхронного электродвигателя с числом оборотов в минуту ~ 2000 — 8000 . Концы обмотки подводятся к полукольцам коллектора, две щетки которого соединены с магнитоэлектрическим гальванометром. Принцип действия измерительного генератора заключается в следующем. При вращении катушки поля в магнитном поле, нормальном к её оси, в этой катушке возникает э.д.с.

При постоянной скорости вращения э.д.с. катушки пропорциональна напряженности поля. Минимальная величина напряженности поля, которую с достаточной степенью точности можно измерить с помощью измерительного генератора, имеет порядок 10^{-3} А/см, погрешность метода 3–5%.

Для увеличения чувствительности измерителей напряженности поля у поверхности образца можно применить специальный вертикальный измерительный генератор. Вертикальный измерительный генератор отличается от обычного тем, что у него на оси укреплена плоская катушка поля (вместо круглой), вращающаяся у поверхности образца. Приведение во вращение плоской катушки поля значительно повышает её чувствительность: нижний предел измерений снижается примерно до 10^{-3} А/см.

В [82] описан измерительный генератор, позволяющий с высокой точностью (погрешность менее 0,1%) измерять постоянные магнитные поля. Концы измерительной катушки (в отличие от обычных моделей измерительных генераторов) присоединены каждый к своему контактному кольцу; напряжение с контактных колец выпрямляется специальным механическим выпрямителем. Метод измерений — компенсационный.

1.7.4 Вибрирующая катушка

Для увеличения точности измерений целесообразно э.д.с. измерительной катушки определять с помощью вольтметра средних значений (так как связь между средним значением э.д.с. и максимальным значением магнитного поля не зависит от формы кривой э.д.с.) с большим входным сопротивлением.

Чувствительность метода зависит от числа витков, частоты и амплитуды колебаний измерительной катушки. Все эти величины не могут быть сделаны очень большими, что связано с трудностями устройства механической части установки, а также с тем, что увеличение амплитуды ведет к уменьшению точности измерений. Длина катушки зависит от материала и конфигурации магнитной цепи и должна быть определена для каждой установки экспериментально (примерный порядок $L = 2 \div 5$ см).

Погрешность соответствующих установок, описанных в литературе, может быть оценена примерно в 2%. Практически таким способом можно измерять напряженность поля, начиная с 3—5 до ~ 25000 А/см. Приборы с вибрирующей катушкой с хорошими результатами испытаны в ряде организаций [83]. Ниже будет показана возможность использования вибрирующей катушки в качестве нулевого индикатора коэрцитиметра и измерителя индукции в образцах ферромагнитных материалов.

1.7.5 Феррозонд

Феррозонды (их иногда называют магнитомодуляционными датчиками) предназначены для обнаружения и измерения магнитных полей. В простейшем виде феррозонд представляет собой стержень из магнитомягкого материала (чаще всего пермаллоя), на котором помещены две обмотки: w_1 — для создания в сердечнике переменного магнитного потока (поля возбуждения) и w_2 — для намерений индуцированной э.д.с.

Если по обмотке w_1 пропускать переменный ток, то магнитное состояние сердечника будет изменяться по динамической петле, «пробегая за период полный цикл, и в обмотке w_2 появится э.д.с.

При неизменной величине и форме переменного тока в обмотке зонда, помещенного в постоянное поле, изменяются величина и форма э.д.с.: наряду с нечётными гармониками в кривой э.д.с. появляются чётные и в основном вторая гармоника, величина которой, как показывает опыт, в известных пределах пропорциональна напряженности постоянного поля.

1.7.6 Магнитный резонанс протонов

Сущность метода заключается в следующем. Если ядра парамагнитного вещества поместить в постоянное магнитное поле, обеспечивающее парамагнитную поляризацию ядер, а в направлении, перпендикулярном направлению постоянного магнитного поля, включить высокочастотное переменное магнитное поле, частота которого близка к частоте ларморовой прецессии магнитного момента ядра, то магнитные моменты ядер будут прецессировать вокруг направления постоянного магнитного поля. Амплитуда прецессии будет тем больше, чем ближе частоты внешнего переменного поля и ларморовой прецессии. При совпадении частот (резонансе) наступит резонансное поглощение энергии высокочастотного магнитного поля. По величине частоты, при которой имеет место резонанс, можно рассчитать напряженность постоянного магнитного поля.

Подробнее о методе ядерного резонанса см. [84].

1.7.7 Магнетрон

Для измерения напряженности магнитного поля в пространстве можно использовать явление отклонения электронов в магнитном поле. С этой целью применяют специальные двухэлектродные лампы—магнетроны. По

оси лампы расположена нить накала — катод; анодом является цилиндр, осью которого служит катод.

В отсутствие внешних полей электроны устремляются по радиусам к цилиндру, служащему анодом. Если создать магнитное поле, ось которого параллельна оси магнетрона (а, следовательно, нити накала), то пути электронов будут искривляться, и вместо прямых линий будут представлять собой кривые. При некоторой величине напряженности внешнего магнитного поля пути электронов станут настолько искривленными, что электроны не попадут на анод, а возвратятся к катоду и анодный ток упадет до нуля. Это падение анодного тока происходит не сразу (так как электроны имеют разные скорости), а в некотором узком диапазоне напряженности внешнего магнитного поля.

С помощью магнетрона можно определять напряженность магнитного поля, начиная примерно с 15 А/см с погрешностью $\sim 1\%$.

1.7.8 Магниторезистор

Электрическое сопротивление некоторых металлов и сплавов зависит от напряженности магнитного поля, в которое они помещены. Особо сильная зависимость электрического сопротивления от напряженности магнитного поля наблюдается у висмута. Поэтому висмутовую спираль или отрезок висмутовой проволоки иногда применяют для измерения напряженности сильных магнитных полей. Спираль занимает мало места и с ее помощью можно измерять напряженность поля в узких щелях электромагнитов и систем с постоянными магнитами и т. п.

1.7.9 Электрострикционный способ измерения напряженности постоянного магнитного поля [85]

Датчик представляет собой полый (в виде отрезка трубы цилиндрического или квадратного сечения) вибратор из сегнетокерамики (например, PbZ_2O_3), внутренняя и наружная стороны которого

металлизированы. Внутренняя металлизированная поверхность должна иметь разрез для исключения в ней вихревого тока. Снаружи на датчик намотана измерительная обмотка; переменное напряжение питания подводится к металлизированным поверхностям; при этом датчик совершает электрострикционные колебания с удвоенной частотой, за счет чего в измерительной обмотке наводится э.д.с., пропорциональная измеряемой напряженности магнитного поля. Чувствительность описываемого метода может быть очень высокой.

1.7.10 Датчик Холла [86]

Эффект Холла заключается в появлении э.д.с. U_x между противоположными сторонами пластины (рис.1.11), если через пластину пропустить ток и поместить ее при этом в магнитное поле. Направления тока, вектора напряженности поля и э.д.с. Холла взаимно перпендикулярны. Эффект Холла может наблюдаться и в металлах, и в полупроводниках. В последних э.д.с. Холла значительно больше, поэтому в настоящее время в качестве датчиков Холла используются полупроводники (германий, сурьмянистый индий и др.).

Эффект Холла объясняется действием силы Лоренца (действием магнитного поля на движущийся заряд), которая направлена перпендикулярно векторам скорости движения заряда и напряженности магнитного поля. Благодаря действию силы Лоренца в пластине появляется разность потенциалов — э.д.с. Холла между точками А и В:

$$U_x = R_x \frac{i \cdot H}{d}, \quad (1.4)$$

где R_x — постоянная Холла, $\text{ом} \cdot \text{см}^2/\text{А}$;

i — ток в датчике (пластине), А;

d — толщина пластины, см;

H — напряженность магнитного поля, А/см.

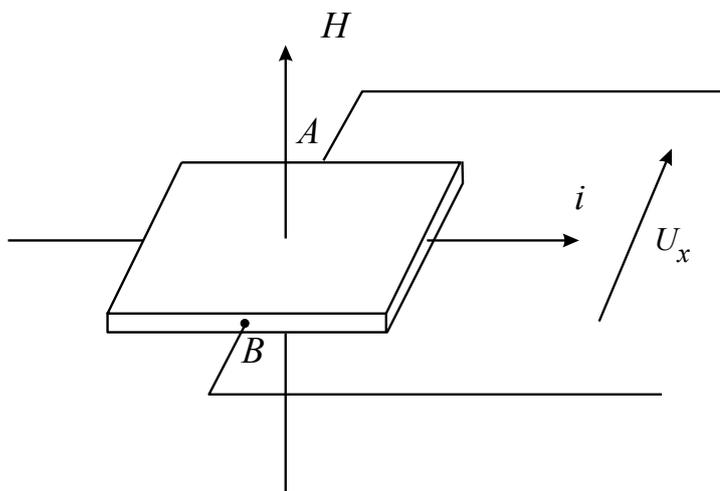


Рисунок 1.11 – К объяснению эффекта Холла

Постоянная Холла определяется экспериментально. Она может быть рассчитана для данного датчика по формуле 1.4, если на нём измерена э.д.с. Холла при известных значениях H , d и i .

Основными достоинствами датчиков Холла являются пропорциональность э.д.с. Холла и напряженности магнитного поля, малый размер датчиков (порядка миллиметров), а также отсутствие подвижных частей в измерительном механизме.

Датчики Холла позволяют измерять напряженности магнитного поля в диапазоне примерно от 0,1 до 10^5 А/см.

Большим преимуществом датчиков Холла является возможность их использования для измерения переменных магнитных полей в широком диапазоне частот (примерно 10^{12} Гц).

Электродвижущая сила Холла может быть сделана постоянной и переменной в зависимости от того, какое поле действует на датчик и каким родом тока его питают. Если и измеряемая напряженность поля, и ток постоянные (или оба изменяются с одной частотой), то э.д.с. Холла — величина постоянная (или имеет постоянную составляющую, если и H и i переменные). Если же ток, питающий датчик, постоянный, а напряженность измеряемого поля переменная (или наоборот), то э.д.с. Холла — величина переменная.

Кроме прибора ИМИ-3, разработан ряд других приборов, основанных на эффекте Холла [87-92].

Кроме измерения магнитных полей, датчики Холла могут быть использованы для измерения тока и мощности (в том числе мощности потерь в ферромагнитных материалах), в анализаторах гармоник и т. п.

Более подробный обзор методов измерения магнитных полей с обширной библиографией опубликован в [93].

1.8. Поле блока постоянных магнитов

При определении тягового усилия ЛСД с возбуждением от постоянных магнитов последние обычно представляют эквивалентными катушками. Выбор параметров этих катушек связан с выполнением расчетов распределения магнитных полей, создаваемых в окружающем пространстве нелинейными элементами, какими являются постоянные магниты.

Для нахождения рабочей точки магнита необходимо в первую очередь иметь кривые размагничивания $\mu_0 J=f(H)$ и $B=f(H)$ для данной марки магнита. Если же этих кривых нет, то их необходимо реконструировать по имеющимся в наличии данным с достаточной точностью. В справочнике [76] представлены характеристики размагничивания наиболее распространенных магнитотвердых материалов. На основании этих характеристик, а также с помощью аппроксимирующих формул, мы можем строить кривые размагничивания для материалов со сходным химическим составом и близкими магнитными характеристиками.

При отсутствии кривых размагничивания, расчетная кривая $B=F(H)$ должна строго проходить через точки, определяемые нормативными документами. Такими точками являются: B_r – остаточная индукция, H_{CB} – коэрцитивная сила по индукции, B_d и H_d – координаты точки, соответствующей максимуму магнитной энергии. По кривой $B=F(H)$ можно построить кривую $\mu_0 J=f(H)$ на участке $0-H_{CB}$, на основании формулы (1.3) и

по приведенной выше методике. Имея значение $H_{сг}$, можно упрощенно достроить данную кривую.

В настоящее время также широко распространена аппроксимирующая формула [76]:

$$B = B_r \frac{H_{св} - H}{H_{св} - a \cdot H}, \quad (1.5)$$

где a – коэффициент выпуклости

$$a = 2 \cdot \sqrt{\frac{B_r \cdot H_{св}}{B_d \cdot H_d} - \frac{B_r \cdot H_{св}}{B_d \cdot H_d}},$$

Здесь H и B – текущие значения напряженности размагничивающего поля и индукции.

Применение формулы (1.5) к изотропным материалам дает приемлемое совпадение расчетной и экспериментальной кривых. Распространение формулы на анизотропные материалы средней энергии и средней коэрцитивной силы увеличивает относительную погрешность. Попытки же применить ее к материалам с высокой коэрцитивной силой и особенно к ферритам приводит в некоторых случаях к недопустимо большому возрастанию относительной погрешности.

При расчёте магнитного поля блоков необходимо учитывать, что последние конструктивно состоят из отдельных полос, набранных из магнитов, которые отличаются друг от друга геометрическими размерами и физическими характеристиками. Это обстоятельство еще в большей степени усложняет расчеты.

Резюмируя вышеизложенное можно сказать следующее.

В начале 20 века был предложен новый вид транспорта – магнитоплан. Особенностью этого вида транспорта является отсутствие механического контакта между экипажем и путевой структурой. Для использования данного вида транспорта необходим бесконтактный привод. В данном виде

транспорта уже используются электромагнитные явления, поэтому наиболее логичным является использование линейного электродвигателя.

В последней трети прошлого века, в результате развития производства, стало возможным практическое воплощение этого вида транспорта. В результате теоретических и практических исследований определились два основных типа магистрального высокоскоростного магнитолевитирующего транспорта (MAGLEV от magnetic levitation). Первый – это транспорт с электромагнитным подвесом, основным разработчиком которого является Германия (Transrapid), и второй – транспорт с электродинамической левитацией, основным апологетом которого, в настоящее время, является Япония (собственно MAGLEV).

В системе с электромагнитным подвесом в качестве основного элемента путевой структуры используется шихтованный ферромагнитный рельс, что логично приводит к идее использования асинхронного двигателя. При использовании электродинамической левитации требуется применение мощного источника постоянного магнитного поля в условиях отсутствия магнитопровода, что неизбежно приводит к однозначному выводу об использовании синхронного двигателя.

В XX-м веке в качестве источника мощного постоянного магнитного поля для высокоскоростного транспорта рассматривался только сверхпроводящий электромагнит, работающий в режиме замороженного потока при температуре близкой к абсолютному нулю в среде жидкого гелия. Это создавало массу сложностей и обуславливало дороговизну создания и использования такого транспорта.

В качестве единственной альтернативы рассматривались высокотемпературные, переходящие в сверхпроводящее состояние при температуре жидкого азота, что намного упрощает и удешевляет систему, или даже при комнатной температуре, сверхпроводящие материалы. Постоянные магниты, несмотря на относительную дешевизну, в качестве

источника поля для ВСНТ даже не рассматривались из-за своей малой коэрцитивной силы, а следовательно, и низкой магнитной эффективности.

К сожалению, до настоящего времени не существует технологий создания дешёвой катушки из высокотемпературного сверхпроводника для мощного транспортного источника постоянного магнитного поля. Зато, в последнее время, промышленность освоила производство новейших постоянных магнитов с высоким значением коэрцитивной силы, что дало возможность использовать последние в качестве источника магнитного поля возбуждения для мощных электрических машин, в том числе и для локомотивов.

В линейном синхронном двигателе высокоскоростного транспорта отсутствует магнитопровод, что значительно усложняет расчёт магнитного поля. При этом нужно учитывать, что подвес в транспортных системах с электродинамической левитацией осуществляется за счёт полей рассеяния.

Самым распространённым методом расчёта таких двигателей является, так называемый, метод эквивалентных катушек. Этот метод заключается в том, что на основе рассчитанного пространственного распределения поля постоянного магнита подбирается катушка такой конфигурации и с таким током, чтобы обеспечить эквивалентное (такое же или близкое) распределение магнитного поля. Иногда для этого необходимо подбирать несколько катушек различной конфигурации и с различными токами. После выбора эквивалентных катушек расчёт двигателя ведётся с учётом взаимоиндуктивностей полученных катушек с катушками путевой структуры.

Данный способ чрезвычайно трудоёмок и требует большого количества машинного времени для расчёта распределения индукции магнитного поля постоянного магнита. В случае использования группы магнитов, сложность расчётов, с учётом смещения рабочей точки магнита из-за влияния полей соседних магнитов, возрастает многократно.

Менее распространённым методом расчёта линейных двигателей является полевой. В данном случае после расчёта распределения магнитного поля, последнее представляется в виде векторного поля. Расчёт взаимодействия такого поля с векторами токов путевых катушек и является собственно расчётом двигателя. Данный метод менее трудозатратен, особенно на этапе расчёта взаимодействий, но менее нагляден и сложнее в использовании, поскольку предполагает работу не со скалярными, а с векторными величинами.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. По мере развития высокоскоростного электротранспорта возникает необходимость использования линейного синхронного электродвигателя.
2. Перспективными являются линейные синхронные двигатели с возбуждением от источника постоянного магнитного поля, в т.ч. от высококоэрцитивных постоянных магнитов.
3. Существующие методы расчета таких двигателей очень трудо- и времязатратны, что условно приемлемо для научных исследований, но абсолютно неприемлемо для применения в инженерной практике.
4. Для обеспечения возможности рационального выбора конструктивных параметров линейного синхронного двигателя высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа с возбуждением от постоянных магнитов, т.е. для решения обратной задачи с некорректными условиями, необходимо иметь инженерную (не связанную с большим объёмом вычислений) методику определения тягового усилия, возникающего при взаимодействии магнитного поля возбуждения с током в катушках путевой структуры.

2. РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ЭКИПАЖА

В данном разделе намечены основные направления решения основной задачи исследования – создание теоретических основ инженерной (не связанной с большим объёмом вычислений) методики определения тягового усилия, возникающего при взаимодействии постоянного магнитного поля возбуждения с током в катушках путевой структуры. исследование магнитного поля блока постоянных магнитов;

2.1 Постоянные магниты как источник поля возбуждения

Высококоэрцитивные постоянные магниты в последнее время стали активно использоваться в качестве источника поля возбуждения тяговых двигателей электровозов. При этом, удельная мощность таких двигателей выше, чем у традиционных машин с катушечным возбуждением. Это объясняется тем, что при близких значениях индукции объём, занимаемый постоянными магнитами, значительно меньше объёма катушек возбуждения. Кроме того, в постоянном магните, в отличие от электромагнитов, практически отсутствуют потери.

В двигателях вращения замена электромагнита на постоянный магнит требует изменения конструкции системы возбуждения. Основной проблемой является выбор такого расположения постоянных магнитов, которое необходимо для обеспечения синусоидального распределения индукции магнитного поля в зазоре между полюсным башмаком и магнитопроводом ротора. Далее расчёт магнитной системы электрической машины выполняется в обычном порядке.

В качестве разумной альтернативы указанным, в [1] был предложен метод расчёта тяговых усилий, не требующий расчёта пространственного распределения магнитного поля, в котором использовалась интегральная величина – потокосцепление катушки путевой структуры с блоком

постоянных магнитов. Потокосцепление в этом случае определялось экспериментально. К сожалению, данный метод не лишён недостатков. Несмотря на существенное облегчение расчётной части, остаётся все еще достаточно трудоёмким процесс измерения потокосцепления, который трудно автоматизировать. При этом зависимость определяется только для конкретной конфигурации катушки путевой структуры.

Более приемлемым представляется расчётно-экспериментальный метод [2] определения зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения. Данный метод не привязан к конкретным размерам катушки и, соответственно, упрощает экспериментальную часть определения искомой зависимости, поскольку основан на измерении индукции магнитного поля.

2.2 Идея расчётно-экспериментального метода

Расчёт пространственной конфигурации поля постоянных магнитов является самой трудоёмкой частью как метода эквивалентных катушек, так и полевого метода. В силу особенностей материала, задача создания высококоэрцитивного постоянного магнита большого размера, что необходимо для мощных машин, представляется практически невыполнимой на современном уровне развития материаловедения и технологий. Для получения сильных магнитных полей значительных размеров необходимо использовать расщеплённые полюса, т.е. полюса, набранные из нескольких постоянных магнитов. При наличии расхождений в кривых намагничивания между магнитами одного полюса задача нахождения рабочей точки каждого магнита, и так достаточно сложная, усложняется многократно. При этом нужно учитывать различия в геометрических параметрах и неравномерность структуры каждого магнита.

Следующим является этап подбора параметров эквивалентных катушек, или параметров векторного поля (для полевого метода). Этап не

очень ресурсоёмкий, но достаточно сложный и требует определённого навыка в деятельности такого вида.

Третьим этапом является непосредственный расчёт взаимных индуктивностей катушек путевой структуры с эквивалентными катушками для различных положений последних. Причём для каждого положения, кроме случая плоскопараллельного движения, для которого имеются формулы пересчёта, необходима процедура численного интегрирования, что требует очень много машинного времени. При полевом методе, как уже отмечалось выше, требуется рассчитывать взаимодействие векторных полей, что тоже достаточно сложно.

При обоих методах нужно определять производные по времени и численно решать дифференциальные уравнения второго порядка [94,95], что приемлемо для научных расчётов, но неприменимо в производственных условиях.

Для снижения сложности и трудоёмкости расчёта двигателя необходим метод, который отвечает следующим требованиям:

- максимальное снижение трудоёмкости определения параметров взаимодействия между источником постоянного магнитного поля и катушками путевой структуры;
- максимальное снижение ресурсоёмкости расчёта усилий, возникающих в результате взаимодействия источника постоянного магнитного поля с катушками путевой структуры, при использовании скалярных величин;
- максимально возможная замена численных расчётов аналитическими.

Удовлетворение этих требований возможно при решении следующих задач:

1) разработка математической модели линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля, в которой не используются взаимные индуктивности эквивалентных катушек с катушками путевой структуры, кроме того, отсутствует зависимость параметров их взаимодействия от времени;

- 2) разработка методов и средств исследования источников постоянного магнитного поля;
- 3) разработка метода определения зависимости величины и качества тягового усилия от различных параметров конструкции линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля;
- 4) разработка метода и средств исследования величины и качества тягового усилия линейного синхронного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля;
- 5) обоснование и постановка эксперимента для подтверждения адекватности разработанной модели и эффективности разработанных методов.

2.3 Предпосылки создания математической модели

Для создания математической модели линейного двигателя, в которой не применяются взаимные индуктивности, необходимо отказаться от метода эквивалентных катушек. По большому счёту, точное распределение силовых линий магнитного поля знать не обязательно. Точно так же не обязательно и знать, в каком месте кривой намагничивания расположена рабочая точка в каждом постоянном магните. Необходимо знать, только лишь, как будет взаимодействовать постоянный магнит или блок постоянных магнитов с катушкой путевой структуры.

В качестве показателя взаимодействия лучше всего выбрать потокосцепление постоянного магнита с катушкой путевой структуры. В отличие от взаимоиндуктивности, потокосцепление является физическим показателем взаимодействия магнитного поля с катушкой. При этом нужно учесть, что, хотя потокосцепление является векторной величиной, при определённых условиях с ним можно работать как со скаляром.

Для синхронного двигателя, в котором перемещение магнитного поля возбуждения синхронизировано с перемещением бегущей волны магнитного

поля тока путевой структуры, естественной видится замена зависимостей от времени на зависимости от перемещения. При этом отпадает необходимость учитывать скорость перемещения источника магнитного поля, а, следовательно, и решение дифференциальных уравнений второго порядка.

Поскольку все функции в линейном двигателе высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа являются нелинейными, но периодическими, для работы с ними удобно использовать ряды Фурье. При этом с гармоническими составляющими нелинейной зависимости можно работать чисто алгебраическими методами. При таком подходе, учитывая естественную периодичность конструкции линейного двигателя, целесообразно использовать в качестве периода разложения двойное полюсное деление путевой обмотки.

2.4 Исследование источников постоянного магнитного поля

Потокосцепление источника постоянного магнитного поля с путевой катушкой можно определить расчётным или экспериментальным методами.

Расчётный метод определения потокосцепления предполагает расчёт распределения магнитных силовых линий в пространстве вокруг источника магнитного поля, что делает малоэффективным отказ от метода эквивалентных катушек.

Экспериментальный метод заключается в непосредственном измерении потокосцепления при помощи веберметра. Данный способ сразу даёт значение потокосцепления источника магнитного поля с катушкой, при этом не нужно рассчитывать взаимодействие магнитов между собой. Но данный метод не лишён недостатков. Во-первых, он рассчитан на измерение потокосцепления магнита с конкретной катушкой. Во-вторых, каждый замер занимает определённый промежуток времени, что, при большом количестве измерений, требует достаточно больших трудозатрат. И, в-третьих, в силу особенностей измерения, он очень сложен для автоматизации.

Предлагаемый расчётно-экспериментальный метод, объединяя достоинства указанных методов, во многом лишён их недостатков. Суть метода заключается в инструментальном измерении распределения индукции постоянного магнитного поля на различных высотах с последующим интегрированием по площади катушки. При этом пределы интегрирования определяются формой и размерами катушки. При последовательном смещении интегрируемой площади вдоль оси X получается зависимость потокосцепления источника магнитного поля с катушкой от их взаимного смещения друг относительно друга.

Полученную нелинейную зависимость удобно разложить в ряд Фурье, причём геометрические размеры катушки и период разложения в ряд легко изменяются в расчётной части без изменения экспериментальных данных.

2.5 Подходы к определению зависимости величины и качества тягового усилия от конструкции

На тяговое усилие, развиваемое магнитолевитирующим экипажем влияет как величина и форма тока в путевых катушках, так и потокосцепление магнитов экипажа с этими катушками. Поскольку ток является переменной и легко изменяемой в процессе эксплуатации величиной, конструкция экипажа и путевой структуры на него оказывает малое влияние. Кроме того, в синхронном двигателе ток зависит от положения экипажа, а, следовательно, его период совпадает с конструктивным периодом линейного двигателя – двойным полюсным делением обмотки. Учитывая, что тяговое усилие создаётся гармоническими составляющими тока и потокосцепления одной частоты, необходимо рассматривать зависимость именно потокосцепления от конструктивных параметров двигателя.

При заданном источнике постоянного магнитного поля, которым является блок постоянных магнитов, и отсутствии магнитопровода, рассматриваемыми конструктивными параметрами для экипажа являются расположение и ориентация источников магнитного поля, а для путевой

обмотки - её тип, полюсное деление, геометрические размеры катушек и величина рабочего зазора (расстояния между поверхностью магнита и плоскостью среднего витка катушки).

Поскольку тягового усилие зависит от производной потокосцепления, постоянная составляющая никакого влияния на него не оказывает. Гармонические коэффициенты Фурье при расчёте тягового усилия используются без изменения, т.к. изменяется только фаза гармонической функции (синусоида меняется на косинусоиду).

При использовании магнитов с чередующейся полярностью, согласованных по расположению с путевой обмоткой подавляются чётные гармонические составляющие тягового усилия, что позволяет исключить из рассмотрения и чётные гармоники потокосцепления.

Применение путевой обмотки, соединённой в трёхфазную звезду исключает из рассмотрения гармонические составляющие, кратные трём.

В результате, на тяговое усилие оказывают влияние первая, пятая, седьмая, одиннадцатая и т.д. гармоники потокосцепления. Поскольку зависимость потокосцепления блока постоянных магнитов с катушкой путевой структуры от их взаимного положения не имеет скачков, амплитуда гармонических составляющих уменьшается по мере роста номера гармоники. Исходя из этого, наибольший вклад в несинусоидальность тягового усилия вносят пятая и седьмая гармоники потокосцепления. Для повышения качества тягового усилия необходимо принять меры для подавления пятой и седьмой гармонических составляющих.

2.6 Экспериментальное определение тягового усилия для различных конструкций экипажа

Для определения знакопеременного тягового усилия, которое создаётся непосредственно в магнитах экипажа и изменяется при его перемещении, предложен способ и разработана конструкция экспериментального стенда. Способ заключается в том, что экипаж

принудительно через динамометр перемещается вдоль путевой структуры, при этом в противоположную сторону к экипажу приложена постоянная сила заведомо большая, чем тяговое усилие. В таком случае производится измерение переменной, но однонаправленной силы. После отфильтровывания постоянной нагрузки остаётся измеренное знакопеременное тяговое усилие.

Подтверждением адекватности разработанной математической модели и эффективности разработанных методов может служить только критический эксперимент, т.е. такой эксперимент, который в случае несовпадения расчётного и экспериментального результатов позволяет сделать однозначный вывод о ложности теоретических посылок.

В связи со сложностью замены путевой структуры для критического эксперимента выбран экипаж, на котором можно поменять расположение и ориентацию источников постоянного магнитного поля. Для повышения критичности, т.е. для снижения вероятности случайного совпадения результатов эксперимента такие изменения производятся несколько раз. Только в случае совпадения всех пар результатов можно сделать вывод об адекватности разработанной математической модели и эффективности разработанных методов, что даёт возможность вынести заключение о целесообразности использования расчётно-экспериментального метода расчёта параметров линейного синхронного двигателя высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа в практической инженерной деятельности

ВЫВОДЫ

Раскрыты задания, решение которых необходимо для выполнения основной задачи исследования

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА.

Как уже упоминалось выше, чтобы исследовать линейный синхронный двигатель высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа с постоянными магнитами и протекающие в нем электромеханические процессы, необходимо разработать математическую модель и рассчитать тяговые усилия, развиваемые таким двигателем [2].

3.1 Допущения, принятые при разработке математической модели двигателя с возбуждением от постоянных магнитов

Рассмотрим основные соотношения, описывающие стационарный режим работы ЛСД при движении транспортного средства с постоянной скоростью $v = 2\pi f$ в направлении координаты x (рис.3.1). При этом полагаем, что обмотка возбуждения имеет относительно путевой обмотки произвольные смещения в направлении соответствующих координатных осей x, y, z .

Рассмотрим типовую конструкцию линейного двигателя с односторонним размещением путевой обмотки и обмотки возбуждения. Для указанной конструкции и обусловленного выше режима получим выражения для токов, напряжений на обмотках и действующих сил.

Уравнения для мгновенных значений напряжений, токов и потокосцеплений ЛСД запишем при следующих допущениях:

– активные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности фазных обмоток не зависят от величины, частоты и формы протекающих в них токов;

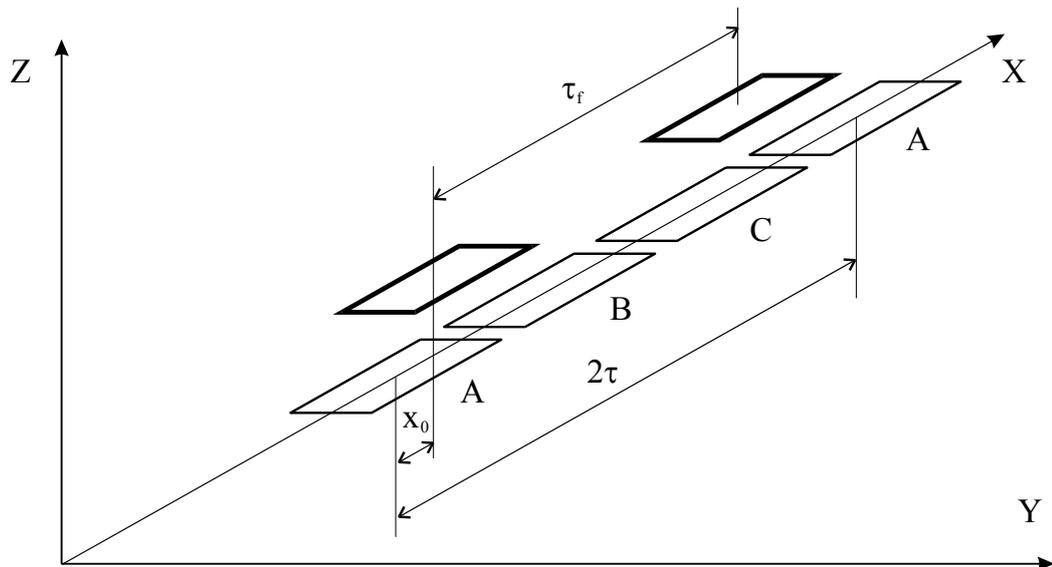


Рисунок 3.1 – Расчётная схема путевой обмотки и обмотки возбуждения линейного двигателя

– соединительные провода между отдельными катушками путевых обмоток не имеют магнитной связи с электрическими контурами, а их собственные параметры учитываются в параметрах фазных обмоток;

– фазные обмотки ЛСД симметричные, то есть имеют одинаковую конструкцию и одинаковые пространственные смещения друг относительно друга;

– не учитывается краевой эффект, обусловленный конечным числом катушек путевой обмотки ЛСД;

– не учитывается изменение намагничивающей силы постоянных магнитов, обусловленное влиянием магнитного поля катушек путевой обмотки ЛСД;

– пренебрегаем влиянием вихревых токов, наводимых в материале катушек путевой обмотки ЛСД;

– переключение напряжения в преобразователе НПЧ происходит мгновенно;

– НПЧ выдаёт на фазу не пульсирующее (выпрямленное), а постоянное напряжение.

3.2 Разработка математической модели линейного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов

При таких допущениях уравнения напряжений ЛСД, имеющего трехфазную путевую обмотку, можно представить в виде:

$$\begin{aligned} U_A &= r_a i_A + L_{aa} \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_B}{dt} + M_a \frac{di_C}{dt} + \frac{d\psi_{Af}}{dt}; \\ U_B &= r_a i_B + L_{aa} \frac{di_B}{dt} + M_a \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_C}{dt} + \frac{d\psi_{Bf}}{dt}; \\ U_C &= r_a i_C + L_{aa} \frac{di_C}{dt} + M_a \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_B}{dt} + \frac{d\psi_{Cf}}{dt}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $U_A, U_B, U_C, i_A, i_B, i_C$ – мгновенные значения фазных напряжений и токов; r_a, L_{aa}, M_a – активные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности фазных обмоток; $\psi_{Af}, \psi_{Bf}, \psi_{Cf}$ – потокосцепления фазных обмоток, обусловленные потоком возбуждения.

Трехфазную систему периодических несинусоидальных напряжений, подводимых к зажимам путевой обмотки ЛСД, можно представить выражениями:

$$\begin{aligned} U_A &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos(n\omega t + \beta_n); \\ U_B &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos\left(n\omega t - n \frac{2\pi}{3} + \beta_n\right); \\ U_C &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos\left(n\omega t + n \frac{2\pi}{3} + \beta_n\right), \end{aligned} \quad (3.2)$$

где U_n, β_n – действующее значение и фазовый угол n -ой гармоники напряжения; ω – угловая частота питающего напряжения, связанная с его периодом T соотношением $\omega = 2\pi/T$.

В ЛСД магнитное поле возбуждения создается постоянными магнитами. Поэтому в дальнейшем совокупность постоянных магнитов будем рассматривать как обмотку возбуждения. Исходя из этой

предпосылки, для потокосцеплений фазных обмоток можно записать:

$$\begin{aligned}\psi_{Bf} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} x; \\ \psi_{Bf} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{2\tau}{3} \right); \\ \psi_{Bf} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} \left(x + \frac{2\tau}{3} \right).\end{aligned}\quad (3.3)$$

Постоянная составляющая Ψ_0 и амплитуды гармоник Ψ_n потокосцепления зависят от тока намагничивания i_f :

$$\Psi_n = i_f \cdot A_n \quad (n = 0, 1, \dots). \quad (3.4)$$

При таких обозначениях э.д.с., наводимые в фазах путевой обмотки будут описываться соотношениями:

$$\begin{aligned}e_A &= -d\psi_{Af} / dt = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \cos \left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2} \right); \\ e_B &= -d\psi_{Bf} / dt = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \cos \left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} \right); \\ e_C &= -d\psi_{Cf} / dt = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \cos \left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} \right),\end{aligned}\quad (3.5)$$

где действующее значение n -ой гармоники э.д.с.

$$E_n = \frac{1}{\sqrt{2}} n \frac{\pi}{\tau} v \psi_n. \quad (3.6)$$

В формуле (3.6) учтено, что скорость движения ТС $v = dx / dt$.

В стационарном режиме работы ЛСД в обмотках путевой структуры будут иметь место вынужденные составляющие токов, обусловленные периодическими напряжениями и э.д.с. и имеющие периодический характер.

Поэтому уравнения напряжений (3.1) целесообразно записать в комплексной форме, представив решения для фазных токов в виде:

$$\begin{aligned} i_A &= R_e \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \overline{I}_n e^{jn\frac{\pi}{\tau}x}; \\ i_B &= R_e \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \overline{I}_n e^{jn\frac{\pi}{\tau}\left(x-\frac{2\tau}{3}\right)}; \\ i_C &= R_e \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \overline{I}_n e^{jn\frac{\pi}{\tau}\left(x+\frac{2\tau}{3}\right)}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где \overline{I}_n — комплекс действующего значения n -ой гармоники фазного тока;
 $j = \sqrt{-1}$.

Представив аналогичным образом в комплексной форме выражения для напряжений (3.2) и э.д.с. (3.5) на основании соотношений (3.1) получим уравнение напряжений для n -ой гармоники

$$U_n e^{jn\omega t} e^{j\beta_n} = r_a \overline{I}_n e^{jn\frac{\pi}{\tau}x} + jn \frac{\pi}{\tau} v L_{an} \overline{I}_n e^{jn\frac{\pi}{\tau}x} + jE_n e^{jn\frac{\pi}{\tau}x}, \quad (3.8)$$

где индуктивность фазной обмотки для n -ой гармоники

$$L_{an} = L_{aa} + 2M_a \cos\left(n \frac{2\pi}{3}\right). \quad (3.9)$$

Умножим левую и правую части (3.8) на $e^{-jn\frac{\pi}{\tau}x}$ и учтем, что текущее смещение осей обмоток

$$x = x_0 + vt = x_0 + \frac{\pi}{\tau} \omega t. \quad (3.10)$$

Здесь x_0 — смещение обмотки возбуждения относительно обмотки фазы A в момент $t = 0$ (рис.3.1).

Кроме того, введем обозначения:

$$\begin{aligned} \beta_n - n \frac{\pi}{\tau} x_0 &= \theta_n + \frac{\pi}{2}; \\ nL_{an} = x_{an}; \quad r_a + jx_{an} &= \vec{z}_n. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Тогда на основании (3.8) получим соотношение:

$$U_n e^{j\left(\theta_n + \frac{\pi}{2}\right)} = \vec{z}_n \vec{I}_n + jE_n \quad (3.12)$$

или

$$\vec{U}_n = \vec{z}_n \vec{I}_n - \vec{E}_n, \quad (3.13)$$

где

$$\vec{U}_n = U_n e^{j\left(\theta_n + \frac{\pi}{2}\right)}; \quad \vec{E}_n = jE_n. \quad (3.14)$$

На основании последних соотношений для n -ой гармоники тока запишем

$$\vec{I}_n = \frac{U_n e^{j\left(\theta_n + \frac{\pi}{2}\right)} - E_n e^{j\frac{\pi}{2}}}{\vec{z}_n} = \frac{\vec{U}_n - (-\vec{E}_n)}{\vec{z}_n}. \quad (3.15)$$

Векторная диаграмма ЛСД, построенная на основании соотношений (3.12) – (3.15), приведена на рис.3.2.

Из соотношения (3.14) следует, что вектора $\vec{U}_n = U_n e^{j\theta_n} e^{j\frac{\pi}{2}}$ и $-\vec{E}_n = E_n e^{j\frac{\pi}{2}}$ смещены друг относительно друга на фазовый угол θ_n . В теории электрических машин этот угол называют углом нагрузки синхронной машины и для двигательного режима принимают положительным, если вектор напряжения \vec{U}_n опережает вектор $-\vec{E}_n$.

Представим выражение для полного сопротивления фазы путевой обмотки по отношению к n -ой гармонике тока в виде

$$\underline{z}_n = z_n e^{j\alpha_n}, \quad (3.16)$$

где

$$z_n = \sqrt{r_a^2 + x_{an}^2}; \quad \alpha_n = \arctg \frac{x_{an}}{r_a}.$$

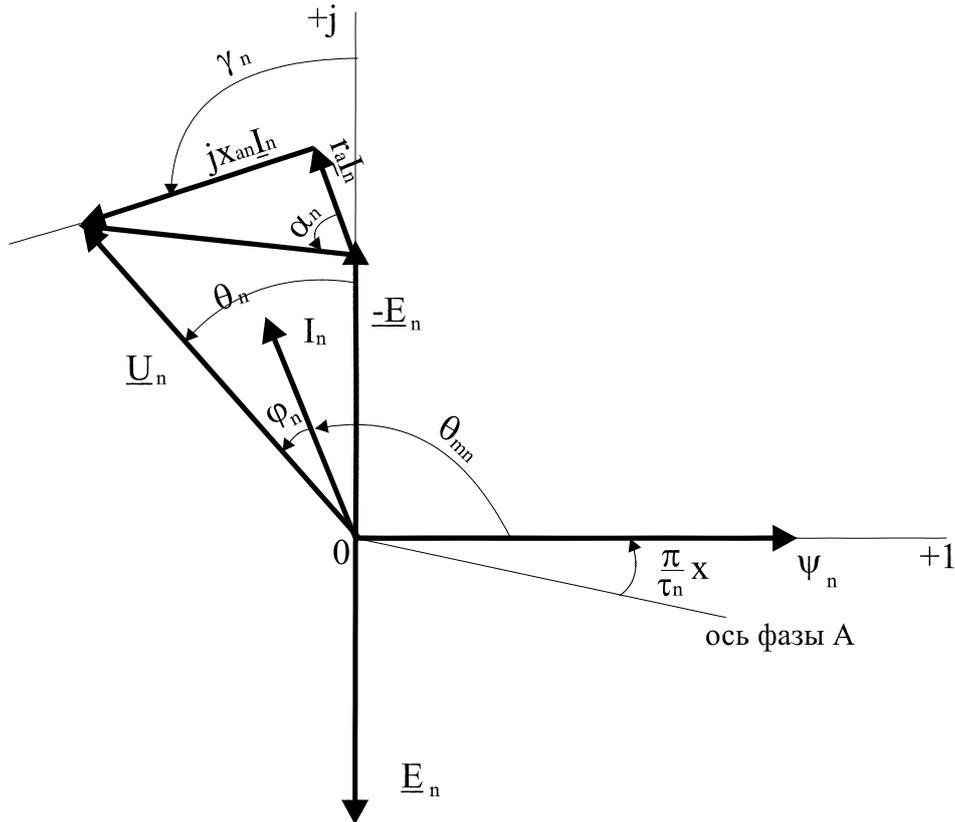


Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма линейного синхронного двигателя

Тогда соотношение (3.15) для n -ой гармоники тока можно привести к виду

$$\vec{I}_n = \frac{\Delta U_n}{z_n} e^{j\theta_{mn}} = I_n e^{j\theta_{mn}}, \quad (3.17)$$

где

$$\begin{aligned}
\Delta U_n &= \sqrt{(U_n \cos \theta_n - E_n)^2 + (U_n \sin \theta_n)^2} \\
&= \sqrt{U_n^2 + E_n^2 - 2U_n E_n \cos \theta_n}; \\
\theta_{mn} &= \pi/2 + \gamma_n - \alpha_n; \\
\gamma_n &= \operatorname{arctg} \frac{U_n \sin \theta_n}{U_n \cos \theta_n - E_n}.
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

Угол θ_{mn} определяет фазовый сдвиг между гармоническими составляющими тока \vec{I}_n путевой обмотки и потокосцепления $\vec{\psi}_n$. Физически угол θ_{mn} задает также фазовый сдвиг между n -ми гармониками потока возбуждения и потока путевой обмотки. Поэтому угол θ_{mn} называют магнитным углом нагрузки синхронного двигателя и считают положительным, если вектор тока \vec{I}_n опережает вектор потокосцепления $\vec{\psi}_n$.

Введем фазовый угол φ_n между векторами напряжения \vec{U}_n и тока \vec{I}_n одного порядка и будем считать его положительным, если вектор \vec{U}_n опережает вектор \vec{I}_n . Тогда из рис.3.2 следует соотношение для угловых величин

$$\pi/2 + \theta_n = \theta_{mn} + \varphi_n. \tag{3.19}$$

Приведенные выше соотношения (3.11) и (3.18) позволяют определить токи при известных величинах гармоник напряжений U_n и углов нагрузки θ_n . Это соответствует питанию путевой обмотки ЛСД от преобразователя частоты, обладающего свойствами источника напряжения. При этом условии для углов θ_n может быть использовано соотношение

$$\theta_n = n \cdot \theta, \tag{3.20}$$

где $\theta = \theta_1$ — угол нагрузки для основной (первой) гармоники напряжения.

При питании путевой обмотки от преобразователя частоты, обладающего свойствами источника тока, токи в фазах путевой обмотки можно описать соотношениями:

$$\begin{aligned} i_A &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + \theta_{mn}\right); \\ i_B &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} + \theta_{mn}\right); \\ i_C &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} + \theta_{mn}\right). \end{aligned} \quad (3.21)$$

При этом уравнение напряжений для n -ой гармоники также будет иметь вид (3.13), а величины U_n и φ_n будет определяться соотношениями:

$$\begin{aligned} U_n &= \left[E_n^2 + (z_n I_n)^2 + 2E_n z_n I_n \sin(\theta_{mn} + \alpha_n) \right]^{1/2}; \\ \varphi_n &= \operatorname{arctg} \frac{x_{an} I_n + E_n \cos \theta_{mn}}{r_a I_n + E_n \sin \theta_{mn}}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Для фазовых углов θ_{mn} может быть использовано соотношение

$$\theta_{mn} = n \cdot \theta_m, \quad (3.23)$$

где $\theta_m = \theta_{m1}$ — фазовый угол первой гармоники тока.

Силы, действующие на обмотку возбуждения ЛСД и связанное с нею транспортное средство, определяются соотношением

$$f_q = \left(i_A \frac{\partial \psi_{Af}}{\partial q} + i_B \frac{\partial \psi_{Bf}}{\partial q} + i_C \frac{\partial \psi_{Cf}}{\partial q} \right); \quad q = x, y, z. \quad (3.24)$$

Представим производные от потокосцеплений фазных обмоток ψ_{Af} (3.3)

в виде:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \psi_{Af}}{\partial x} &= \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{xn} \sin n \frac{\pi}{\tau} x; \\
\frac{\partial \psi_{Af}}{\partial y} &= \psi_{yo} + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{yn} \cos n \frac{\pi}{\tau} x; \\
\frac{\partial \psi_{Af}}{\partial z} &= \psi_{zo} + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{zn} \cos n \frac{\pi}{\tau} x,
\end{aligned} \tag{3.25}$$

где

$$\psi_{xn} = -n \frac{\pi}{\tau} \psi_n; \quad \psi_{yn} = \frac{\partial \psi_n}{\partial y}; \quad \psi_{zn} = \frac{\partial \psi_n}{\partial z}. \tag{3.26}$$

Производные от взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и фазами В и С будут иметь вид (3.25) с заменой координаты x соответственно на $x - 2\tau/3$ и $x + 2\tau/3$.

Подставив (3.21) и (3.25) в (3.24) получим соотношения для сил, развиваемых ЛСД. Постоянные составляющие усилий, действующих на обмотку возбуждения ЛСД, будут определяться слагаемыми, имеющими одинаковый порядок гармоник тока и взаимной индуктивности:

$$\begin{aligned}
F_x &= -\frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{xn} \sin \theta_{mn}; \\
F_y &= \frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{yn} \cos \theta_{mn}; \\
F_z &= \frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{zn} \cos \theta_{mn}.
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Механическая мощность, развиваемая ЛСД, и равная ей электромагнитная мощность:

$$\begin{aligned}
P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} = F_x v &= -\frac{3}{\sqrt{2}} v \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{xn} \sin \theta_{mn} = \\
&= 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n E_n \sin \theta_{mn}.
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Последнее выражение, используя рис. 3.2, можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{мех}} &= 3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_n}{z_n^2} (U_n x_{an} \sin \theta_n + U_n r_a \cos \theta_n - r_a E_n) = \\
 &= 3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_n}{z_n^2} [U_n z_n \cos(\theta_n - \alpha_n) - r_a E_n]
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

Активная мощность, подводимая к путевой обмотке ЛСД, определяется выражениями:

$$P_a = P_{\text{мех}} + 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 r_a = 3 \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n,
 \tag{3.30}$$

Коэффициент полезного действия ЛСД

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_a}.
 \tag{3.31}$$

Полная мощность ЛСД на зажимах путевой обмотки ЛСД

$$S = 3 \left(\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2}.
 \tag{3.32}$$

Коэффициент мощности ЛСД K_φ , аналогичный $\cos \varphi$ для цепи синусоидального тока, равен

$$K_\varphi = P_a / S.
 \tag{3.33}$$

ВЫВОДЫ

1. Разработанные выше соотношения математической модели ЛСД для стационарных режимов позволяют рассчитать характеристики ЛСД при произвольном характере токов в путевой обмотке или напряжений на ее зажимах.

2. Для расчета характеристик ЛСД необходимо определить амплитуды гармоник взаимной индуктивности между обмотками линейного двигателя.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЛОКА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ С КАТУШКОЙ ПУТЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Для расчёта линейного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа необходимо знать зависимость потокосцепления источника постоянного магнитного поля с катушкой путевой структуры от их взаимного расположения. Предложенный ранее [1] способ непосредственного измерения крайне трудо- и времязатратен, а, главное, в силу особенностей самого процесса измерений, практически не поддаётся автоматизации.

4.1 Метод определения потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения

В [2] предложен метод определения зависимости потокосцепления блока постоянных магнитов с катушкой путевой структуры от их взаимного положения. Особенность метода заключается в том, что вместо измерения зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения производится измерение распределения индукции магнитного поля, создаваемого блоком постоянных магнитов в плоскости среднего витка катушки путевой структуры (рис. 4.1). Причём, измерение производится по плоскости во все стороны до нулевых значений индукции. В случае симметричного исполнения блока постоянных магнитов, достаточно измерить распределение индукции магнитного поля блока магнитов только в одном квадранте.

В связи с тем, что тесламетр с датчиком Холла непосредственно показывает индукцию в каждой точке пространства, такие измерения достаточно легко автоматизировать путём применения планшетного измерителя в комплексе с цифровым тесламетром. В таком случае шаг

измерения индукции можно уменьшить, что приведёт к повышению точности измерения, а соответственно, и точности последующих расчётов.

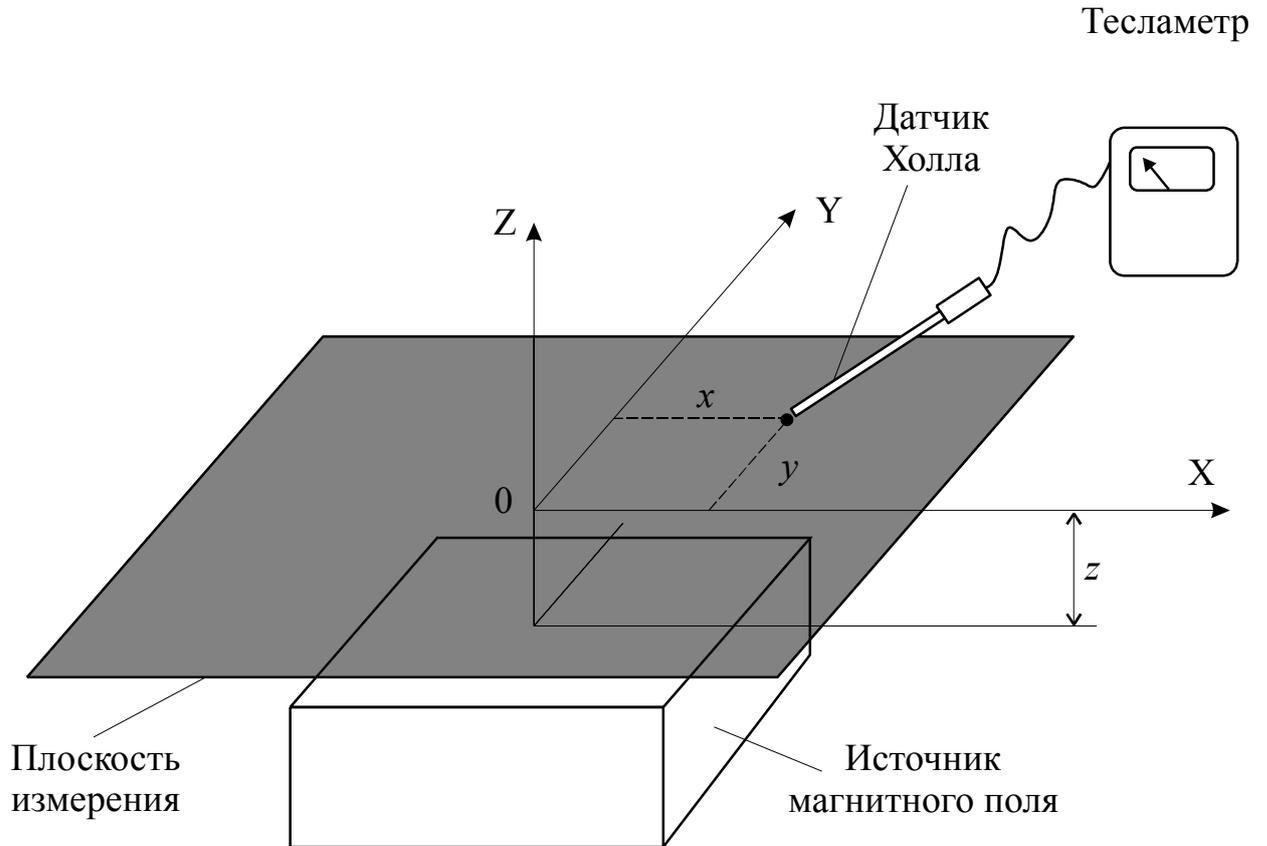


Рисунок 4.1 – Измерение распределения индукции магнитного поля, создаваемого блоком постоянных магнитов в плоскости среднего витка катушки путевой структуры

После измерения распределения индукции магнитного поля блока постоянных магнитов на определённой высоте производится интегрирование индукции по площади катушки путевой структуры (рис. 4.2). При этом определяется потокосцепление в точке расположения центра катушки. В случае последовательного смещения области интегрирования получается зависимость потокосцепления блока постоянных магнитов с катушкой путевой структуры от их взаимного расположения.

Линейный двигатель представляет собой сочетание трехфазной путевой обмотки, которая питается переменным током, и системы возбуждения. Трехфазная обмотка, каждая фаза которой состоит из ряда последовательно

соединенных катушек, укладывается на путевом полотне по всей длине трассы. С учётом того, что путевая обмотка имеет периодическую структуру, для исследования и использования полученной зависимости в дальнейших расчётах целесообразно её разложение в ряд Фурье.

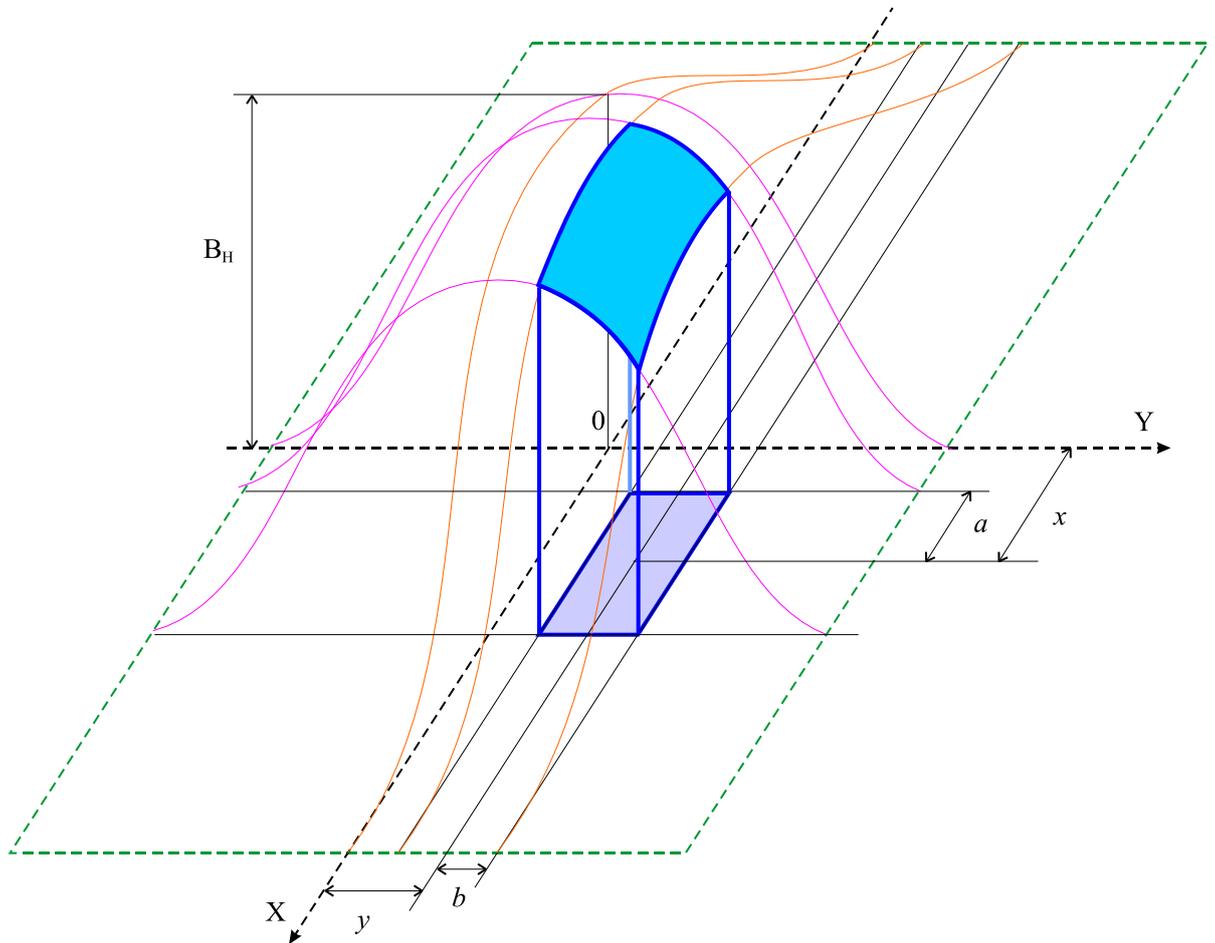


Рисунок 4.2 – Интегрирование индукции по площади катушки путевой структуры

Алгоритм работы программы интегрирования с последующим разложением полученной зависимости в ряд Фурье приведен на рис. 4.3. Структура данной программы приведена в таблице 4.1.

Для обеспечения сравнимости результатов расчётов для различных размеров катушек необходимо все расчёты производить с нормированными величинами.

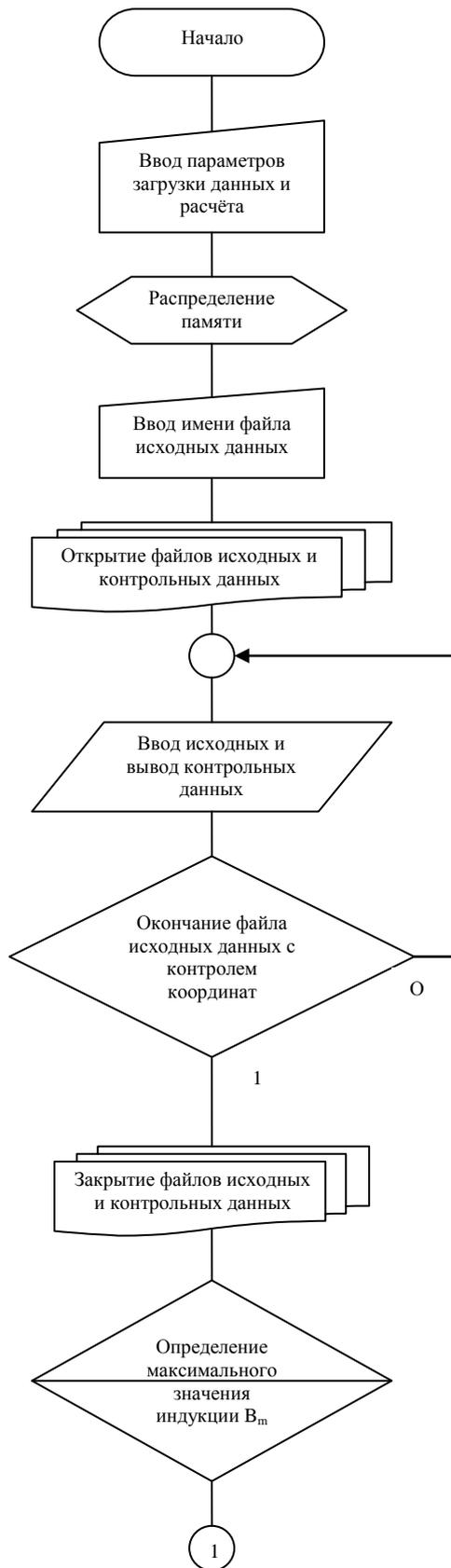
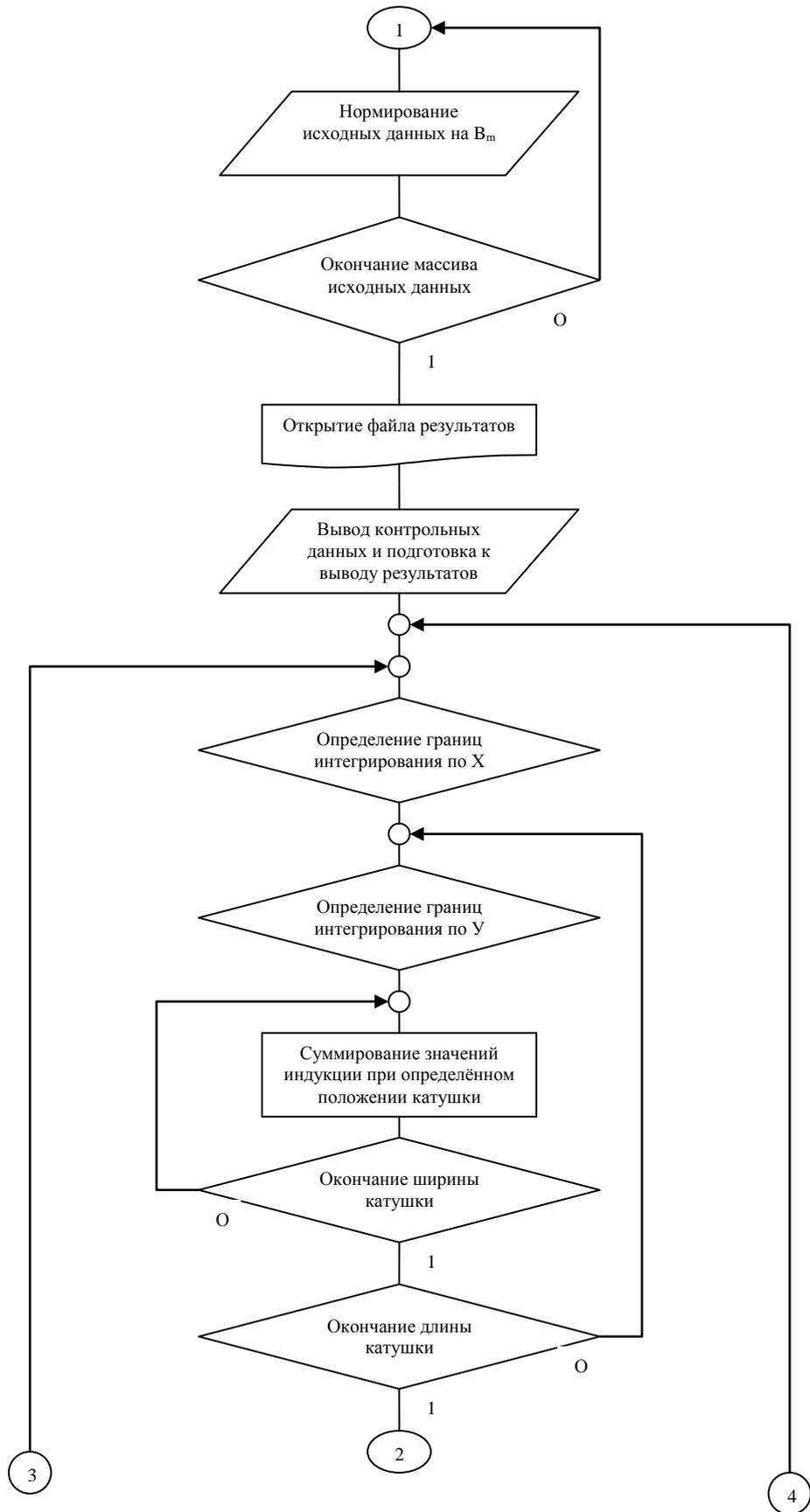
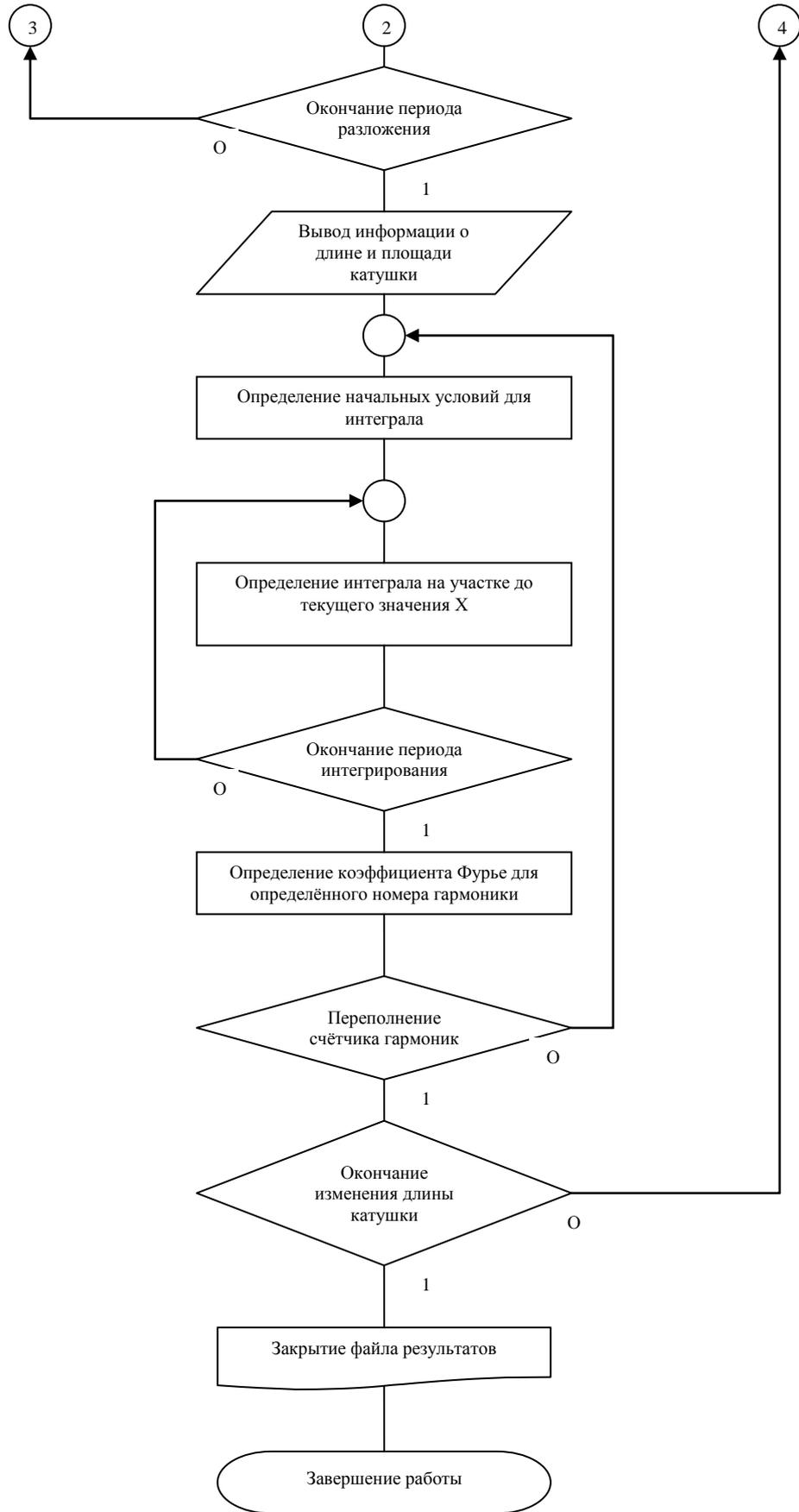


Рисунок 4.3 — Алгоритм работы программы



Продолжение рисунка 4.3



Продолжение рисунка 4.3

Таблица 4.1 – Структура программы интегрирования с последующим разложением полученной зависимости в ряд Фурье.

№ метки	Содержание блока программы
10-90	Служебные и информационные строки
100-110	Напоминание о необходимости введения исходных данных
120-138	Ввод параметров файла исходных данных и параметров, определяющих ход расчёта
139-144	<p>Определение служебных констант и распределение памяти под массивы данных:</p> <p>V_z – массив исходных данных;</p> <p>V_{zc} – массив нормированных исходных данных;</p> <p>$psic$ – массив значений потокосцеплений;</p> <p>A – массив значений коэффициентов Фурье.</p>
180-195	Ввод имени и открытие файла исходных данных, а также контрольного файла, в который выводятся исходные данные для контроля правильности загрузки исходных данных.
200-225	Построчная загрузка исходных данных и одновременная их запись в контрольный файл.
230	Конец загрузки и закрытие файла исходных данных, а также контрольного файла.
240-300	Определение максимального значения индукции для нормирования исходных данных с пересчётом из мТл в Тл.
310-350	Нормирование исходных данных на величину максимального значения индукции.
360-370	Создание файла для результатов расчёта
380-460	Вывод в файл значения ширины катушки относительно ширины магнитного поля, нормы индукции и подготовка шапки таблицы выходных данных
470-480	Начало интегрирования. по длине катушки (конец цикла 820)

530	Начало цикла по смещению катушки (конец цикла 660)
540-560	Определение начального значения интегральной суммы и границ интегрирования по оси X
570	Начало цикла суммирования по X внутри катушки (конец цикла 650)
580-600	Определение текущего значения X и границ интегрирования по оси Y
620	Определение текущего значения Y
630	Определение интегральной суммы для данных X и Y
670-690	Начало части программы, в которой производится определение коэффициентов ряда Фурье, построенной на полном преобразовании и не требующей подгонки количества измерений к возможностям программы. (Конец разложения 810)
700-710	Вывод в файл значений длины и площади катушки, отнесённых к размерам магнитного поля.
720	Начало цикла по номеру гармоники (конец цикла 810)
730	Определение начального значения интегральной суммы и произведения номера гармоники на постоянную Архимеда.
740	Начало цикла суммирования по X (конец цикла 770)
750-760	Определение интегральной суммы
780	Определение величины коэффициента ряда Фурье для данного номера гармоники
790-800	Вывод в файл и на экран значения коэффициента ряда Фурье для данного номера гармоники
830	Закрытие файла результатов
840-850	Окончание работы программы

Нормирование коэффициентов Фурье ψ_n производится по формуле

$$\psi_n^N = \frac{\psi_n}{B_m \cdot (2a_a \cdot 2b_a)}, \quad (4.1)$$

где B_m – максимальное значение индукции блока постоянных магнитов на соответствующей высоте, a_a, b_a – полудлина и полуширина катушки путевой структуры.

Нормирование длины катушки путевой структуры $2a_a$ производится по формуле

$$a_a^N = \frac{a_a}{a_f}, \quad (4.2)$$

где a_f – полудлина магнитного поля блока постоянных магнитов.

4.2 Анализ гармонических составляющих зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения

Измерение индукции магнитного поля исследуемого блока постоянных магнитов проводилось при помощи миллитесламетра ЭМ-1 на высотах (расстояниях между поверхностью блока и плоскостью среднего витка катушки) от 0,005 до 0,045 м. Для исследования распределения индукции поля были выбраны четыре конструктивно одинаковых блока постоянных магнитов.

Результаты измерений для различных блоков магнитов на высоте 0,020 м приведены на рис. 4.4-4.7. Поскольку при изготовлении блоков придерживались продольной и поперечной симметрии, на рисунках приведено распределение индукции магнитного поля для одного квадранта.

Размер приведенного квадранта составляет $40,0 \times 62,0$ см. Измеренные величины индукции приведены к единой цветовой шкале, что позволяет визуально определить различия в распределении индукции магнитного поля для различных блоков и высот.

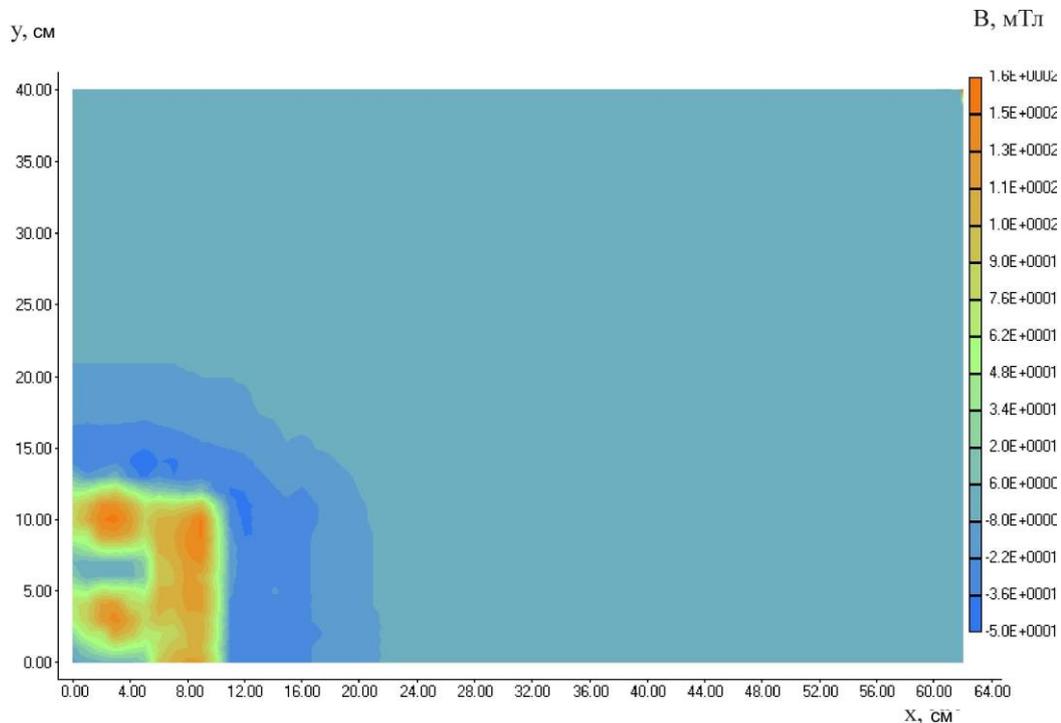


Рисунок 4.4 – Распределение индукции блока постоянных магнитов № 1 на высоте 20 мм

Распределение нормальной составляющей индукции блока магнитов близко к распределению индукции, создаваемой катушкой с током. В центре блока индукция имеет максимальное значение, при приближении к краю она уменьшается и меняет знак за границами блока. Блок состоит из полос магнитов, набранных в поперечном направлении, поэтому на рис. 4.4-4.7 видны провалы индукции в областях, лежащих между соседними полосами магнитов. В дальнейшем для определения потокосцепления удобнее пользоваться усреднёнными значениями индукции магнитного поля. На рис. 4.8 приведено среднее распределение индукции блока постоянных магнитов на высоте 0,020 м. Аналогичные распределения приведены на рис. 4.9 и 4.10 для высот 0,030 м и 0,045 м соответственно. Далее в расчётах

потокосцепления будут использоваться только усреднённые значения индукции.

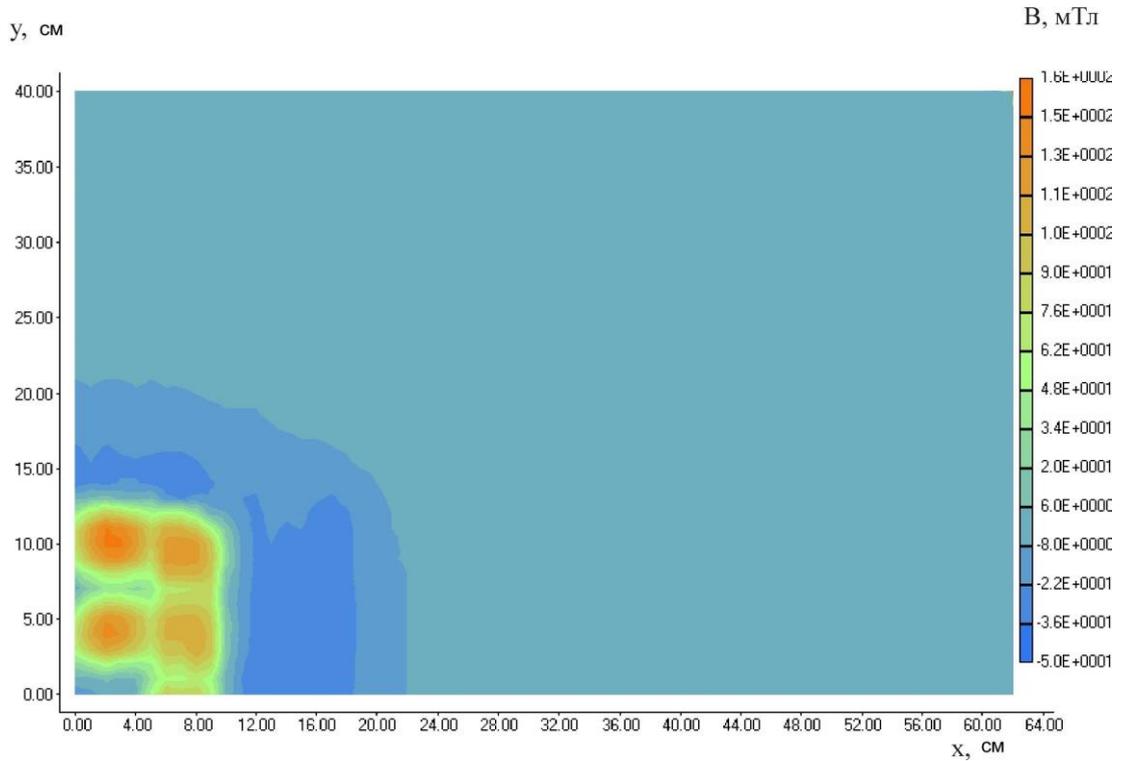


Рисунок 4.5 – Распределение индукции блока постоянных магнитов № 2 на высоте 20 мм

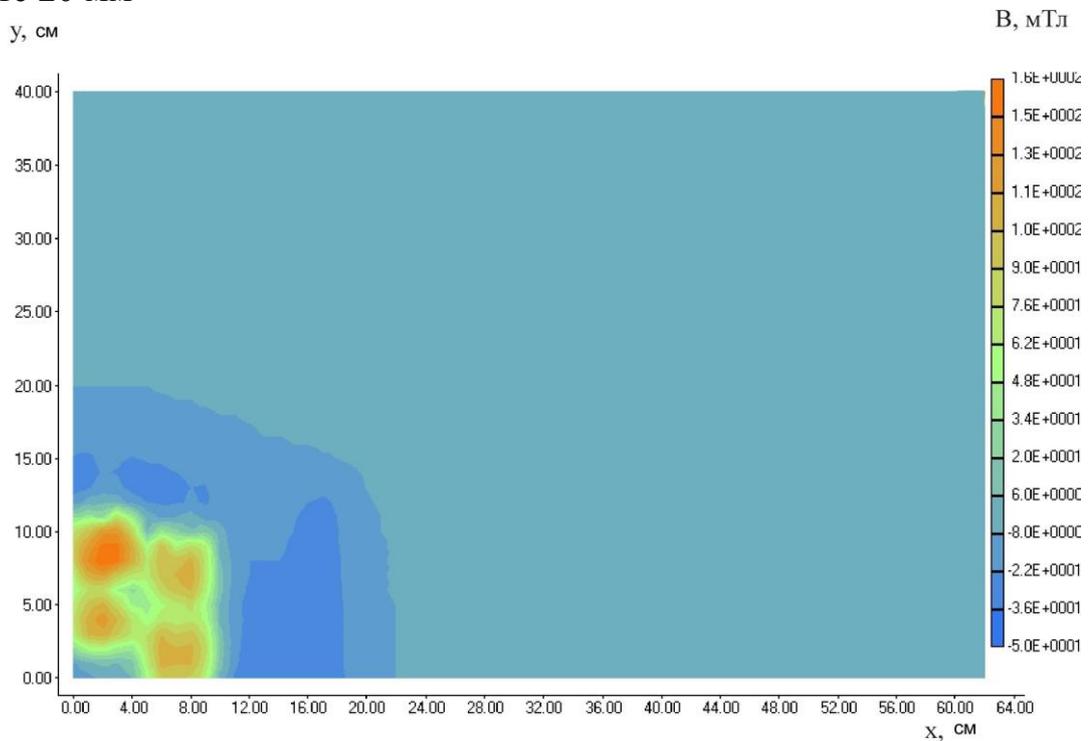


Рисунок 4.6 – Распределение индукции блока постоянных магнитов № 3 на высоте 20 мм

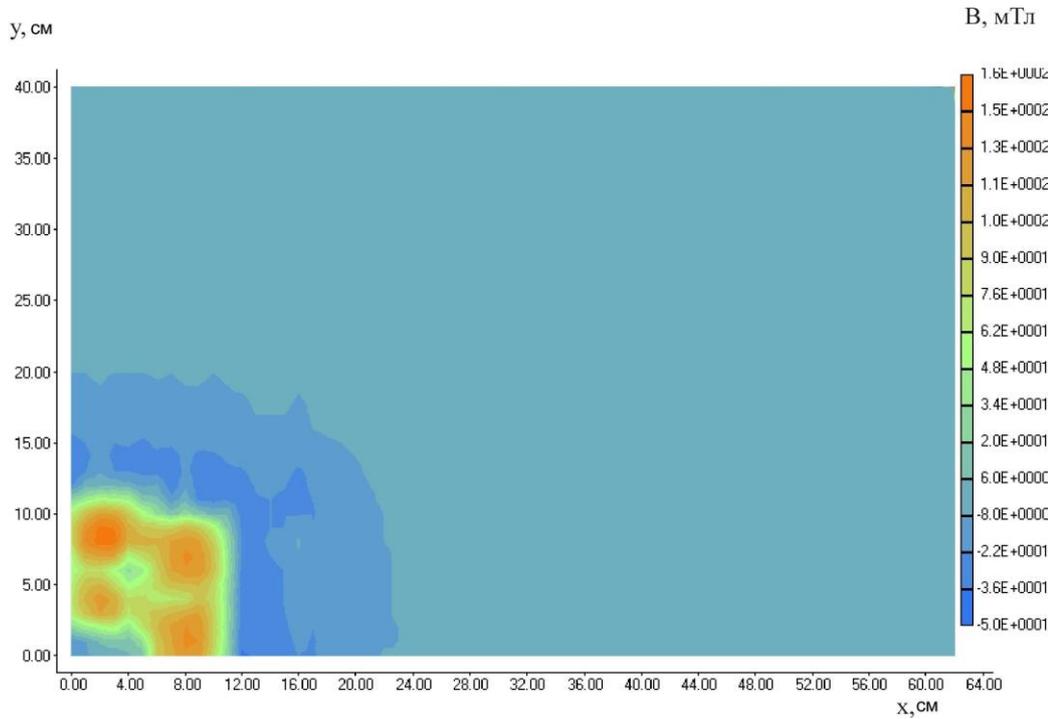


Рисунок 4.7 – Распределение индукции блока постоянных магнитов № 4 на высоте 20 мм

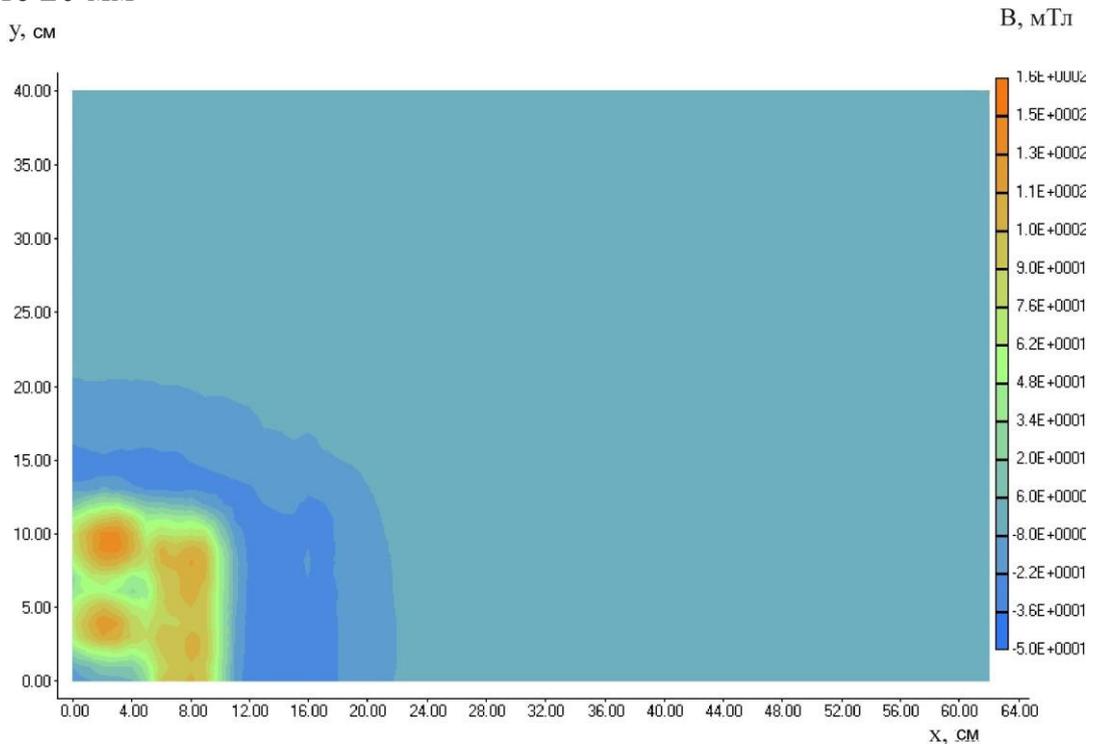


Рисунок 4.8 – Среднее распределение индукции блока постоянных магнитов на высоте 20 мм

На рис. 4.11–4.13 приведены расчётно-экспериментальные зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от перемещения их друг относительно друга для разных блоков и средние для высот $z = 0,02$ м; $0,03$ м; $0,045$ м соответственно. Эти зависимости

приведены при строго соосном (по оси X) перемещении катушки путевой структуры относительно блока постоянных магнитов.

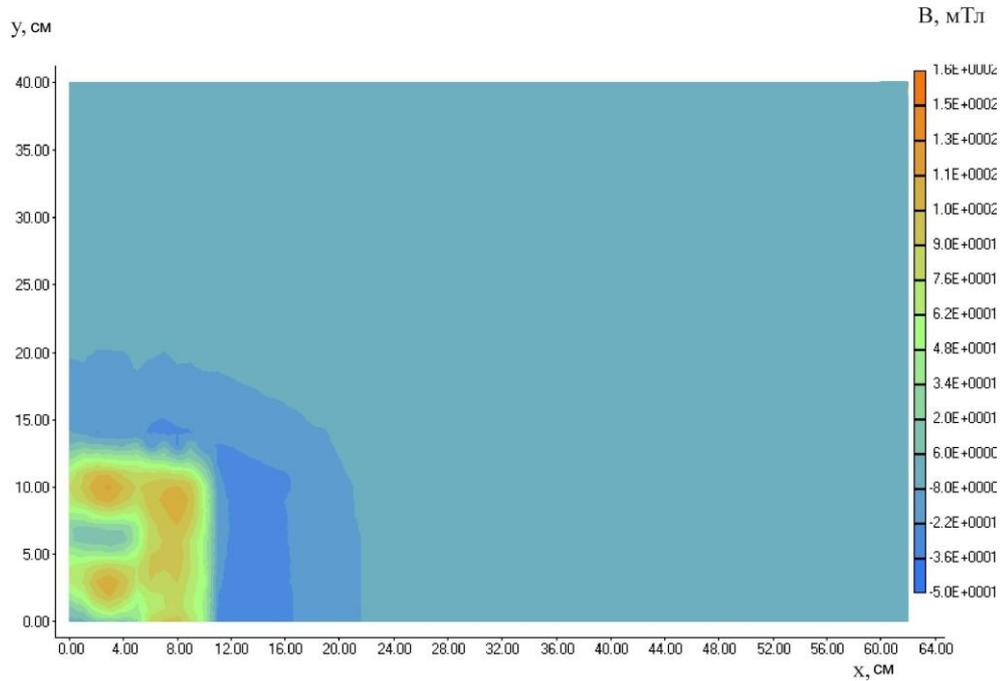


Рисунок 4.9 – Среднее распределение индукции блока постоянных магнитов на высоте 30 мм

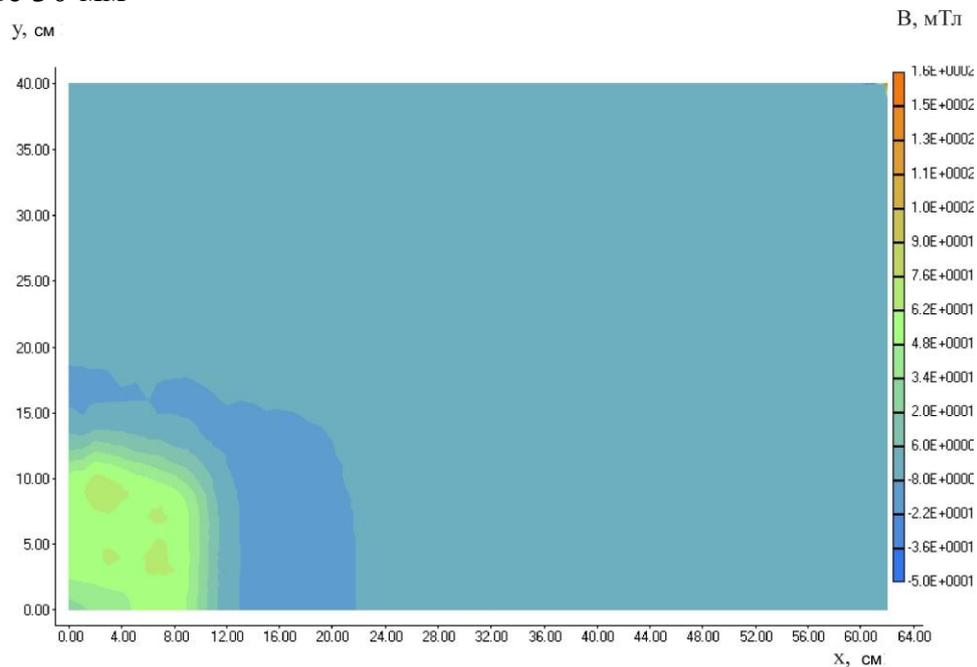


Рисунок 4.10 – Среднее распределение индукции блока постоянных магнитов на высоте 45 мм

На рис. 4.14 приведены снятые ранее экспериментальные (кривая 1, 3, 5) и расчётно-экспериментальные (кривая 2, 4, 6) зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного

перемещения. Несмотря на неоптимальные условия хранения блоков, что привело к их частичному размагничиванию, хорошее качественное совпадение обеих кривых показывает, что при помощи предлагаемого метода достаточно точно определяется потокосцепление, а, следовательно, и сила взаимодействия катушки с блоком постоянных магнитов.

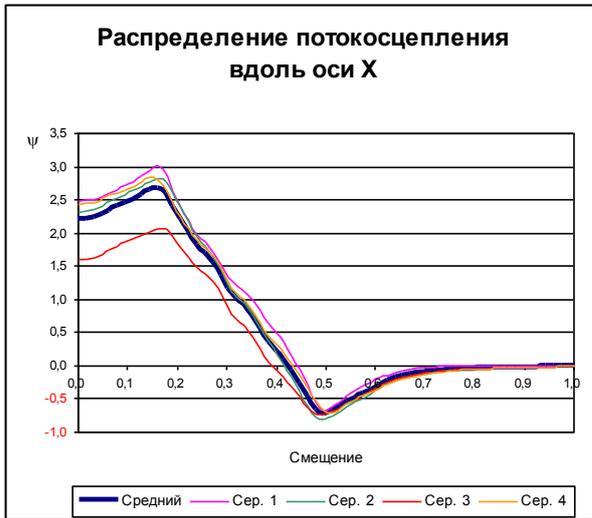


Рисунок 4.11 – Зависимости потокосцепления от перемещения для разных блоков и средние для высоты $z = 0,02$ м

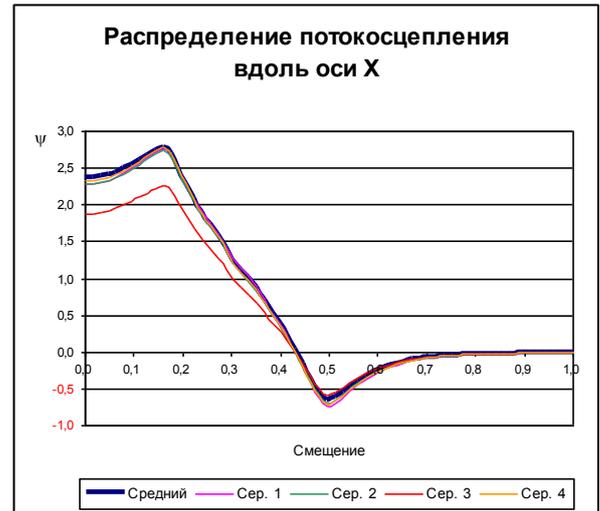


Рисунок 4.12 – Зависимости потокосцепления от перемещения для разных блоков и средние для высоты $z = 0,03$ м

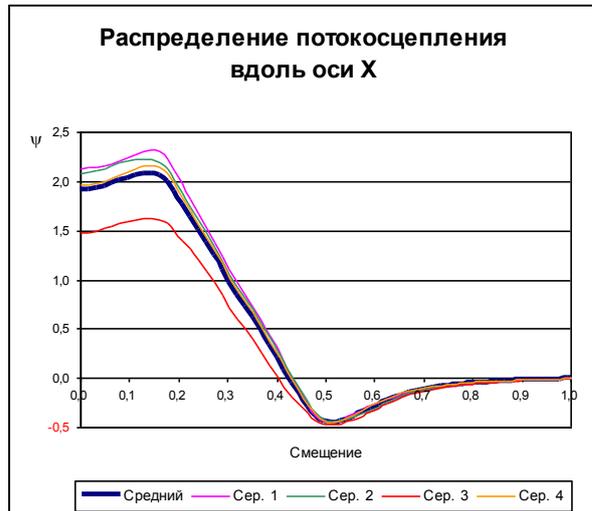


Рисунок 4.13 – Зависимости потокосцепления от перемещения для разных блоков и средние для высоты $z = 0,045$ м

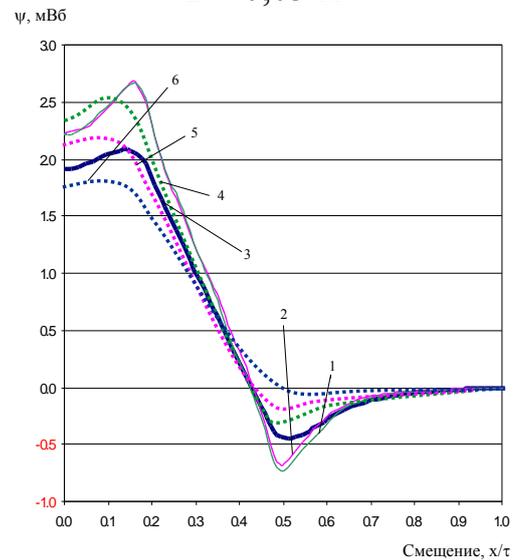


Рисунок 4.14 – Расчетно-экспериментальные (2,4,6) и экспериментальные (1,3,5) зависимости потокосцепления от перемещения для высот $z = 0,02; 0,03; 0,045$ м

На рис. 4.15– 4.17 представлены зависимости коэффициентов ряда Фурье от длины катушки путевой структуры на фиксированном интервале разложения. Эти зависимости приведены для высот $z= 0,02$ м; $0,03$ м; $0,045$ м при строго соосном (по оси X) перемещении катушки путевой структуры относительно блока постоянных магнитов. Несмотря на то, что при разложении потокосцепления наличествуют все гармоники, на этих и последующих рисунках приведены только 1, 5, 7, 11, 13, 17 и 19 гармоники. Это обусловлено тем, что при расчёте тяговых усилий, в соответствии с методом, описанным ранее [1], чётные гармоники выпадают в связи с тем, что в транспортном средстве блоки постоянных магнитов расположены с чередованием полюсов, а гармоники кратные 3 выпадают в силу того, что используется трёхфазная путевая обмотка, соединённая в звезду.

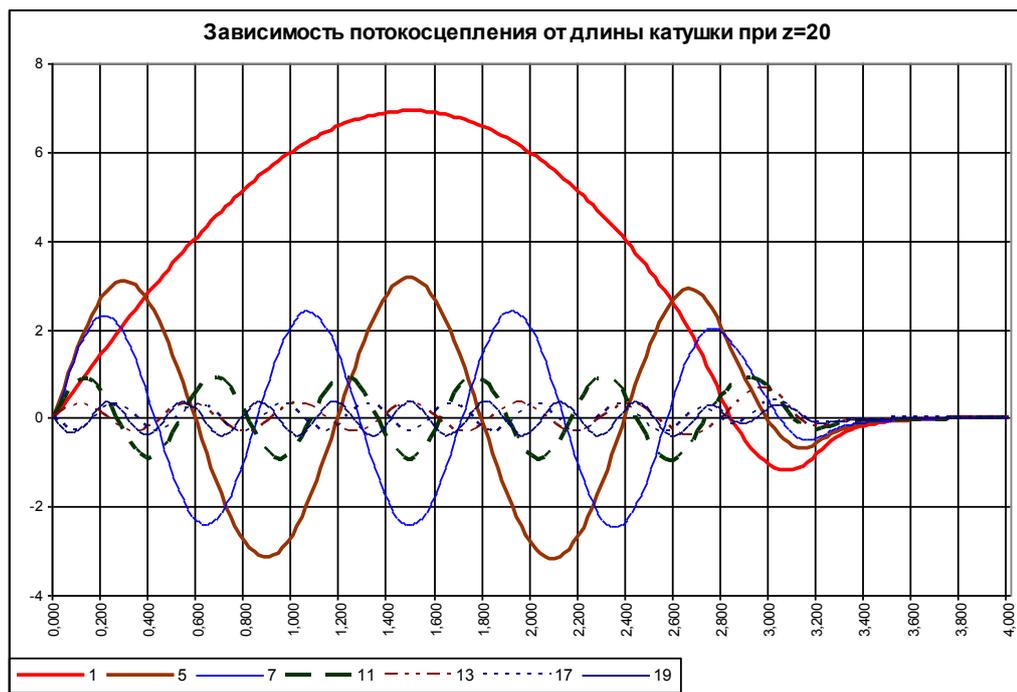


Рисунок 4.15 – Зависимость коэффициентов ряда Фурье от длины катушки путевой структуры на фиксированном интервале разложения для высоты $z = 0,02$ м

Из рис. 4.15– 4.17 видно, что при изменении длины катушки от 0 и до 4 длин поля блока постоянных магнитов полученные зависимости имеют 3 зоны. В первой зоне (от 0 до 2,5) зависимости явно гармонические. В третьей зоне, когда длина катушки составляет не менее 3,5 длин поля

потокосцепление обращается в 0. В средней зоне происходит деформация зависимости. Для разных высот графики зависимостей отличаются только масштабом по оси ординат.



Рисунок 4.16 – Зависимость коэффициентов ряда Фурье от длины катушки путевой структуры на фиксированном интервале разложения для высоты $z = 0,03$ м

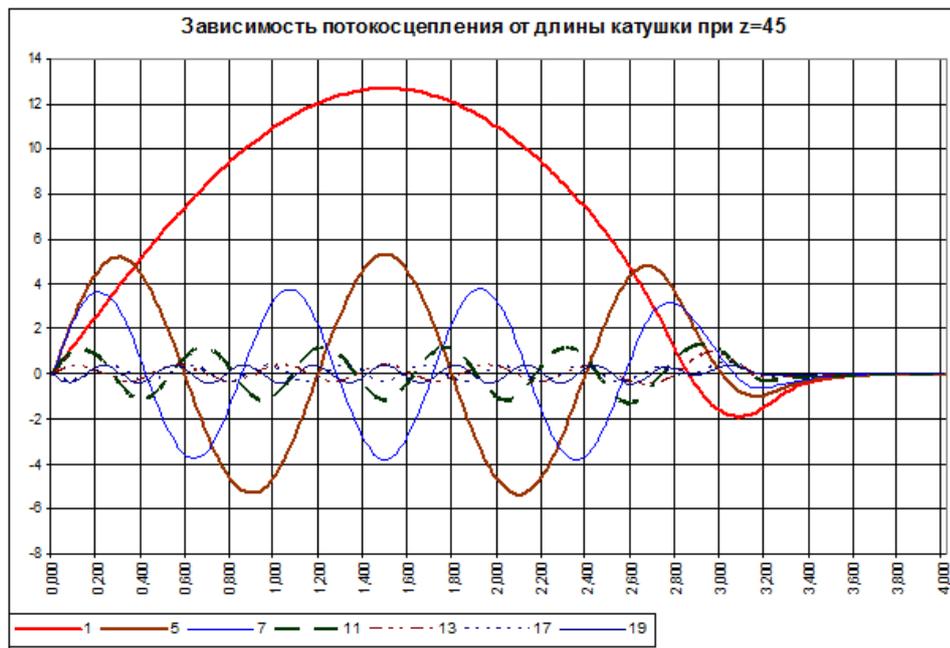


Рисунок 4.16 – Зависимость коэффициентов ряда Фурье от длины катушки путевой структуры на фиксированном интервале разложения для высоты $z = 0,03$ м

На рис. 4.18–4.20 представлены зависимости коэффициентов ряда Фурье для разных длин катушки путевой структуры от номера гармоники на фиксированном интервале разложения. Эти зависимости приведены для высот $z = 0,02$ м; $0,03$ м; $0,045$ м при строго соосном (по оси X) перемещении катушки путевой структуры относительно блока постоянных магнитов.

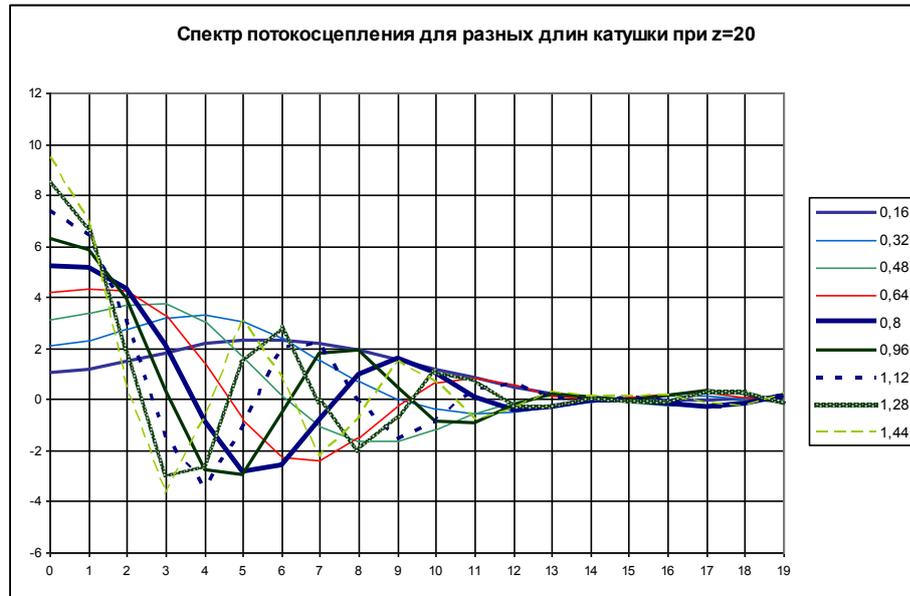


Рисунок 4.18 – Зависимость коэффициентов ряда Фурье для разных длин катушки путевой структуры от номера гармоники на фиксированном интервале разложения на высоте $z = 0,02$ м

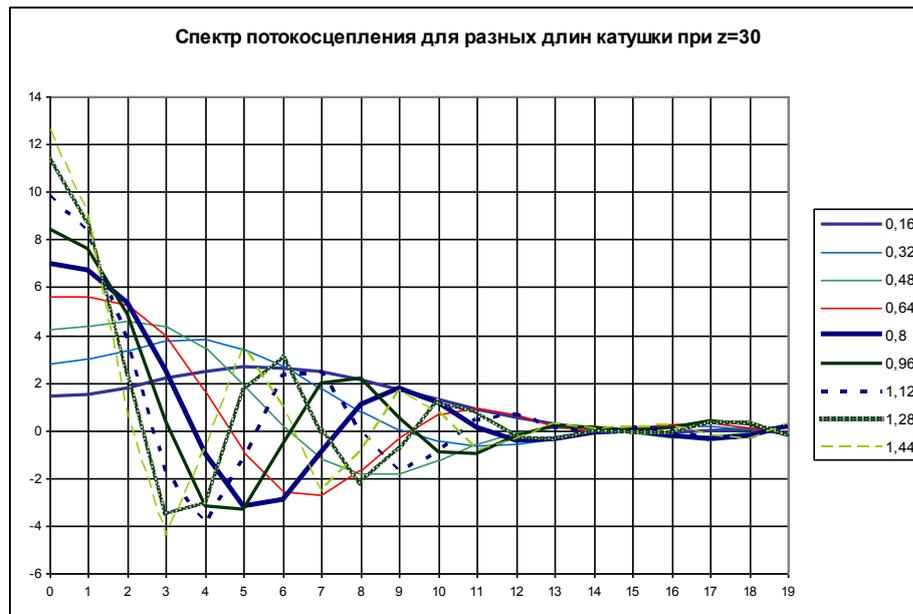


Рисунок 4.19 – Зависимость коэффициентов ряда Фурье для разных длин катушки путевой структуры от номера гармоники на фиксированном интервале разложения на высоте $z = 0,03$ м

Из рис. 4.18–4.20 видно, что можно выбрать такую длину катушки, при которой будет минимальная величина 5-й и 7-й гармоник, но при этом будет достаточно большая 1-я гармоника. Для разных высот графики зависимостей отличаются только масштабом по оси ординат.

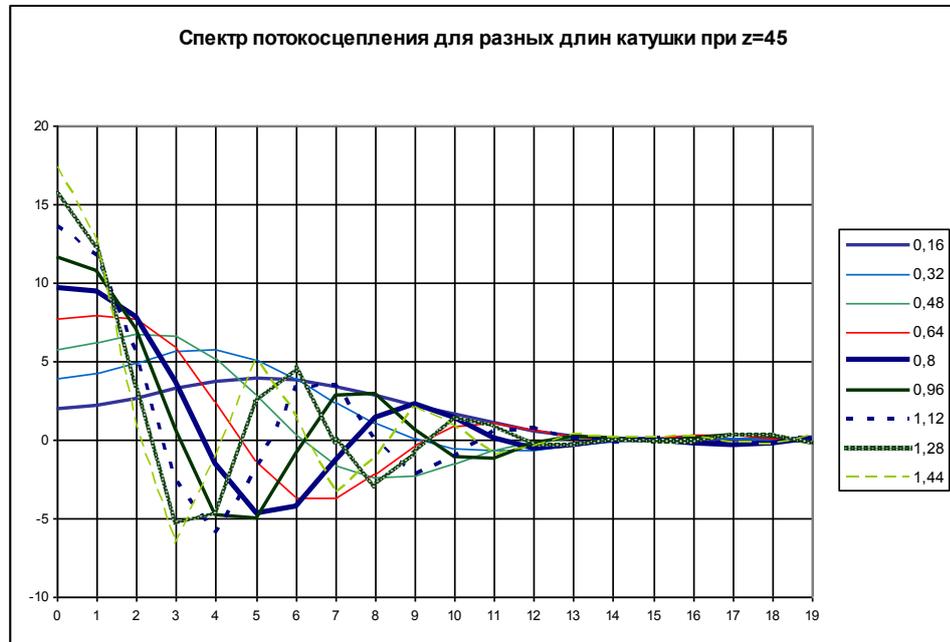


Рисунок 4.20 – Зависимость коэффициентов ряда Фурье для разных длин катушки путевой структуры от номера гармоники на фиксированном интервале разложения на высоте $z = 0,045$ м

С целью получения рекомендаций по выбору рабочего зазора [96] между плоскостью катушки и блоком постоянных магнитов проведено сравнение зависимостей коэффициентов разложения Фурье для одинаковых гармоник при различных величинах рабочих зазоров, которые приведены на рис. 4.21.

В данном случае коэффициенты взяты для катушки, имеющей длину равную полутора длинам поля блока постоянных магнитов.

На рис. 4.18–4.20 по оси X (абсцисс) приведены размеры катушки, приведенные к длине поля блока постоянных магнитов.

Из рис. 4.21 видно, что все учитываемые зависимости, кроме 5-й и 7-й гармоник, особенно 1-ая, имеют локальный максимум в области зазора 0,025 м.

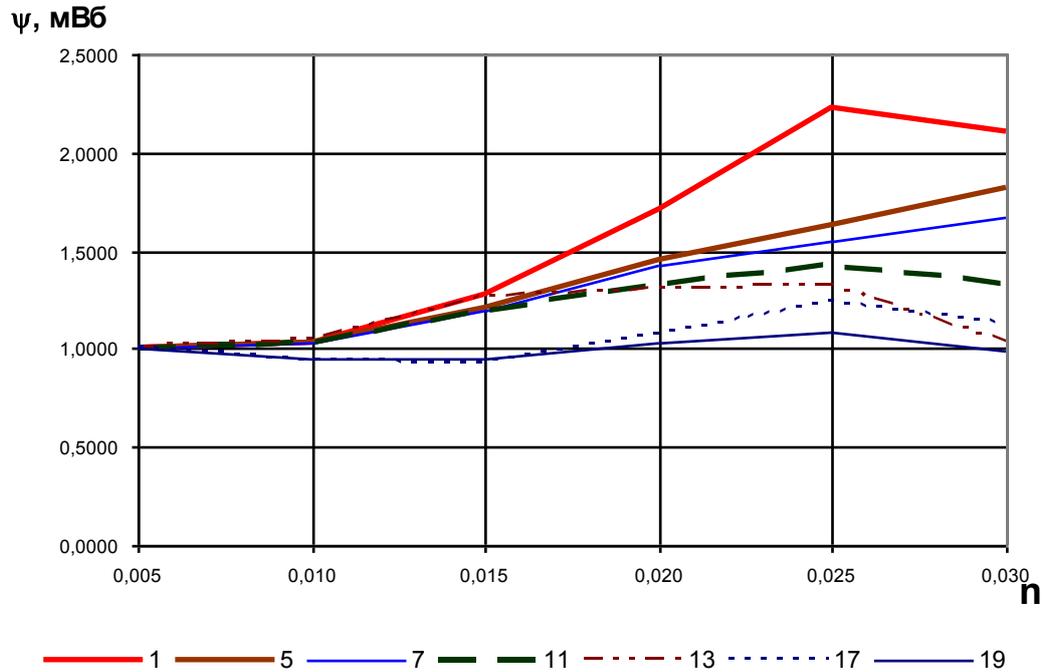


Рисунок 4.21 – Зависимость коэффициентов разложения Фурье для одинаковых гармоник при различных величинах рабочих зазоров

Линейный двигатель имеет естественный период, который равняется двойному полюсному делению 2τ . При исследовании источника постоянного магнитного поля неизвестно, в двигателе с каким τ он будет работать. Следовательно, при первоначальном исследовании источника постоянного магнитного поля период разложения зависимости его потокосцепления с катушкой путевой структуры выбирается произвольно. Поскольку коэффициенты Фурье зависят от периода разложения, необходимо иметь возможность произвести их пересчёт для различных его величин.

Предположим, что измеренная зависимость потокосцепления блока постоянных магнитов с катушкой путевой структуры от их взаимного смещения вдоль оси Ox представляет собой функцию $\psi(x)$. При разложении этой функции в ряд Фурье на периоде $2L$ гармонические коэффициенты равны

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L \psi(x) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{L} x\right) \cdot dx, \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L \psi(x) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{L} x\right) \cdot dx. \quad (4.4)$$

где n – номер гармоники

С учётом (4.3) и (4.4) вышеуказанную зависимость можно записать в виде

$$\psi(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{L} \cdot x\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{L} \cdot x\right). \quad (4.5)$$

При разложении этой функции в ряд Фурье на периоде 2λ гармонические коэффициенты равны

$$\alpha_m = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \psi(x) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot dx; \quad (4.6)$$

$$\beta_m = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \psi(x) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot dx. \quad (4.7)$$

С учётом (4.5) выражение (4.6) для значения гармонических коэффициентов Фурье принимает вид

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{L} \cdot x\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{L} \cdot x\right) \right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \cdot dx = \\ &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\frac{a_0}{2} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\frac{a_0}{2} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx + \\
&+ \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx + \\
&+ \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Выражение (4.8) можно записать в виде

$$\alpha_m = \alpha_m^1 + \alpha_m^2 + \alpha_m^3,$$

где

$$\alpha_m^1 = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\frac{a_0}{2} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx \tag{4.9}$$

$$\alpha_m^2 = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx \tag{4.10}$$

$$\alpha_m^3 = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx \tag{4.11}$$

Производим интегрирование и получаем значение α_m^1 при $m \neq 0$

$$\begin{aligned}
\alpha_m^1 &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\frac{a_0}{2} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx = \frac{a_0}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot \lambda} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \Big|_{-\lambda}^{\lambda} = \\
&= \frac{a_0}{m \cdot \pi} \cdot \sin(m \cdot \pi) = 0,
\end{aligned}$$

значение α_m^1 при $m=0$

$$\begin{aligned}\alpha_0^1 &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\frac{a_0}{2} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\frac{a_0}{2} \cdot 1 \right) \cdot dx = \frac{a_0}{2 \cdot \lambda} \cdot x \Big|_{-\lambda}^{\lambda} = \\ &= \frac{a_0 \cdot 2 \cdot \lambda}{2 \cdot \lambda} = a_0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_m^2 &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \left[\int_{-\lambda}^{\lambda} \cos\left(\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \cdot dx + \right. \\ &\quad \left. + \int_{-\lambda}^{\lambda} \cos\left(\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \cdot dx \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi} \cdot \sin\left(\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \Big|_{-\lambda}^{\lambda} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi} \cdot \sin\left(\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \Big|_{-\lambda}^{\lambda} \right] = \\ &= \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi} \cdot \sin\left(\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot \lambda\right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi} \cdot \sin\left(\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot \lambda\right) \right]\end{aligned}$$

при $\text{i}\ddot{\text{d}}\text{e} \quad m \neq 0, \text{ à } |n \cdot \lambda| \neq |m \cdot L|$

$$\alpha_m^2 = \frac{2 \cdot L \cdot \lambda \cdot (-1)^m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \cdot a_n}{n^2 \cdot \lambda^2 - m^2 \cdot L^2} \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot \lambda}{L},$$

УЧИТЫВАЯ, ЧТО

$$\sin\left(\left(\frac{n}{\lambda} - \frac{m}{L}\right) \cdot \pi \cdot \lambda\right) = \sin \frac{n \cdot \pi \cdot \lambda}{L} \cdot \cos(m \cdot \pi) - \cos \frac{n \cdot \pi \cdot \lambda}{L} \cdot \sin(m \cdot \pi)$$

$$\sin\left(\left(\frac{n}{\lambda} + \frac{m}{L}\right) \cdot \pi \cdot \lambda\right) = \sin \frac{n \cdot \pi \cdot \lambda}{L} \cdot \cos(m \cdot \pi) + \cos \frac{n \cdot \pi \cdot \lambda}{L} \cdot \sin(m \cdot \pi), \quad \text{при этом,}$$

$$\cos(m \cdot \pi) = (-1)^m, \quad \text{а} \quad \sin(m \cdot \pi) = 0$$

при $m=0$

$$\begin{aligned}\alpha_0^2 &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos(0) \right) \cdot dx = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \frac{L}{n \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \Big|_{-\lambda}^{\lambda} = \\ &= \frac{2 \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot \lambda}{L}\right) = \frac{L}{\pi \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \sin\left(n \cdot \frac{\pi \cdot \lambda}{L}\right) \right]\end{aligned}$$

при $|n \cdot \lambda| = |m \cdot L|$, т.е. $m = n \cdot \frac{\lambda}{L}$

$$\begin{aligned}\alpha_m^2 &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \lambda \cdot \pi \cdot x}{L \cdot \lambda}\right) \right) \cdot dx = \frac{a_n}{\lambda} \cdot \int_{-\lambda}^{\lambda} \cos^2\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot dx = \\ &= \frac{a_n}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_{-\lambda}^{\lambda} 1 + \cos\left(\frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot dx = \frac{a_n}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_{-\lambda}^{\lambda} dx + \frac{a_n}{2 \cdot \lambda} \cdot \int_{-\lambda}^{\lambda} \cos\left(\frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot dx = \\ - &= \frac{a_n}{2 \cdot \lambda} \cdot x \Big|_{-\lambda}^{\lambda} + \frac{a_n \cdot L}{2 \cdot 2 \cdot n \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \Big|_{-\lambda}^{\lambda} = \\ &= \frac{a_n \cdot 2 \cdot \lambda}{2 \cdot \lambda} + \frac{a_n \cdot L \cdot 2}{2 \cdot 2 \cdot n \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \lambda}{L}\right) = \\ &= a_n + \frac{a_n \cdot L}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot m) = a_n + \frac{a_n \cdot L}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot 0 = a_n\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_m^3 &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) \right) \cdot dx = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \left[\int_{-\lambda}^{\lambda} \sin\left(\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \cdot dx + \right. \\ &\quad \left. + \int_{-\lambda}^{\lambda} \sin\left(\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \cdot dx \right] = \\ &= -\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \left[\frac{1}{\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi} \cdot \cos\left(\left(\frac{n}{L} - \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \Big|_{-\lambda}^{\lambda} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi} \cdot \cos\left(\left(\frac{n}{L} + \frac{m}{\lambda}\right) \cdot \pi \cdot x\right) \Big|_{-\lambda}^{\lambda} \right] = 0\end{aligned}$$

В результате для чётной функции, каковой и является зависимость потокосцепления источника постоянного магнитного поля с катушкой

путевой структуры от смещения пересчёт коэффициентов Фурье можно осуществить следующим образом:

$$\text{при } m=0 \quad \alpha_0 = a_0 + \frac{L}{\pi \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \sin \left(n \cdot \frac{\pi \cdot \lambda}{L} \right) \right]$$

при $m \neq 0$

$$|n \cdot \lambda| \neq |m \cdot L| \quad \alpha_m^1 = 0,$$

$$\alpha_m = \frac{2 \cdot L \cdot \lambda \cdot (-1)^m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \cdot a_n}{n^2 \cdot \lambda^2 - m^2 \cdot L^2} \cdot \sin \frac{n \cdot \pi \cdot \lambda}{L},$$

$$|n \cdot \lambda| = |m \cdot L|, \quad \text{т.е. } m = n \cdot \frac{\lambda}{L}$$

$$\alpha_m = a_n$$

ВЫВОДЫ

1. В результате исследований блока постоянных магнитов получены зависимости, в т.ч. аналитические, потокосцепления от геометрических размеров путевых катушек, их взаимного расположения и величины рабочего зазора для выбора рациональных параметров линейного синхронного двигателя с возбуждением от данного блока постоянных магнитов.
2. Исходя из необходимости подавления 5-й и 7-й гармоник можно выбрать длину катушки либо 1,25, либо 1,5 длины поля блока постоянных магнитов.
3. Рекомендуемый зазор должен быть на уровне 0,025 м, поскольку 1-ая гармоника при данном зазоре имеет максимум, а 5-я и 7-я гармоники ещё недостаточно большие, чтобы серьёзно исказить силы взаимодействия;
4. При уменьшении зазора меньше рекомендуемого происходит уменьшение тягового усилия.

5 ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЭКИПАЖА ЛИНЕЙНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ.

Для однозначного заключения об адекватности разработанной модели и эффективности разработанных методов необходимо произвести их проверку на фальсифицируемость. Принципиальная опровержимость любого утверждения (критерий Поппера) — критерий научности эмпирической теории, сформулированный К. Поппером. Теория удовлетворяет критерию Поппера (является фальсифицируемой), если существует методологическая возможность её опровержения путём постановки того или иного эксперимента, даже если такой эксперимент ещё не был поставлен.

В соответствии с этим критерием, необходимо не просто провести эксперимент, результаты которого совпадут с расчётными, но нужно ещё избежать ошибок, вызванных случайным их совпадением. Для этого необходимо провести эксперимент с изменяющимися параметрами [7].

Для проведения эксперимента необходимо решить следующие задачи:

- разработка экспериментального стенда;
- разработка метода определения знакопеременного тягового усилия, возникающего в линейном двигателе;
- изменение геометрических параметров линейного двигателя, приводящего к существенному изменению формы кривой тягового усилия.

5.1 Конструкция экспериментального стенда

Для экспериментального исследования линейного тягового электропривода на опытно-экспериментальном полигоне ИТСТ НАНУ «Трансмаг» был создан стенд (рис.5.1). Экспериментальный стенд для исследования ЛСТЭП включает в себя путевую эстакаду, транспортное

средство 2 и преобразователь частоты с непосредственной связью. Путь эстакада представляет собой конструкцию, изготовленную из немагнитного алюминиевого профиля 1, которая посредством опор 3 крепится к фундаментным блокам 4. Эстакада по общей длине состоит из двух секций. Первая секция длиной 8750 мм находится в неотапливаемом ангаре 5 и является продолжением четырехточечного стенда электродинамического подвеса 6 [1].

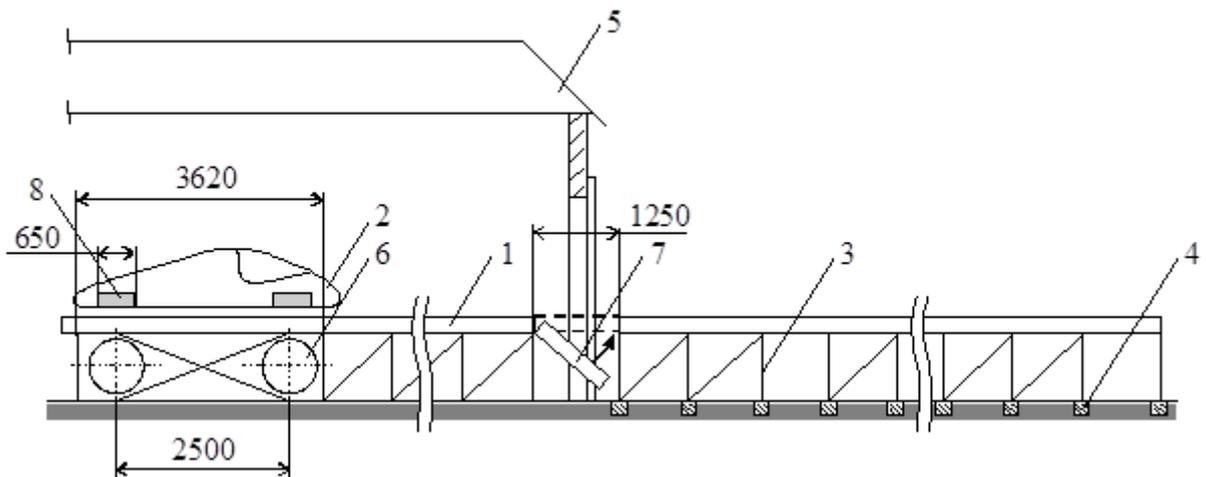


Рисунок 5.1 – Стенд для исследования линейного электропривода

Вторая секция длиной 21250 мм является продолжением первой секции и расположена на открытом воздухе. Соединение секций между собой осуществляется посредством опускаемого моста 7.

После окончания экспериментов мост опускается, что необходимо для закрытия ворот ангара.

На путевой эстакаде уложены два ряда путевых катушек, которые крепятся на немагнитных подложках. Длинные стороны путевых катушек расположены в направлении перемещения платформы. На эстакаде закреплены направляющие рельсы, которые используются для опирания ТС. Рядом с направляющими рельсами размещается датчик положения.

Линейный синхронный двигатель служит для перемещения ТС вдоль экспериментального стенда. Система возбуждения образуется четырьмя сверхпроводящими магнитами 8, расположенными на транспортном

средстве 2 (рис.5.1), которые можно заменить блоками постоянных магнитов. Трехфазная путевая обмотка образована катушками, выполненными из прямоугольного медного провода. Ряды катушек расположены друг от друга с межосевым расстоянием 1600 мм, равным поперечному расстоянию между осями сверхпроводящих магнитов. Продольное расстояние между осями магнитов макетного образца ВСНТ равно 2500 мм, поэтому шаг размещения катушек путевой обмотки приняли равным $2500/6=416,6$ мм.

В рабочем режиме транспортное средство 2 перемещается на колесах по рельсам. При этом электромагнитный зазор между плоскостями средних сечений обмоток двигателя составляет 110 мм, а зазор в свету лежит в пределах 15-18 мм (10 мм между блоками магнитов подвеса). Для управления работой ЛСД имеется датчик положения ТС относительно путевой структуры. Датчик конструктивно состоит из излучателя, расположенного на движущемся ТС, и приемника, размещенного на эстакаде.

Катушка путевой обмотки ЛСД выполняется прямоугольным проводом марки ПЭТВСД, имеющим размеры сторон с изоляцией 2,7x8,4 мм и сечение 17,6 мм². Каждая катушка имеет 40 витков. Провод намотан плашмя в 10 слоев. В каждом слое 4 витка. Наружная изоляция и бандаж катушки выполнены лентой ЛЭС 0,2x20, намотанной в два слоя. Все катушки имеют одинаковую намотку, вывод из внутреннего слоя соответствует началу катушки, а вывод из наружного слоя — концу катушки. После бандажирования катушки дважды пропитаны лаком ГФ-985. Масса одной катушки составляет 7,7 кг. Всего в схеме обмотки в обоих рядах на длине эстакады 30 м укладывается 144 катушки (3 фазы по 48 катушек).

Катушки каждой фазы обмотки соединяются в соответствии со схемой, представленной на рис.5.2. Определенной фазе обмотки принадлежит каждая третья катушка. Например, схема фазы А состоит из последовательного соединения катушек с номерами 1,4,7,...,67,70. В таблице 5.1 приведены

технические характеристики и параметры путевой структуры линейного синхронного двигателя для экспериментального линейного стенда [97,98].

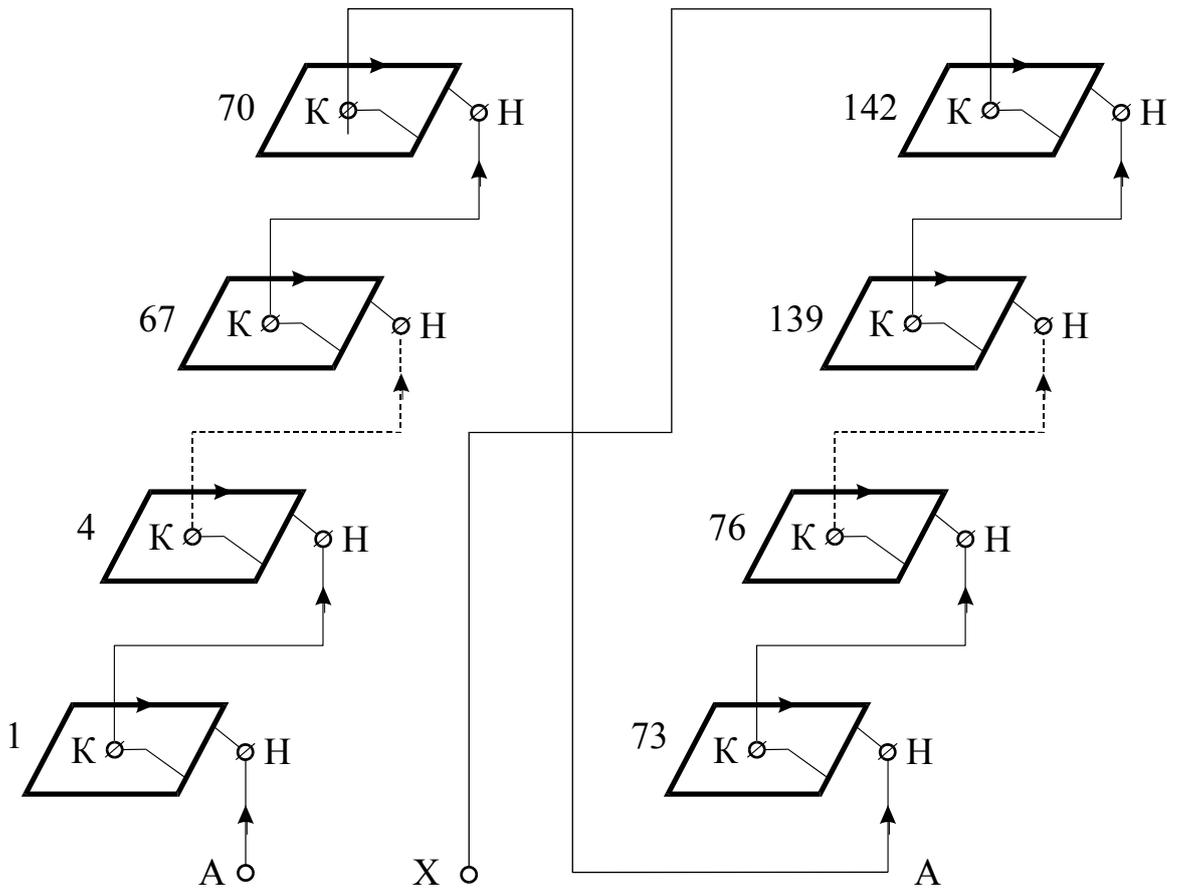


Рисунок 5.2 – Схема соединения катушек путевой обмотки

При одинаковой полярности источников поля возбуждения катушки путевой обмотки должны также создавать магнитные поля одинаковой полярности. Всего в каждой фазе обмотки включено последовательно 48 катушек. Фазы путевой обмотки соединяются между собой в звезду. Все межкатушечные соединения выполняются под немагнитной подложкой путевой эстакады.

В табл. 5.2 приведены технические характеристики и параметры системы возбуждения линейного синхронного двигателя для экспериментального линейного стенда. Данные по системе возбуждения линейного стенда относятся к блоку постоянных магнитов, описанному ранее.

Таблица 5.1 – Технические характеристики и параметры путевой структуры линейного синхронного двигателя

<i>Наименование показателя</i>	<i>Единица измерения</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Величина</i>
Длина участка	м	l_c	60
Полусное деление	м	τ	0.625
Длина катушки	м	$2a_a$	0.388
Ширина катушки	м	$2b_a$	0.292
Высота катушки	м	$2s_a$	0.034
Толщина катушки	м	$2t_a$	0.028
Сечение провода	мм ²	$S_{анр}$	17.6
Число витков	-	W_a	40
Число катушек фазы участка	-	K	48
Проводимость провода катушек	См/м	γ_a	$42.0 \cdot 10^6$
Активное сопротивление фазы	Ом	R_a	3.605
Реактивное сопротивление фазы	Ом	X_a	0.775
Собственная индуктивность фазы	Гн	L_{aa}	0.0514
Взаимоиндуктивность фаз	Гн	M_{aa}	0.00367
Тип обмотки	3-фазная звезда		

В таблице 5.3 приведены энергетические характеристики и параметры экспериментального линейного стенда. Механическая мощность и КПД для ЛСД линейного стенда не приводятся, так как в связи с экспериментальным характером работ цель достижения высокого КПД на низких скоростях движения не ставилась.

В качестве ТС на экспериментальном стенде используются такие подвижные устройства:

- макетный экипаж (рис 5.3);
- экспериментальная тележка (рис.5.4).

Таблица 5.2 – Технические характеристики и параметры системы возбуждения линейного синхронного двигателя

<i>Наименование показателя</i>	<i>Единица измерения</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Величина</i>
Длина транспортного средства	м	l_s	3.5
Расстояние между осями блоков	м	τ_f	2.5
Длина блока магнитов	м	$2a_f$	0.205
Ширина блока магнитов	м	$2b_f$	0.250
Число блоков на экипаже	-	N_f	4
Зазор между блоками магнитов возбуждения и ПО	м	z_o	0.045
Тип возбуждения	постоянные магниты		



Рисунок 5.3 – Макетный экипаж на экспериментальном стенде

При пусковых и наладочных испытаниях в качестве ТС используется экспериментальная тележка (рис.5.4), выполненная из алюминиевых труб прямоугольного профиля 1. На ней крепятся колеса 2 и блоки постоянных магнитов возбуждения 3.

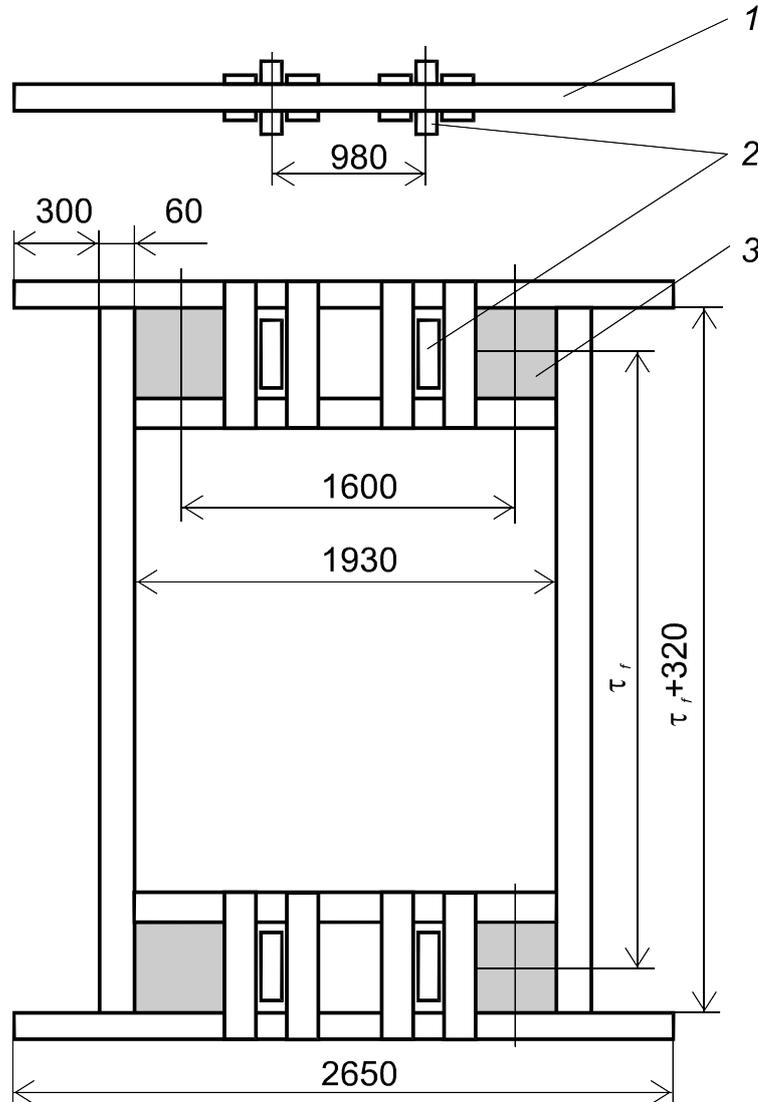


Рисунок 5.4 – Эскиз экспериментальной тележки

Экспериментальная тележка перемещается над эстакадой. При отсутствии магнитного подвеса или недостаточных подъемных усилиях экспериментальная тележка опирается на колеса, перемещающиеся по направляющим рельсам.

Экспериментальная тележка может быть использована как для исследования на экспериментальном стенде, так и на четырехточечном стенде электродинамического подвеса.

Таблица 5.3 – Энергетические характеристики и параметры экспериментального линейного стенда

<i>Наименование показателя</i>	<i>Единица измерения</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Величина</i>
Скорость экипажа	м/с	V_H	3.0
Масса экипажа	кг	m	600
Частота напряжения	Гц	f_H	2.4
Фазное напряжение	В	U_H	200
Фазный ток	А	I_H	70
Тяговое усилие	Н	F_H	70
Косинус угла нагрузки	-	$\cos \varphi_H$	0.956
Полная потребляемая мощность	кВА	S_H	40

5.2 Исследования матмодели ЛСД при питании от источника напряжения и разных конфигурациях системы возбуждения

Исследования модели производятся на примере линейного синхронного двигателя экспериментального линейного стенда, технические характеристики и параметры которого приведены в таблицах 5.1-5.3.

Измеренная зависимость потокосцепления $\psi(x)$ блока постоянных магнитов с катушкой путевой структуры от перемещения имеет вид, показанный на рис.5.5. При разложении данной зависимости в ряд Фурье получены коэффициенты (табл. 5.4). Так как исходная кривая достаточно гладкая, то отсутствует проявление эффекта Гиббса и синтезированная кривая отличается от измеренной кривой в пределах 1% при использовании лишь 11 гармонических составляющих. Это даёт возможность использовать для расчётов энергетических характеристик линейного двигателя только первые одиннадцать гармоник потокосцепления.

Определение энергетических характеристик на различных скоростях производится для всех конфигураций системы возбуждения ЛСДПМ на один

блок магнитов. Вначале определяются энергетические характеристики на различных скоростях для системы возбуждения ЛСДПМ с одним блоком магнитов (рис. 5.6 а).

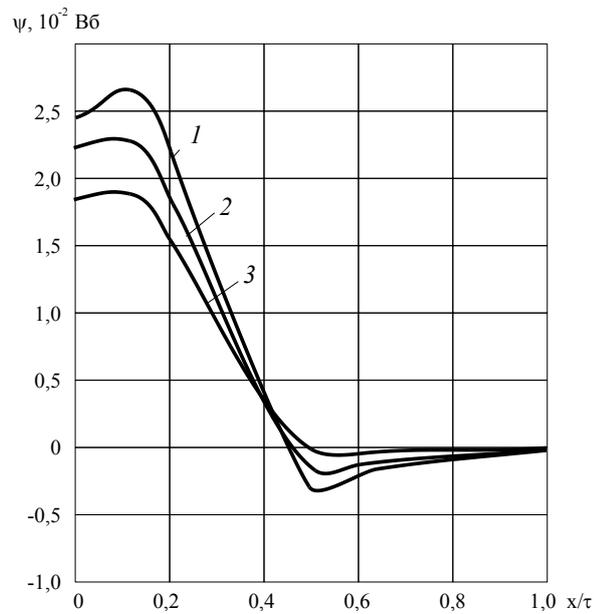
Таблица 5.4 – Коэффициенты разложения Фурье для зависимости потокосцепления ψ блока постоянных магнитов с одним витком катушки путевой структуры от перемещения для высоты 0,045м

№ гармоники	A_n (косинусный к-т)	B_n (синусный к-т)
0	0,01031	—
1	0,00932	—
2	0,00534	—
3	0,00083	—
4	- 0,00087	—
5	- 0,00053	—
6	0,0	—
7	- 0,00002	—
8	- 0,00019	—
9	- 0,00013	—
10	- 0,00001	—
11	0,00002	—

Для данной конфигурации расчёт не отличается от базовой модели. При определении э.д.с. двигателя по (3.5) получены следующие значения действующих значений гармоник (табл. 5.5)

Для упрощения расчёта, учитывая численный характер решения системы дифференциальных уравнений, и для предотвращения проявлений эффекта Гиббса задавать прямоугольное знакопеременное напряжение можно при помощи функции Хевисайда (рис. 5.7).

В результате численного решения системы уравнений баланса напряжений (3.5) получены следующие значения токов (рис. 5.8):



1 – $z = 20$ мм; 2 – $z = 30$ мм; 3 – $z = 45$ мм;

Рисунок 5.5 – Распределение поля блоков магнитов в продольном направлении при $y = 0$

Таблица 5.5 – Действующие значения гармоник э.д.с. для различных скоростей движения

№ гармо-ники	E_n				
	$V=1$ м/с	$V=3$ м/с	$V=5$ м/с	$V=7$ м/с	$V=9$ м/с
1	1,325	3,975	6,625	9,275	11,925
2	1,518	4,555	7,592	10,629	13,666
3	0,354	1,062	1,770	2,478	3,186
4	-0,495	-1,484	-2,474	-3,463	-4,453
5	-0,377	-1,130	-1,884	-2,637	-3,391
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	-0,020	-0,060	-0,100	-0,139	-0,179
8	-0,216	-0,648	-1,081	-1,513	-1,945
9	-0,166	-0,499	-0,832	-1,164	-1,497
10	-0,014	-0,043	-0,071	-0,100	-0,128

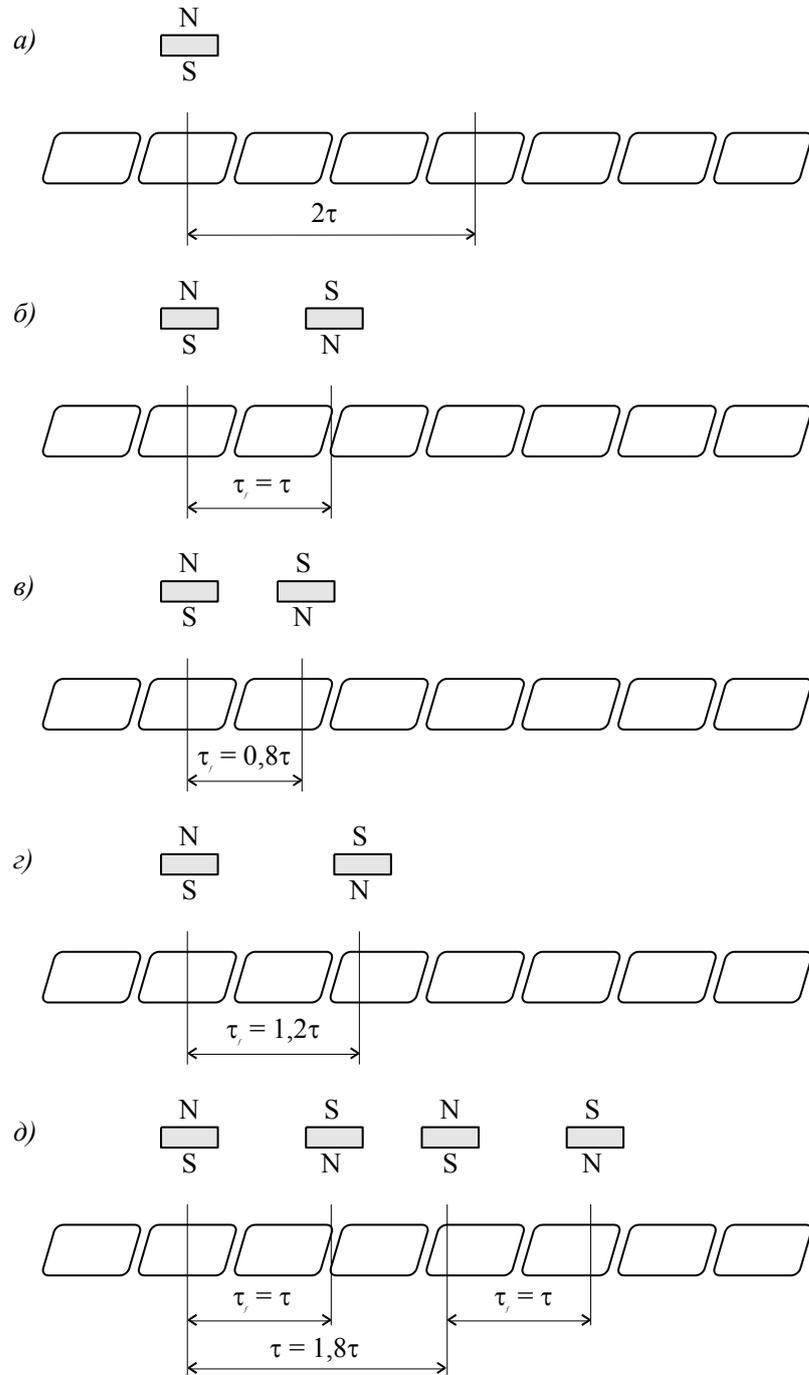


Рисунок 5.6 – Конфигурации систем возбуждения ЛСДПМ

На рис. 5.8 и далее f_1, f_2, f_3 – мгновенные усилия, действующие на систему возбуждения от разных фаз, f_T – мгновенное суммарное усилие.

Относительно малые отличия формы токов от формы напряжений объясняются крайне малыми значениями постоянной времени.

С учётом работы ЛСД в вентильном режиме, т.е. при подаче питания на обмотки путевой структуры в зависимости от положения системы

возбуждения соотношение между фазными токами и э.д.с. имеют вид, приведенный на рис. 5.9.

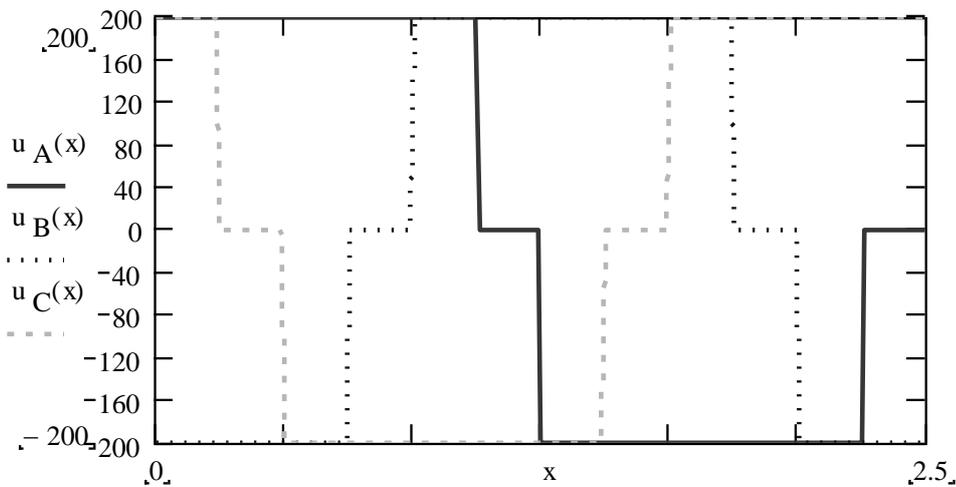


Рисунок 5.7 — Зависимость напряжения, подаваемого на зажимы обмоток путевой структуры от перемещения транспортного средства

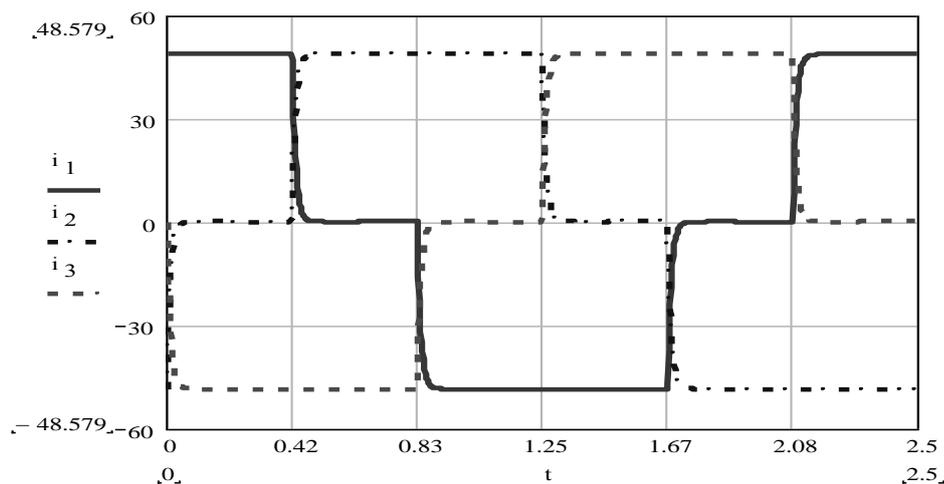


Рисунок 5.8 — Зависимость фазных токов обмотки путевой структуры от перемещения транспортного средства

С учётом приведенных выше соотношений, значения сил, действующих на систему возбуждения от каждой фазы и суммарная сила приведены на рисунке 5.10.

Как видно из рисунка, результирующая сила, хоть и не уменьшается до нуля, но является крайне неравномерной. Размах колебаний результирующей силы ($-17,5$ Н; $+23,0$ Н) превышает среднее значение силы ($30,2$ Н), а минимальное значение силы ($12,7$ Н) вообще сравнимо с силой трения, что

делает невозможным применение данной конфигурации. Причём основной вклад в несинусоидальность э.д.с. и размах усилий вносит 2-я гармоника потокосцепления (табл. 5.4, 5.5).

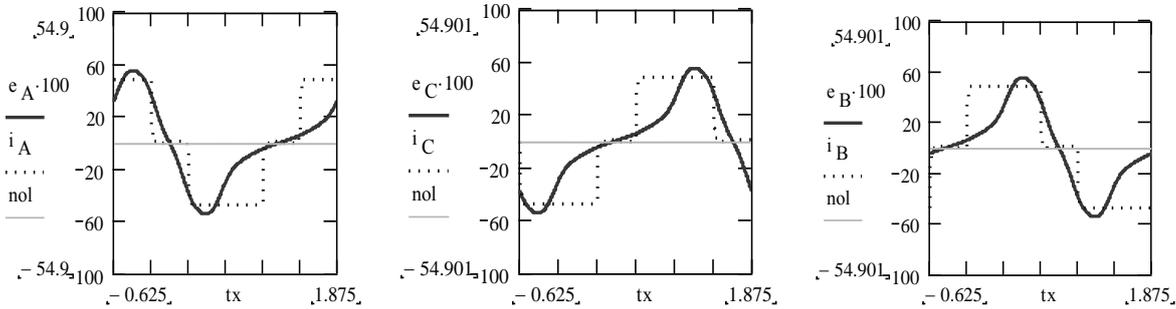


Рисунок 5.9 — Соотношение между фазными токами и э.д.с. в зависимости от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6а.

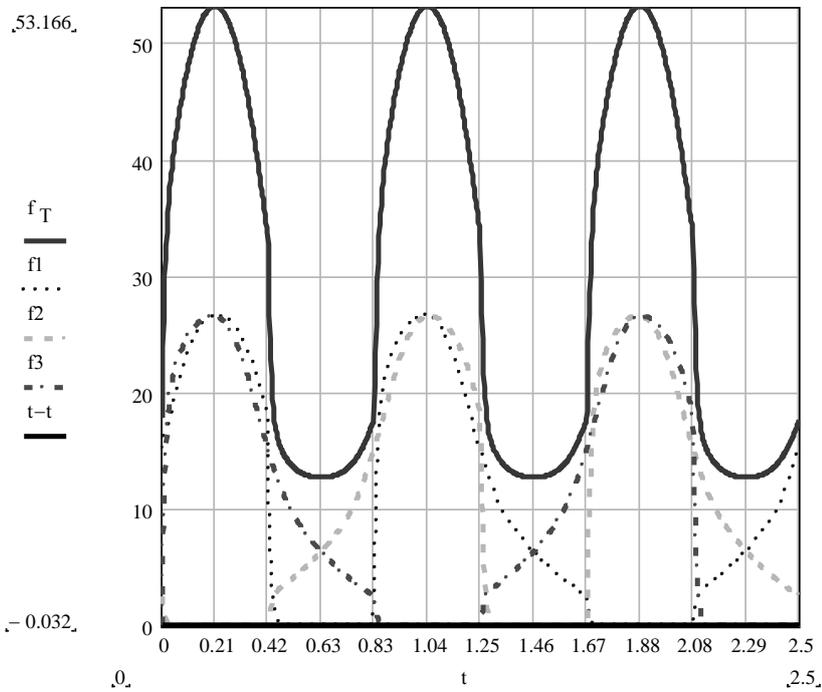


Рисунок 5.10 — Зависимость сил, действующих на систему возбуждения от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6а.

С целью подавления чётных гармоник потокосцепления добавляется ещё один блок магнитов противоположной полярности, смещённый относительно первого на величину полюсного деления τ (рис. 5.6 б).

В этом случае применим принцип суперпозиции в силу того, что в конструкции путевой структуры отсутствует магнитопровод, а блоки магнитов находятся за пределами области влияния друг на друга.

Учитывая вышесказанное э.д.с., наводимые в фазных обмотках, записываются:

$$\begin{aligned}
 e_A &= -d\psi_{Af} / dt = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}E_n \begin{bmatrix} \cos\left(n\frac{\pi}{\tau}x - \frac{\pi}{2}\right) - \\ -\cos\left(n\frac{\pi}{\tau}x - \frac{\pi}{2} - \tau\right) \end{bmatrix}; \\
 e_B &= -d\psi_{Bf} / dt = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}E_n \begin{bmatrix} \cos\left(n\frac{\pi}{\tau}x - n\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) - \\ -\cos\left(n\frac{\pi}{\tau}x - n\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \tau\right) \end{bmatrix}, \\
 e_C &= -d\psi_{Cf} / dt = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}E_n \begin{bmatrix} \cos\left(n\frac{\pi}{\tau}x + n\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) - \\ -\cos\left(n\frac{\pi}{\tau}x + n\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \tau\right) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Соответственно, соотношение между фазными токами и э.д.с. в зависимости от перемещения транспортного средства имеют вид (рис. 5.11).

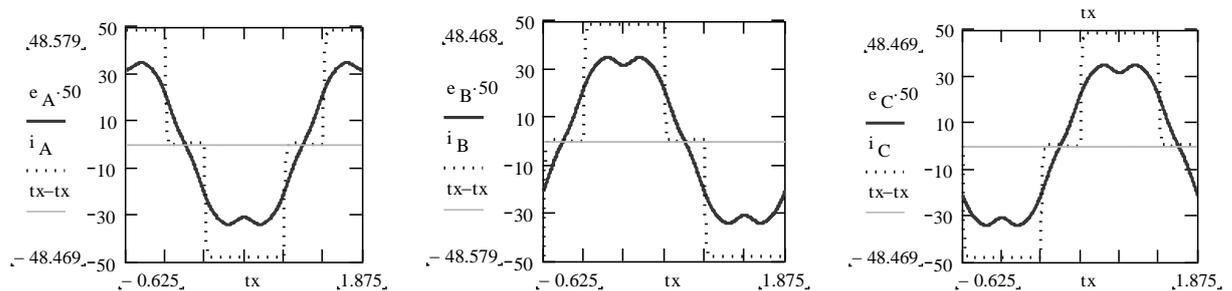


Рисунок 5.11 — Соотношение между фазными токами и э.д.с. в зависимости от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6б.

Соответственно, силы, действующие на систему возбуждения, имеют вид (рис 5.12).

Как видно из рис. 5.12, результирующая сила является более равномерной. Размах колебаний результирующей силы (-4,7 Н; +2,7 Н) намного меньше среднего значения силы (30,2 Н), а минимальное значение силы (25,5 Н) в два раза больше минимальной силы в первой конфигурации, что делает возможным применение данной конфигурации. Основной вклад в пульсацию силы, с учётом того, что все чётные гармоники исключаются по условиям

конфигурации, а все кратные 3-м из-за конструкции обмотки путевой структуры, вносит 5-я гармоника потокосцепления (табл. 5.4, 5.5).

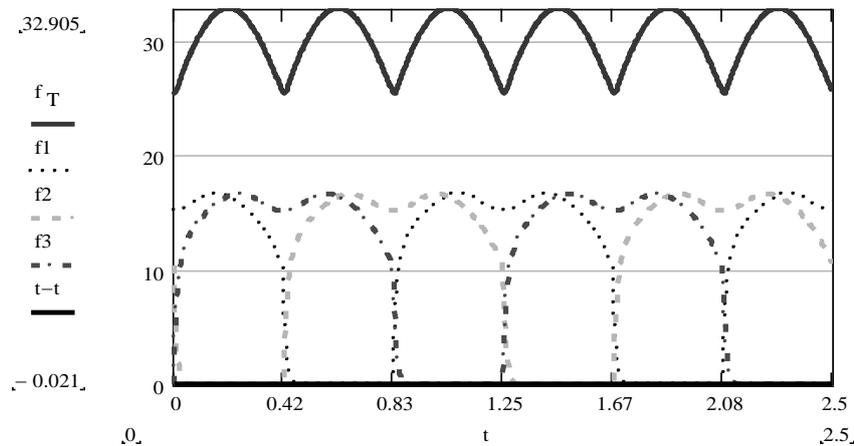


Рисунок 5.12 — Зависимость сил, действующих на систему возбуждения от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6б.

С целью подавления пятой гармоники потокосцепления один из блоков магнитов смещается относительно другого на расстояние отличающееся от полюсного деления на одну пятую τ (рис. 5.6 в,г).

Учитывая вышесказанное э.д.с., наводимые в фазных обмотках, записываются:

$$\begin{aligned}
 e_A &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \left[\begin{array}{l} \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2}\right) - \\ - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2} - \tau(1 \pm 0.2)\right) \end{array} \right]; \\
 e_B &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \left[\begin{array}{l} \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) - \\ - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \tau(1 \pm 0.2)\right) \end{array} \right], \\
 e_C &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \left[\begin{array}{l} \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) - \\ - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} - \tau(1 \pm 0.2)\right) \end{array} \right]
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Соответственно, соотношение между фазными токами и э.д.с. в зависимости от перемещения транспортного средства имеют вид (рис. 5.13),

причём при изменении смещения от $-0,2\tau$ до $+0,2\tau$ и соответствующем изменении угла между напряжением и э.д.с. картина соотношений просто сдвигается на $0,4\tau$.

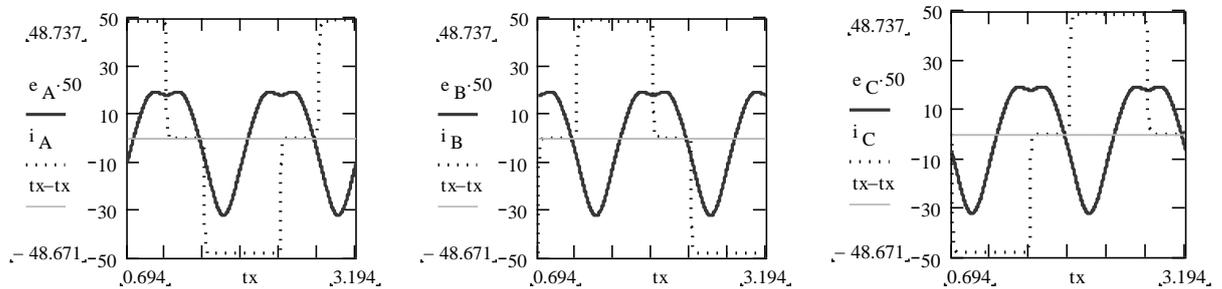


Рисунок 5.13 — Соотношение между фазными токами и э.д.с. в зависимости от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6в,г

Соответственно, силы, действующие на систему возбуждения, имеют вид (рис. 5.14), причём при изменении смещения от $-0,2\tau$ до $+0,2\tau$ и соответствующем изменении угла между напряжением и э.д.с. картина сил не изменяется.

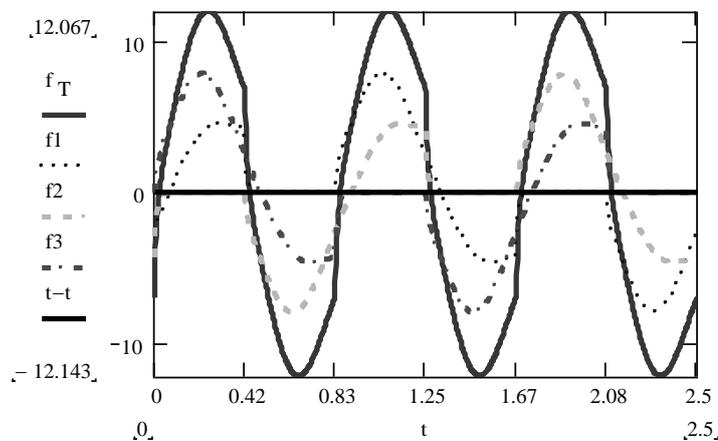


Рисунок 5.14 — Зависимость сил, действующих на систему возбуждения от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6в,г

Как видно из рис. 5.14, данная конфигурация неприменима в принципе, т.к. смещение резкий рост 2-й гармонической составляющей не только свёл на нет все преимущества от подавления 5-й гармоники, но и сделал систему неработоспособной. Для подавления пятой гармоники потокосцепления необходимо пробовать другой путь. Так, например, две пары разнонаправленных блоков магнитов, расположены на расстоянии $\tau_f = \tau$ между

собой, причём однонаправленные блоки магнитов смещены относительно $2\tau_f=2\tau$ на $\sigma_f=0,2\tau$ (рис. 5.6 д).

Учитывая вышесказанное э.д.с., наводимые в фазных обмотках, записываются:

$$\begin{aligned}
 e_A &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \left[\cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2} + \tau\right) + \right. \\
 &\quad \left. + \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2} + \sigma_f\right) - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2} + \tau + \sigma_f\right) \right] \\
 e_B &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \left[\cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) - \right. \\
 &\quad - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} + \tau\right) + \\
 &\quad + \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} + \sigma_f\right) - \\
 &\quad \left. - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x - n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} + \tau + \sigma_f\right) \right], \\
 e_C &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} E_n \left[\cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) - \right. \\
 &\quad - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} + \tau\right) + \\
 &\quad + \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} + \sigma_f\right) - \\
 &\quad \left. - \cos\left(n \frac{\pi}{\tau} x + n \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} + \tau + \sigma_f\right) \right]
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Соответственно, соотношение между фазными токами и э.д.с. в зависимости от перемещения транспортного средства имеют вид (рис. 5.15).

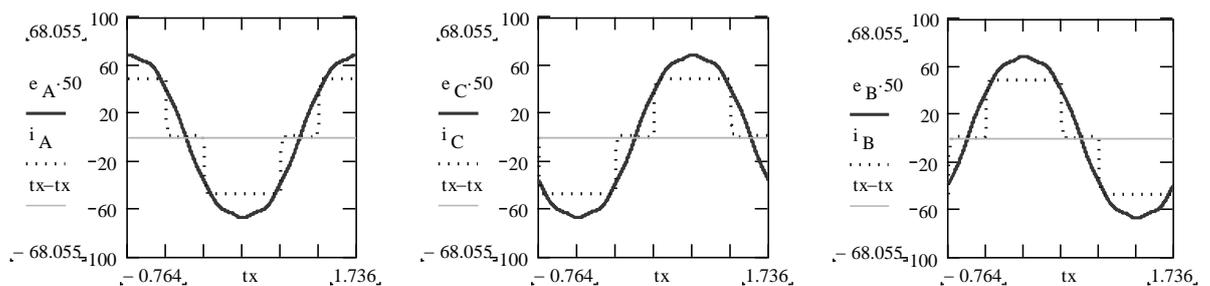


Рисунок 5.15 — Соотношение между фазными токами и э.д.с. в зависимости от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6д

Соответственно, силы, действующие на систему возбуждения, имеют вид (рис. 5.16), причём при изменении смещения от $-0,2\tau$ до $+0,2\tau$ и соответствующем изменении угла между напряжением и э.д.с. картина сил не изменяется.

Как видно из рис. 5.16, результирующая сила является достаточно равномерной. Размах колебаний результирующей силы ($-3,0$ Н; $+1,5$ Н) намного меньше среднего значения силы ($28,2$ Н). При небольшом уменьшении средней силы по сравнению с конфигурацией без подавления 5-й гармоники (с $30,2$ Н до $28,2$ Н) пульсации уменьшились в полтора раза.

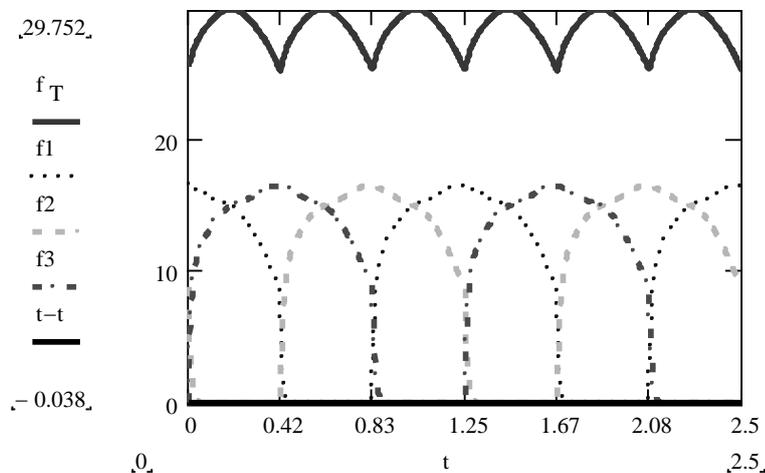


Рисунок 5.16 — Зависимость сил, действующих на систему возбуждения от перемещения транспортного средства для конфигурации рис. 5.6д

5.3 Анализ исследования матмодели ЛСД при питании от источника напряжения

С помощью разработанной математической модели проведено исследование поведения ЛСДПМ при питании обмоток путевой структуры трёхфазным прямоугольным напряжением для следующих конфигураций системы возбуждения:

- с одним блоком магнитов (рис. 5.6 а);
- с двумя разнонаправленными блоками магнитов, расположенными на расстоянии $\tau_f = \tau$ (рис. 5.6 б);

- с двумя разнонаправленными блоками магнитов, расположенными на расстоянии $\tau_f=0,8\tau$ (рис. 5.6 в);
- с двумя разнонаправленными блоками магнитов, расположенными на расстоянии $\tau_f=1,2\tau$ (рис. 5.6 г);
- с двумя парами разнонаправленных блоков магнитов, расположенными на расстоянии $\tau_f=\tau$ между собой, причём однонаправленные блоки магнитов перемещены относительно $2\tau_f=2\tau$ на $\sigma_f=0,2\tau$ (рис. 5.6 д).

В результате исследований определено следующее:

- несмотря на то, что зависимость потокосцепления блока магнитов с путевой катушкой от перемещения резко несинусоидальна, изменением конфигурации системы возбуждения можно получить э.д.с. практически синусоидальной формы;
- использование конфигураций с неподавленными чётными гармониками (рис. 5.6 а,в,г) нецелесообразно;
- при подавленных чётных гармониках подавление пятой и более высоких гармоник малоэффективно;
- для уменьшения пульсаций силы необходимо либо приблизить форму э.д.с. к прямоугольнику, либо изменить форму тока;
- для подтверждения полученных результатов целесообразно произвести сравнение расчётных и экспериментальных результатов.

5.4 Метод измерения тягового усилия

Для оценки качества математической модели можно выполнить сравнение расчетного и измеренного тягового усилия. В литературе не описаны, методы измерения знакопеременных тяговых усилий вдоль оси перемещения при отсутствии механической связи между транспортным средством и эстакадой в направлении перемещения, поэтому нами было предложено следующее техническое решение [6,98].

Измерения производились косвенным методом, в связи с тем, что напрямую мгновенные динамические усилия, действующие на транспортное

средство, измерить не представлялось возможным. Фактически измерялись усилия, действующие на транспортное средство при смещении его вдоль путевой структуры в условиях зафиксированных мгновенных распределений токов в фазах путевой структуры и, соответственно, при фиксированных распределениях магнитного поля вдоль путевой структуры. Для моделирования мгновенных значений токов в фазах использовался постоянный ток. Система измерения тягового усилия приведена на рис. 5.17.

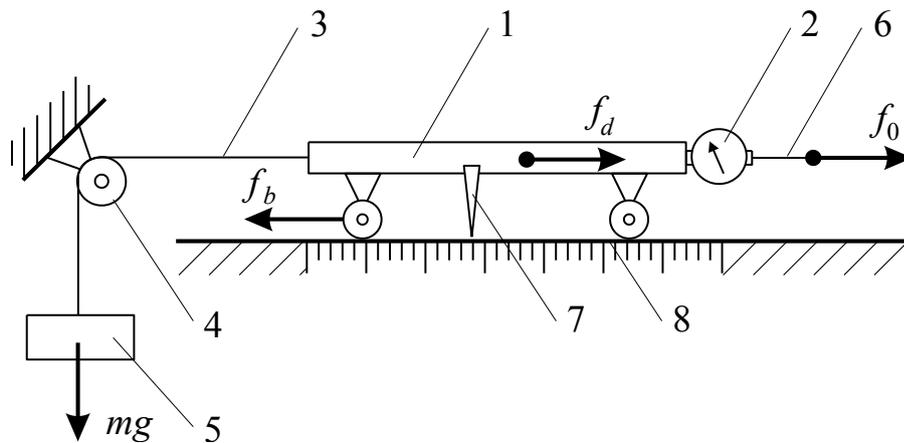


Рисунок 5.17 – Система измерения тягового усилия

К транспортному средству 1 прикреплен динамометр 2, с противоположной от динамометра стороны при помощи гибкого троса 3, перекинутого через блок 4, прикреплен груз 5 по весу превышавший максимальный размах колебаний тягового усилия. Измеряемое усилие смещения транспортного средства прикладывалось к динамометру при помощи гибкого троса 6. При помощи указателя 7 и шкалы 8, жёстко закреплённых на транспортном средстве и путевой структуре соответственно, фиксировались относительные смещения последних.

Измерения проводились следующим образом. К тросу 6 прикладывалось достаточное для равномерного перемещения транспортного средства внешнее усилие f_0 , которое равно

$$f_0 = f_d \pm f_b + mg, \quad (5.4)$$

где f_d – тяговое усилие ЛСД; f_b – суммарная сила трения; mg – вес груза 5.

При подходе указателя 7 к точке измерения внешнего усилия f_0 на шкале 8 снимались показания динамометра 1. Шаг смещения транспортного средства при измерении усилия смещения сравним с изменением длины динамометра в связи с его упругой деформацией, но на точность измерений это влияния не оказывало, так как фиксировались перемещения самого транспортного средства.

В целях исключения влияния сил трения на измеряемую величину при выполнении эксперимента строго соблюдались следующие условия:

- Измерения проводились при медленном монотонном перемещении ТС в прямом и обратном направлении.
- Непосредственно перед проведением текущего измерения определяется зависимость усилия $f_0^{xx} = \pm f_b + mg$ от смещения при отсутствии тока в катушках путевой структуры (холостого хода).
- Во время проведения измерений исключались резкие колебания внешних условий.

После снятия зависимости усилий от смещения при различных распределениях токов в фазах путевой обмотки производилось исключение постоянной составляющей и сил трения путём вычитания из кривой силы под током кривой холостого хода соответствующего направления

$$f_d = f_0 - f_0^{xx}, \quad (5.5)$$

Полученные для разных направлений результаты усреднялись (рис. 5.18).

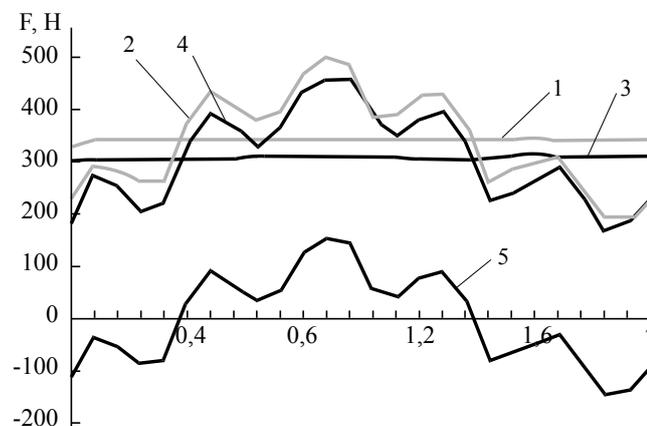


Рисунок 5.18 – Зависимость измеренных величин усилия смещения при согласном и встречном приложении силы трения и веса груза

Для оценки колебаний тягового усилия применяется коэффициент пульсаций, который определяется по формуле

$$K_n = \frac{f_{d_{\max}} - f_{d_{\min}}}{2F_d} \cdot 100\%, \quad (5.6)$$

где F_d – среднее тяговое усилие.

Величина среднего тягового усилия определяется соотношениями (3.28, 3.29).

5.5 Экспериментальное исследование тяговых характеристик ЛСТЭП линейного стенда

Для линейного синхронного тягового электропривода (ЛСТЭП) линейного стенда были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых получены зависимости величины тягового усилия f_x от перемещения ТС вдоль путевого полотна при запитке катушек различных фаз ЛСД. В процессе проведения экспериментов фазы преобразователя коммутировались так, чтобы ток протекал через катушки двух фазных обмоток ЛСД. При синусоидальном токе выражение для фазных токов имеет вид:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cos(\omega t) \\ i_B &= I_m \cos(\omega t + 120^\circ), \\ i_C &= I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \end{aligned} \quad (5.7)$$

В общем случае тяговое усилие линейного двигателя можно рассчитать по формуле:

$$\begin{aligned} f_x &= -\sum_n n \frac{\pi}{\tau} \psi_n \left[\begin{aligned} &i_a \sin n \frac{\pi}{\tau} x + i_b \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ &+ i_c \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right] = \\ &= -I_f \sum_n n \frac{\pi}{\tau} A_n \left[\begin{aligned} &i_a \sin n \frac{\pi}{\tau} x + i_b \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ &+ i_c \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right], \end{aligned} \quad (5.8)$$

При проведении испытаний переменные токи для фиксированного значения времени t моделировались постоянным током I_n . В этом случае, приняв $\omega t = \frac{\pi}{6}$, имеем:

$$i_A = I_n = I_m \frac{\sqrt{3}}{2} ; i_B = -I_n = -I_m \frac{\sqrt{3}}{2} ; i_C = 0., \quad (5.9)$$

При изменении местоположения ТС с полюсами возбуждения относительно фиксированной путевой обмотки двигателя на участке 2τ будет изменяться магнитный угол нагрузки в пределах $0 \leq \theta_m \leq 360^\circ$ и величина тягового усилия. Учитывая (5.6) расчетное значение тягового усилия определялось соотношением:

$$\begin{aligned} f_x &= -\sum_n n \frac{\pi}{\tau} \psi_n \left[i_a \sin n \frac{\pi}{\tau} x + i_b \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3} \right) \right] = \\ &= -I_f \sum_n n \frac{\pi}{\tau} A_n \left[i_a \sin n \frac{\pi}{\tau} x + i_b \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Поскольку полюса возбуждения были выполнены со значительным укорочением продольных размеров ($2b_f = 0.344\tau$), то при расстоянии между осями магнитов равным 4τ наблюдается три зоны с нулевыми значениями тягового усилия на двойном полюсном делении. При этом наибольшее влияние на форму кривой тягового усилия оказывает вторая гармоника потокосцепления. С целью улучшения тяговых характеристик расстояние между полюсами возбуждения выбрано равным 3τ с одновременной переориентацией пары полюсов. При этом происходит подавление четных гармоник в кривой тягового усилия. В этом случае в создании тягового усилия, рассчитываемого по (5.10), участвуют только гармоники взаимной индуктивности порядков $\nu = 1, 5, 7, 11, 13...$

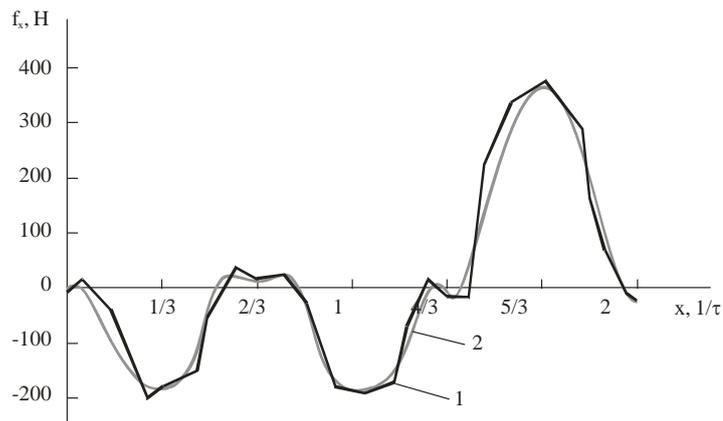
В ходе эксперимента нагрев катушек путевой структуры сопровождался снижением выходного тока преобразователя напряжения, поэтому был

произведен перерасчет тяговых усилий к единому значению тока. Расчетные и экспериментальные значения тягового усилия приведены на рис. 5.19.

Экспериментальные и расчетные кривые тягового усилия имеют хорошее качественное и количественное совпадение. В кривых тяговых усилий четко просматриваются шестые гармоники сил, обусловленные взаимодействием гармоники тока $n = 1$ с гармониками взаимной индуктивности $\nu = 5, 7$.

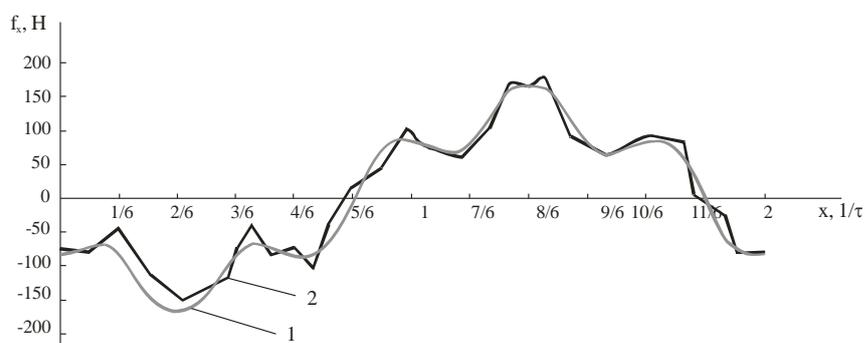
В режиме вентильного двигателя и движении с постоянной скоростью тяговое усилие определяется моментом переключения питания фазных обмоток. Переключение определяется сигналами датчика положения ТС относительно путевой обмотки, то есть заданием угла в момент переключения. На рис. 5.20 представлено мгновенное значение расчетного тягового усилия, построенного для моментов коммутации питания, соответствующих $\theta_m = 120^\circ$.

Среднее значение расчетного тягового усилия составляет $F_x = 87$ Н, минимальное значение усилия составит $f_{x_{\min}} = 25$ Н, а максимальное $f_{x_{\max}} = 134$ Н, коэффициент пульсаций $k_p = 62\%$. Несмотря на столь высокий уровень пульсаций ТС в вентильном режиме за счет инерционности перемещается достаточно равномерно.



- 1 – экспериментальная кривая
- 2 – расчётная кривая

Рисунок 5.19 - Зависимость тягового усилия от смещения при шаге системы возбуждения $\tau_f = 4\tau$



1 – расчётная кривая

2 – экспериментальная кривая

Рисунок 5.20 - Зависимость тягового усилия от смещения при шаге системы возбуждения $\tau_f = 3\tau$

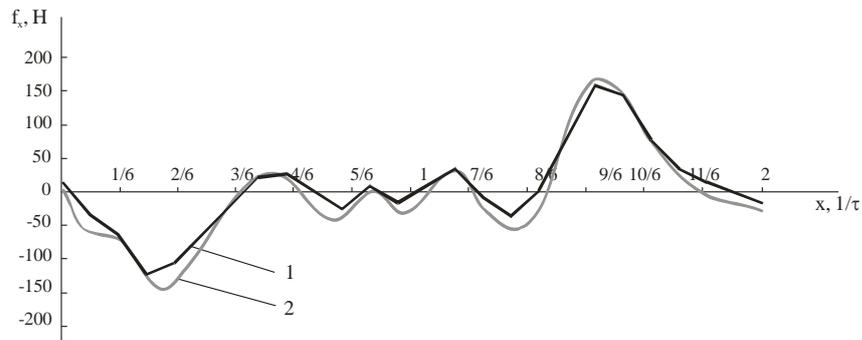
Таким образом, использование ЛСТЭП с системой возбуждения на постоянных магнитах позволяет в полной мере производить экспериментальные исследования и осуществлять моделирование ЛСТЭП при значительной экономии средств.

5.6 Исследование влияния конструкции двигателя на электромеханические параметры линейного синхронного электродвигателя

Для сглаживания пульсаций тягового усилия необходимо подавить пятую и седьмую гармоники потокосцепления, так как более высокие гармоники существенного влияния на форму кривой усилия не оказывают.

Для подавления высших гармоник в электрических машинах применяются различные методы, среди которых изменение длины полюсов, укорочение шага обмотки и т.д.

В случае линейного двигателя с двумя парами полюсов относительное укорочение шага путевой обмотки (увеличение шага обмотки возбуждения) приводит не столько к подавлению высших нечётных гармоник, сколько к росту чётных, в частности второй (рис. 5.21). Следовательно, данный путь в наших условиях не подходит.

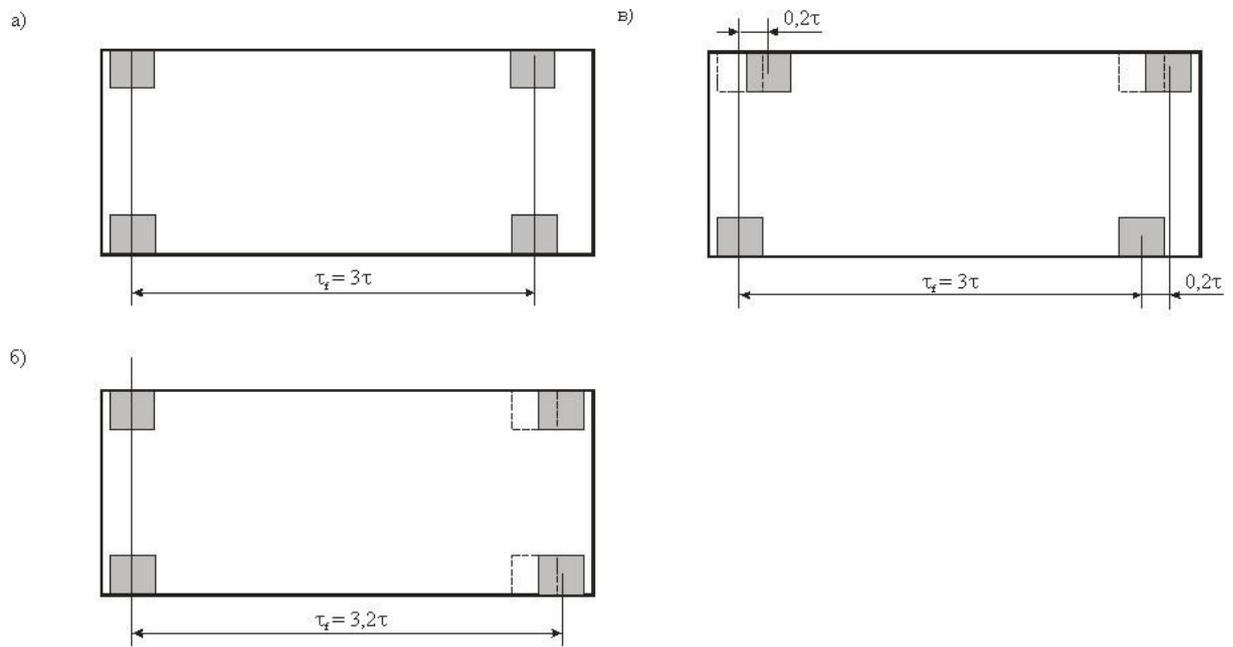


1 – экспериментальная кривая

2 – расчётная кривая

Рисунок 5.21 - Зависимость тягового усилия от смещения при шаге системы возбуждения $\tau_f = 3,2\tau$

В связи с невозможностью прямого удлинения полюсов вследствие отсутствия высококоэрцитивных постоянных магнитов, нами был предложен способ косвенного увеличения длины полюсов возбуждения. Данный способ заключается в сдвиге одной пары полюсов возбуждения относительно другой на $0,2\tau$, причём внутри пары расстояние между полюсами остаётся неизменным (рис. 5.22).



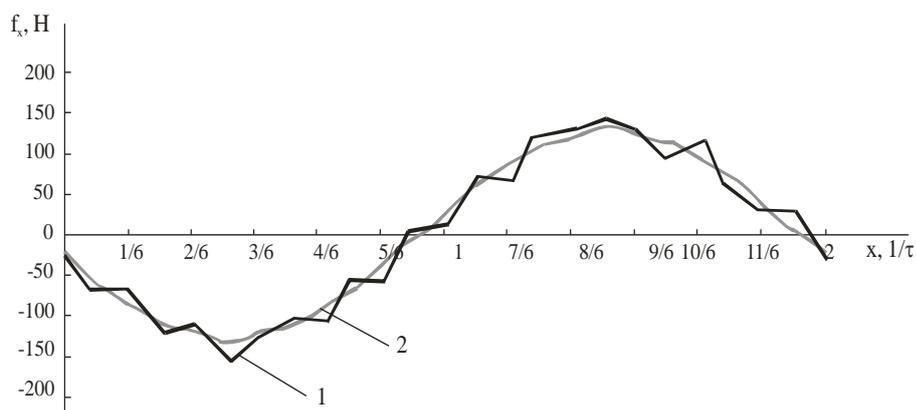
а) чередующиеся полюса $\tau_f = 3\tau$;

б) смещение τ_f на $0,2\tau$;

в) сдвиг пары полюсов на $0,2\tau$

Рисунок 5.22 – Модернизация экспериментальной тележки

Зависимость тягового усилия от смещения (рис.5.23) в данном случае имеет практически синусоидальный характер. Причём экспериментальная (1) и теоретическая (2) кривые практически не отличаются друг от друга. Существующие отличия легко объяснимы погрешностью измерений и неравномерностью зазоров между полюсами возбуждения и катушками путевой структуры.



1 – экспериментальная кривая

2 – расчётная кривая

Рисунок 5.23 - Зависимость тягового усилия от смещения при шаге системы возбуждения $\tau_f = 3\tau$ и сдвиге полюсов на $0,2\tau$

ВЫВОДЫ

1. Несмотря на то, что зависимость потокосцепления блока магнитов с путевой катушкой от перемещения резко несинусоидальна, изменением конфигурации системы возбуждения можно получить э.д.с. практически синусоидальной формы.
2. Использование конфигураций системы возбуждения с неподавленными чётными гармониками (рис. 5.6 а,в,г) нецелесообразно.
3. При подавленных чётных гармониках подавление пятой и более высоких гармоник дает снижение не только пульсаций, но и величины тягового усилия.
4. Предложенный метод измерения знакопеременного усилия, возникающего в линейном двигателе при взаимодействии системы возбуждения экипажа и катушек путевой структуры, позволяет сравнить

измеренные силы с расчетными с погрешностью измерительной системы (5%).

5. Отличие измеренных зависимостей тягового усилия от смещения системы возбуждения от расчетных составляет не более 8%.
6. Сравнение расчетных зависимостей тягового усилия от смещения системы возбуждения с измеренными при различных конфигурациях системы возбуждения показало адекватность математической модели линейного синхронного двигателя с возбуждением от источника постоянного тока высокоскоростного электротранспорта, принятых допущений, а также методов расчета тягового усилия.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что обоснованы эффективные принципы и методы расчета рациональных параметров тягового линейного электродвигателя с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного электротранспорта, то есть созданы основы для разработки практически применимого в инженерной практике метода расчета линейного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, а именно:

1. Разработана математическая модель линейного синхронного двигателя без ферромагнитного магнитопровода с возбуждением от постоянных магнитов высокоскоростного электротранспорта. В данной модели в качестве базового показателя взаимодействия используется зависимость потокосцепления источника магнитного поля возбуждения с катушкой путевой структуры от их взаимного расположения.

2. Разработан расчетно-экспериментальный метод определения зависимости потокосцепления источника магнитного поля возбуждения с катушкой путевой структуры от их взаимного расположения. Этот способ заключается в экспериментальном определении распределения индукции магнитного поля возбуждения в плоскости среднего витка путевой катушки с последующим интегрированием по ее площади. Что позволяет, при изменении границ интегрирования, легко определять магнитный поток (а соответственно и потокосцепление) через катушку любой формы и различного расположения на плоскости измерения. Например, рабочий зазор между заданными блоком магнитов и катушкой должен быть 25 мм.

3. Разработан и изготовлен стенд для экспериментального определения распределения индукции поля постоянного магнита возбуждения в плоскости среднего витка путевой катушки при различном расположении такой плоскости, что позволило получить зависимости, в том числе аналитические, потокосцепления источника постоянного магнитного

поля с катушкой путевой структуры от их взаимного расположения для различных конструктивных параметров линейного двигателя (длина и ширина катушки, рабочий зазор, полюсное деление и конфигурация системы возбуждения), что позволило разработать рекомендации для рационализации геометрических размеров и взаимного расположения катушек путевой структуры, а также конфигурации системы возбуждения, расположенной на экипажи с точки зрения величины и качества тягового усилия.

4. Разработан метод расчета тягового усилия, возникающего в линейном синхронном двигателе при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Данный метод, основанный на предложенной модели линейного двигателя, дает возможность определить зависимость величины тягового усилия от места расположения транспортного средства относительно путевой структуры. Тяговое усилие можно определить в широком диапазоне значений геометрических параметров конструкции двигателя, что позволяет на этапе проектирования варьировать геометрические параметры двигателя для достижения нужного качества тягового усилия.

5. Разработан метод измерения знакопеременного тягового усилия, возникающего при взаимодействии поля постоянного магнита системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Данный метод заключается в подаче на систему измерения дополнительной постоянной нагрузки, которая заведомо превышает отрицательное значение тягового усилия, с последующей его фильтрацией. При соблюдении определенных условий измерения такой метод обеспечивает точность измерений, которая определяется фактически точностью измерительной системы (5%), что дает возможность точного определения качества тягового усилия.

6. Доказана адекватность математической модели линейного синхронного двигателя высокоскоростного электротранспорта и принятых

допущений, а также применимость метода расчета тягового усилия, возникающего в нем при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Данное доказательство построено на сравнении расчетных и экспериментально полученных значений величины тягового усилия для различных конструкций линейного синхронного двигателя без ферромагнитного магнитопровода с возбуждением от постоянных магнитов экипажа. Отклонение не превышает 8%.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. В.Ф. Новиков, А.С. Ворошилов, В.И. Матин. Усилия в линейном синхронном двигателе испытательного участка// Транспорт: Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університета залізничного транспорту – Вип.9 – Дніпропетровськ, 2001. – 184 с.
2. Новиков В.Ф., Бурылов С.В., Воскобойник В.Э., Дзензерский В.А. Расчётно-экспериментальный метод определения потокосцепления// Транспорт: Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університета залізничного транспорту – Вип.5 – Дніпропетровськ, 2004. – 240 с.
3. Новіков В.Ф., Бурилов С.В., Воскобойник В.Е., Дзензерський В.О. Математична модель силової установки для високошвидкісного транспортного засобу. – Вісник Академії митної служби України, №2. –С.53-59.
4. Новіков В.Ф., Бурилов С.В., Воскобойник В.Е., Дзензерський В.О.- Дослідження магнітного поля блока постійних магнітів. .- Вісник Академії митної служби України. №1.-с.79-81.
5. В. А. Дзензерский, В. Ф.Новиков, С. В. Бурылов, В. Э. Воскобойник, / Исследование зависимости потокосцепления блока постоянных магнитов с катушкой от длины последней // Транспорт: Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університета залізничного транспорту – Вип.10 – Дніпропетровськ, 2006.
6. В.Ф. Новиков, А.С. Ворошилов, А.Н. Зайцев, С.В. Комаров Метод измерения тягового усилия линейного синхронного электродвигателя// Транспорт: Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університета залізничного транспорту – Вип.10 – Дніпропетровськ, 2002. – 126с.

7. Новиков В.Ф. Подтверждение адекватности математической модели линейного синхронного двигателя / В.Ф. Новиков // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту – Дніпропетровськ. – 2015. - № 3 (57). – с.88-96
8. Поезд на реактивной тяге // Форум Технических Маньяков URL: <http://forum.amadeus-project.com/index.php?showtopic=2610> (дата обращения: 21/05/2013).
9. Дёмин Ю.В., Лазарян В.А., Коротенко М.Л., Осадчий Г.Ф. Об устойчивости движения скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой / Вестник ВНИИЖТ, №3, 1973
10. Осипов С.И., Миронов К.А., Ревич В.И. Основы локомотивной тяги. М. Транспорт, 1979. 440 с.
11. Fastech 360 // Википедия URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Fastech_360 (дата обращения: 21/05/2013).
12. Тормозное оборудование скоростного подвижного состава // Железнодорожные вагоны URL: http://www.vagoni-jd.ru/razdel_07.7%20tormoznoe%20oborydovanie%20sps.php (дата обращения: 21/05/2013).
13. US Pat. No. 782312, patented Feb. 14, 1905. A. Zehden. Electric traction apparatus. application filed June 21, 1902.
14. US Pat. No. 12700. reissued Oct. 1, 1907. A. Zehden. Electric traction apparatus. application filed Aug. 21, 1907.
15. US Pat. No. 859018. patented July 2, 1907. F. S, Smith. Transportation system. application filed nov. 21, 1906.
16. US Pat. No. 3158765 patented Nov. 24, 1964. GR Polgreen 3158765 Magnetic system of transportation. Application filed Aug. 25, 1959.
17. US Pat. No. 3858521 patented Jan 7, 1975. Canadian Patents and Development Limited (Ottawa, Ontario, CA) Magnetic levitation guidance system. Application filed march 26, 1973.

18. Магнитоплан профессора Вейнберга // Томские изобретения URL: <http://idea1.westsib.ru/idea> (дата обращения: 31.05.2013).
19. Вейнберг Б.П. Движение без трения. Бесвоздушный электрический путь. СПб: Естествоиспытатель, 1914.
20. Chevailler Samuel Comparative study and selection criteria of linear motors: dissertation doctor of science, technical - Suisse, EPFL, 2006.
21. Laboratory working on train to run at 1,000kph // ShanghaiDaily.com URL: http://www.shanghaidaily.com/sp/article/2010/201008/20100803/article_445162.htm (дата обращения: 31.05.2013).
22. Фришман Е.М. К определению критерия целесообразности использования магнитопроводов в системе магнитного подвеса. Днепропетровск: ДИИТ, 1983. — 9с. /Рукопись депонирована в ЦНИИ ТЭИ МПС 22 марта 1983г. №2233
23. Платонов А.Д., Фришман Е.М., Уманов М.И. и др. К определению сферы рационального использования транспортной системы с экипажами на электродинамическом подвесе. //Материалы научно-технического семинара «Проблемы создания высокоскоростного наземного транспорта на сверхпроводящих магнитах. Л., 1990. — с.75-78
24. Уманов М.И., Фришман Е.М., Лашер А.Н. Определение оптимальной грузоподъёмности экипажа транспортной системы с использованием магнитного подвеса на постоянных магнитах. //Транспорт: Наука. Техника. Управление. — 1991. — №8. — с.18-21
25. Исследование оптимальных соотношений в частотнорегулируемом тяговом линейном асинхронном двигателе: Дис. к.т.н. / Г.К. Гетьман. — Д. 1974. — 164с.
26. Соколов Б.И. Исследование подвесов левитирующего типа на постоянных магнитах. //Транспорт: Наука. Техника. Управление. — 2005. — №2. — с.42-44

- 27.Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом / В.И. Бочаров, В.А. Винокуров, В.Д. Нагорский и др.; Под общ. ред. В.И. Бочарова. — М.: Транспорт, 1985. — 279 с.
- 28.Транспорт с магнитным подвесом / Ю.А. Бахвалов, В.И. Бочаров, В.А. Винокуров и др.; Под общ. ред. В.И. Бочарова, В.Д. Нагорского. — М.: Машиностроение, 1991. — 316 с.
- 29.Основы проектирования электроподвижного состава с магнитным подвесом и линейным электроприводом / В.И. Бочаров, Ю.А. Бахвалов, И.И. Талья; Под общ. ред. В.И. Бочарова: В 2 ч. — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов, ун-та. - 1992. - Т. 1-2.
- 30.Транспорт на сверхпроводящих магнитах / В.И. Бочаров, И.В. Салли, В.А. Дзензерский. — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов, ун-та, 1988. — 152 с.
- 31.Кочетков В.М., Ким К.И., Трещев И.И. Теория электродинамической левитации. Основные результаты и дальнейшие задачи // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1981. — № 1. — С. 72—91.
- 32.Бахвалов Ю.А., Бурцев В.А. Расчет силовых взаимодействий в системе электродинамического подвеса и направления с дискретной путевой структурой // Изв. вузов. Электромеханика. — 1979. — № 11. — С. 999—1003.
- 33.Омельяненко В.И., Бочаров В.И., Набока Б.Г. и др. Метод расчета сил подъема и торможения электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой // Там же. - 1977. - № 8. - С. 865-870.
- 34.Новогренко Н.М. Системы электродинамического подвеса // Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом. — М.: Транспорт. - 1985. - С. 92-100.
- 35.Омельяненко В.И. Рабочие свойства перспективного устройства левитации // Изв. вузов. Электромеханика. — 1995. — № 1—2. — С. 33—40.

- 36.Сергеев С.А., Кожемякин СМ. О выборе размеров поездных магнитов устройств электродинамической подвески высокоскоростного наземного транспорта // Вест. Харьк. политехн, ин-та. Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий. — 1987. — 122, № 247. — С. 74—77.
- 37.Omelyanenko V.I., Sergeev S.A. Optimization of the vertical coils option of the Maglev vehicle levitation units"// Simulation and Design of Appl. Electromagnetic Systems. — Amsterdam: Elsevier. — 1994. — P. 539—542.
- 38.Klimenko E. Yu., Novikov S.I., Omelyanenko V.I. et al. Superconducting magnet for high speed ground transportation // Cryogenics. — 1990. — 30, N 1. — P. 41—45.
- 39.Матин В.И., Сохор Ю.Н., Эм А.И. Частотный пуск экипажа ВСНТ в ЛСД при питании от статических преобразователей // Изв. вузов. Электромеханика, -г 1985. - № 1. - С. 46-51.
- 40.Омельяненко В.И., Сергеев С.А. Стратегия выбора главных размеров линейного синхронного двигателя // Электронное моделирование. — 1996. — № 5. - С. 49-54.
- 41.Дзензерский В.А. Устойчивость движения левитирующего экипажа с электродинамическим подвесом // Техн. механика. — 1998. — Вып. 7. — С. 87—93.
- 42.Дзензерский В.А. Динамический расчет путевой структуры левитирующего экипажа с электродинамическим подвесом // Техн. механика. — 1998. — Вып. 8. - С. 70-75.
- 43.Дзензерский В.А, Кузнецова Т.И., Радченко Н.А. Оценка динамических характеристик экипажей с электродинамическим подвесом, имеющих различные структуры конструктивных схем // Механика транспорта: вес поезда, скорость, безопасность движения: Межвуз. сб. научн. трудов. — Днепропетровск: Днепропетр. гос. техн. ун-т железнодорож. транспорта. — 1994. — С. 43-52.

44. Дзензерский В.А., Кузнецова Т.Е., Радченко Н.А. Стабилизация левитационного движения экипажа на магнитном подвешивании // Техн. механика. — 1994. - № 3. - С. 96-100.
45. Дзензерский В.А., Радченко Н.А. Исследование колебаний и устойчивость движения вагона с электродинамическим подвесом // Прикладная механика. - 1994. - 30, № 1. - С. 76-81.
46. Dzenzersky V.A., Khatchapuridze N.M., Manashkin A.L., Radchenko N.A., Zevin A.A. Dynamical analysis of electro-dynamically suspended vehicles // Iя Inter. Conf. on Urban Transport and the Environment: Urban Transport 95. — Urban Transport and the Environment for the 21-st Cent. Ed. by: L.J. Sucharov. — Boston: Computational Mechanics Publications. Southhampton. — P. 467—474.
47. Лазарян В.А., Мацур М.А., Зинченко В.И. О математической модели рельсового экипажа, движущегося по кривой произвольного очертания // Там же. - 1974. - С. 13—20.
48. Омеляненко В.И., Сапелкин С.А, Сергеев С.А. Расчет индуктивных параметров устройств электродинамической подвески// Вест. Харьк. политехн, ин-та. Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий. — 1988. - 18, № 255. - С. 81-84.
49. Омеляненко В.И., Бочаров В.И. и др. Сверхпроводящие соленоиды для подвеса высокоскоростных наземных транспортных средств // Изв. вузов. Электромеханика. — 1977. — № 8. — С. 875—878.
50. Омеляненко В.И. Линейные двигатели постоянного тока с тиристорным коммутатором. — Харьков: Основа. — 1994. — 74 с.
51. Омеляненко В.И. Теоретические основы проектирования линейных электромеханических преобразователей энергии со сверхпроводящими обмотками возбуждения: Дис. ... док-ра техн. наук. — Киев, 1994. — 236 с.
52. Омеляненко В.И., Походенко Р.Н. Анализ пассивного экранирования переменной составляющей магнитного поля в активной зоне линейного

- електромеханического преобразователя энергии // Вест. Харьк. политехн, ин-та. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. — 1993. — 18, № 14. - С. 123-129.
- 53.Омельяненко В.И., Волчуков М.П., Омельяненко Г.В. Влияние типа линейного двигателя на эффективность электромеханического преобразования энергии при отборе ее от электромашинного агрегата с инерционным накопителем // Тр. конф. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». — Харьков: Основа, 1996. — С. 212—213.
- 54.Омельяненко Г.В. Электромеханический преобразователь энергии инерционного накопителя для сетей тягового электроснабжения: Дис. ... канд. техн. наук. — Харьков, 1999. — 169 с.
- 55.Омельяненко Г.В. Концепция электромеханического накопителя энергии с кольцевым ротором // Proc. 3rd Int. Scientific and Technical Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. — Szczecin: Technical University Press, 1997. - V. 2. - P. 355-360.
- 56.Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / [В. А. Дзензерский, В. И. Омельяненко, С. В. Васильев та ін.]/ НАН України; Інститут транспортних систем і технологій Трансмаг; Національний технічний ун-т Харківський політехнічний ін-т / Виктор Александрович Дзензерский (общ.ред.), Виктор Иванович Омельяненко (общ.ред.). — К. : Наукова думка, 2001. — 479с
- 57.Новіков В.Ф., Бурилов С.В., Воскобойник В.Е., Дзензерський В.О. Високошвидкісні транспортні системи з магнітним підвісом “MAGLEV”// Конструктори електротранспорту: Матеріали наукових читань з циклу: “Видатні конструктори України”. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут. Державний політехнічний музей. – К.: ЕКМО – 2003. – 82с. з іл.

58. Электродинамические параметры линейных синхронных двигателей для ВСНТ / В. Ф. Новиков, А. С. Ворошилов, В. В. Васильев. // Тезисы докладов IX Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта". – 1996. – С. 174.
59. Разработка экономического обоснования концепции развития магнитолевитирующего транспорта на Украине: Отчёт о НИР (итоговый)/ Институт транспортных систем и технологий (ИТСТ) НАН Украины «Трансмаг». – № гос.рег. 0194U022246 – т.8 – Днепропетровск, 1995. – 64с.
60. Bombardier Transportation. Современные транспортные решения для городской среды. Презентация для 1-го международного инвестиционного форума «Модернизация инфраструктуры российских городов: путь – 2018» Москва, 5-6 июля 2012г.
61. Гетьман Г.К., Корепанов Г.Я. и Цымбал Н.Н. Исследование работы асинхронных двигателей и статических преобразователей частоты в режиме пуска. — В кн.: «Материалы юбилейной научно-технической конференции института /ДИИТ/», Днепропетровск, 1970, с.49-50
62. Корепанов Г.Я. и Гетьман Г.К. К определению толщины реактивной шины линейного тягового двигателя (ТЛД) с плоским двусторонним индуктором. Днепропетровск: ДИИТ, 1976. — 5с., ил. /Рукопись депонирована в ЦНИИ ТЭИ МПС 17 августа 1976г. №415/76
63. Корепанов Г.Я., Гетьман Г.К. Метод определения пусковой частоты линейного асинхронного двигателя со сплошной реактивной шиной. Днепропетровск: ДИИТ, 1973. — 5с. /Рукопись депонирована в ЦНИИ ТЭИ МПС 17 августа 1976г. №415/76
64. Гетьман Г.К. О выборе пусковых частот плоских линейных асинхронных двигателей. — «Труды Днепропетровского института инженеров ж.д. транспорта», 1975. — Вып. 163, с. 33-35
65. Корепанов Г.Я. и Гетьман Г.К. Об определении полюсного деления и числа полюсов индуктора линейного двигателя. Днепропетровск:

- ДИИТ, 1976. — 9с., ил. /Рукопись депонирована в ЦНИИ ТЭИ МПС 17 августа 1976г. №415/76
66. Гетьман Г.К. Об оптимизации управляемых частотой плоских линейных асинхронных двигателей по минимуму потерь. — В кн.: «Тезисы докладов на 1-й Всесоюзной конференции по приводам с ЛАД». К., 1973. С42-43
67. Гетьман Г.К., Корепанов Г.Я. Оптимизация частотноуправляемого линейного двигателя по минимуму тяги. — В кн.: «Тезисы докладов на 1-й Всесоюзной конференции по приводам с ЛАД». К., 1973. С43-45
68. Гетьман Г.К. Оптимальные соотношения в регулируемом частотой линейном асинхронном двигателе. — «Труды Днепропетровского института инженеров ж.д. транспорта», 1975. — Вып. 163, с. 35-40
69. Разработка и исследование транспортных средств с линейными двигателями для открытых горных разработок (Расчёт асинхронных двигателей) . — Отчёт ДИИТ. Днепропетровск, 1978
70. Гетьман Г.К. Расчёт оптимальных соотношений в частотноуправляемом линейном двигателе. Днепропетровск: ДИИТ, 1973. — 7с., ил. /Рукопись депонирована в ЦНИИ ТЭИ МПС 14 июня 1973г. №63/73
71. Гетьман Г.К., Корепанов Г.Я. Расчёт характеристик частотноуправляемых линейных асинхронных двигателей. — «Труды Днепропетровского института инженеров ж.д. транспорта», 1972. — Вып. 135, с. 136-145
72. Васильева О.В., Костенко Ф.Б., Фришман Е.М. Использование магнитной опоры для уменьшения воздействия подвижного состава на путь. Днепропетровск: ДИИТ, 1988. — 8с. /Рукопись депонирована в ЦНИИ ТЭИ МПС 20 мая 1988г. №4536
73. Методика расчета основных параметров транспортной системы с конвейерными поездами / АН УССР. Ин-т геотехнической механики: Сост. Солодовник Л.М., Палей Б.З., Краснопольская В.И., Хачапуридзе Н.М. — Киев: Наук. Думка. — с.48.

74. Тяговый двигатель с возбуждением от постоянных магнитов // Железные дороги мира №09-2004 URL: <http://www.css-rzd.ru/zdm/09-2004/04075.htm> (дата обращения: 31.05.2013).
75. Непосредственный тяговый привод локомотива // Железные дороги мира №01-2004 URL: <http://www.css-rzd.ru/zdm/01-2004/02183-1.htm> (дата обращения: 31.05.2013).
76. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. - М.: Машиностроение, 1982. - 528 с
77. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов, М., «Энергия», 1969. – 360 с
78. Brown W.F., Sweer J.H., Измерительная катушка для точечных измерений в неоднородных магнитных полях, Rev. Sci. Instr., 1945, vol. 16.
79. Herzog R. F. K., Tischler O., Измерения неоднородного магнитного поля, Rev. Sci. Instr., 1953, vol. 24.
80. Греков Н. Н., Рябов А. П., Гольдим Л. Л. ПТЭ, 1956, №6, стр. 13.
81. Гольдин Л. Л., Скачков С. В., Шорин К. Н., Магнитные измерения в ускорителях заряженных частиц, Госатомиздат, 1962.-56с.
82. Lush M. J., Гауссметр с вращающейся катушкой, Instruna. and Control Syst., 1964, vol. 37, №5.
83. Кадкин В. А., Магнетометр с вибрирующей катушкой, Труды институтов Комитета стандартов мер и измерительных приборов, Стандартгиз, 1962, вып. 64 (124).
84. Герцигер Л. Н., Измеритель магнитной индукции типа ИМИ-2, «Приборостроение», 1950, №5.
85. Афанасьев Ю. В., Гринбаум М. Б., Канторович В. Л., Певзнер Е. М., Петров Е. А., Новый метод измерения напряжённости постоянного магнитного поля, Сб. - "Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры" Выпуск 133 (193), М.,Л.,: Издательство стандартов, 1971. с.11-16.

86. Богомолов В. Н., Устройства с датчиками Холла и датчиками магнитосопротивления, Госэнергоиздат, 1961. с162.
87. Елпатьевская О. Д., Регель А. Р., О некоторых возможностях измерения напряжённости магнитного поля пленочными датчиками Холла, изготовленными из HgSe и HgTe и их твёрдых растворов, ЖТФ, 1956, т. 23, № 11.с2432.
88. Савенко В. Г., Применение эффекта Холла в технике связи, Связьиздат, 1963.112с.
89. Metrop. apl., 1963, vol. 10, № 9 и 10.
90. Неразрушающие испытания: Справочник: В 2-х кн.: Пер. с англ. / Под ред. Р. Мак-Мастера, Т. К. Зиловой. — Москва Ленинград: Энергия, 1965 — 492 с.
91. Narita Kenji, Sasaki Tadashi, Магнитометр с датчиком Холла, Дэнки сикэнсё ихо, Bull. Electrotechn. Lab., 1959, vol. 23, № 1.P76
92. Соминский М. С, Полупроводниковый датчик Холл-эффекта, Вестник АН СССР, 1957, №. 1. С.48.
93. Кринчик Г. С., Нурмухамедов Г. М., Золотарев В. П., Установка для измерения магнитных характеристик ферромагнетика на мнкроучастках поверхности размером 1 мкм^2 , ПТЭ, № 4,1964,. С. 171-175.
- 94.Исследование тормозных режимов транспортного линейного синхронного двигателя / С. В. Комаров, В. Ф. Новиков, А. Н. Зайцев. // Тезисы докладов X Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта". – 2000. – С. 142–143.
95. Исследование тяговых характеристик транспортного линейного синхронного двигателя/ В. Ф. Новиков, А. С. Ворошилов, В. И. Матин// Тезисы докладов X Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта". – 2000. – С. 146–147.
- 96.Рациональный выбор зазора между катушкой и блоком постоянных магнитов с учетом гармонических составляющих потокосцепления / В.

- Ф.Новиков, С. В. Бурылов, В. Э. Воскобойник, В. А. Дзензерский. // Тезисы докладов LXVI Международной научно-практической конференции "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта". – 2006. – С. 122.
97. Исследование стационарных и нестационарных режимов работы ПНТС: Отчёт о НИР (промежуточный)/ Институт транспортных систем и технологий (ИТСТ) НАН Украины «Трансмаг». – № гос.рег. 0102U005341 – т.6 – Днепропетровск, 2004. – 139с.
98. Тяговое усилие линейного синхронного двигателя / А. С. Ворошилов, В. А. Дзензерский, В. Ф. Новиков. // Тезисы докладов IX Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта". – 1996. – С. 154–155.

ПРИЛОЖЕНИЯ

131. Акт внедрения ООО ПКФ «ВЕЛТА»

132. Акт внедрения ДНУЖТ им. В. Лазаряна



ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор Бродський А.В.



АКТ

про впровадження у виробництво
результатів дисертаційної роботи Новікова Володимира Федоровича
«Определение рациональных параметров тягового линейного
двигателя для высокоскоростного электротранспорта».

Під час проектування третьої черги гірничо-збагачувального комбінату Бирзулівського родовища ільменітових пісків використовуються матеріали дисертаційної роботи Новікова Володимира Федоровича «Определение рациональных параметров тягового линейного двигателя для высокоскоростного электротранспорта».

Методи дослідження та аналізу магнітних полів постійних магнітів при проектуванні цеху магнітної сепарації.

Методи визначення тягового зусилля та визначення раціональних параметрів лінійного електродвигуна при проектуванні транспортної системи.

За рахунок підвищення якості сепарації та заміни автотранспорту на електротранспорт з лінійним приводом економічний ефект складатиме 5-10 грн/т, що, в залежності від обсягів виробництва, сягатиме від 170 до 1500 тисяч гривень на рік.

Фінансовий директор

 Пінчук Ю.Ю.

Начальник проектно-конструкторського відділу

 Мороз С.О.

Головний технолог

 Дубінін І. С.



про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Новікова Володимира Федоровича
«Визначення раціональних параметрів тягового лінійного двигуна
для високошвидкісного електротранспорту»

м. Дніпропетровськ

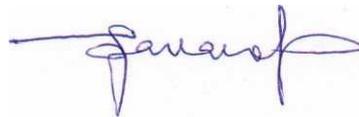
« 18 » 12 2015 р.

Цей акт складено про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийнято до використання наукові та практичні результати, викладені у дисертації Новікова В.Ф.

1. Визначення впливу геометричних параметрів системи збудження та котушок шляхової структури лінійного синхронного електродвигуна на величину та якість тягового зусилля діючого на екіпаж, при вивченні дисципліни «Високошвидкісний наземний транспорт» студентами 4-го курсу спеціальності 7.05070203

Декан факультету
«Електрифікація залізниць»

докт. техн. наук, професор



А.М. Афанасов