

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна

***НОВІКОВ ВОЛОДИМИР ФЕДОРОВИЧ***

**УДК 629.423.31.016.56**

**ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ТЯГОВОГО ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА  
ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2016

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Інституті транспортних систем і технологій Національної академії наук України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
***Воскобойнік Владислав Емануїлович***  
Старший науковий співробітник Інституту  
транспортних систем і технологій НАН  
України

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
***Афанасов Андрій Михайлович***  
Декан факультету «Електрифікація  
залізниць» Дніпропетровського  
національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
Міністерства освіти і науки України  
кандидат технічних наук, доцент  
***Ципленков Дмитро Володимирович***  
Доцент кафедри відновлюваних джерел  
енергії Державного вищого навчального  
закладу «Національний гірничий  
університет», Міністерства освіти і науки  
України

Захист відбудеться «30» червня 2016 р. об 11 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: ауд. 314, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, за адресою: вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, та на сайті університету [www.diit.edu.ua](http://www.diit.edu.ua) в розділі науково-технічна діяльність

Автореферат розіслано «30» травня 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
д. т. н, професор

А.М. Муха

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На початку третього тисячоліття повноцінне зростання виробничих сил і вирішення транспортних проблем, що виникають в зв'язку з цим, неможливе без високошвидкісних наземних транспортних систем (ВШНТ), які здійснюють перевезення пасажирів, і вантажів зі швидкостями близько 500 км/год, і вище, і, подібно до глобального метрополітену, зв'язуючих в єдине ціле основні науково-промислові центри. Такий транспорт зменшить час міжміських перевезень і внутрішньоміських переїздів, що дозволить більш ефективно використовувати кадровий і економічний потенціали різних регіонів і країн. Тому створення ВШНТ є назрілою проблемою для подальшого технічного, економічного і соціального розвитку суспільства.

Перспективним напрямком у вирішенні цієї проблеми є розробка безконтактного транспорту на магнітному підвісі, в якому левітація (підвіс) і рух транспортного засобу здійснюється за допомогою магнітного поля.

Існують дві основні системи магнітного підвісу (левітації) для ВШНТ:

1. Електромагнітний підвіс (ЕМП), в якому використовується притягіння електромагнітів поїзда до феромагнітної шляхової структури (Німеччина, Китай, США).

2. Електродинамічний підвіс (ЕДП), засновано на ефекті відштовхування, який виникає при взаємодії магнітного поля автономного рухомого джерела постійного магнітного поля з полем вихрових струмів, наведених ним в електропровідній шляховій структурі (Японія, США, Україна).

В системі ЕДП використовуються автономні джерела постійного магнітного поля, при цьому зазор між екіпажем і шляховою структурою досягає 100-200 мм, що робить неможливим застосування асинхронного двигуна, і вимагає використання приводу на базі лінійного синхронного електродвигуна (ЛСД) зі збудженням від автономних джерел постійного магнітного поля, які також забезпечують левітацію і стабілізацію напрямлення. Раніше для цих цілей використовувались надпровідні магніти, що працюють в режимі «замороженого потоку», але, останнім часом, різко знизилась вартість і виросла коерцитивна сила постійних магнітів. При збереженні даного тренда вимальовується перспектива їх використання у високоенергетичних системах левітації і тяги, що значно знижає вартість будівництва і експлуатації ВШНТ.

Практична реалізація такої системи стримується наявністю цілого комплексу невирішених науково-технічних проблем та задач. Зокрема, недостатньо розроблено методи розрахунку силових взаємодій у лінійних синхронних двигунах зі збудженням від постійних магнітів, відомі конструктивні рішення таких двигунів не задовольняють сучасним вимогам.

Слід підкреслити, що дані дослідження становлять значний інтерес не тільки для створення ВШНТ, але і для інших областей техніки, де використовується взаємодія джерела постійного магнітного поля з котушкою. Таким чином, зазначена проблема має загальнонаукове і загальнотехнічне значення. Все це свідчить про перспективність, важливість та актуальність

дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.**

Робота виконувалась за Постановами Кабінету Міністрів України від 1996 р № 517 та Президії НАН України від 1995 року № 47, темами НАН України від 1996 № 1.3.6.9 (№ держреєстрації 0196U001412) «Вирішення проблем створення перспективних транспортних систем і розробка засобів їх автономного енергозабезпечення», від 2001 № 1.3.6.11 (№ держреєстрації 0101U004480) «Дослідження і розробки в галузі створення магнітолевітуючих транспортних систем і модулів бортового енергозабезпечення», від 2002 № 1.3.6.12 (№ держреєстрації 0102U005341) «Розвиток методів дослідження динаміки і навантаженості нових і нетрадиційних видів транспорту», від 2007 № 1.3.6.14 (№ держреєстрації 0107U001166) «Розвиток методів дослідження механіки транспортних засобів та енергетичних систем».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є обґрунтування ефективних принципів і методів розрахунку раціональних параметрів тягового лінійного електродвигуна зі збудженням від постійних магнітів високошвидкісного електротранспорту.

Виконання цієї мети можливе при вирішенні наступних завдань:

1) розробка математичної моделі лінійного синхронного електродвигуна для високошвидкісного електротранспорту зі збудженням від джерела постійного магнітного поля, в якій не використовуються взаємні індуктивності еквівалентних котушок з котушками шляхової структури, крім того, відсутня залежність параметрів їх взаємодії від часу;

2) розробка методів і засобів дослідження джерел постійного магнітного поля збудження для таких двигунів;

3) розробка методу визначення залежності величини і якості тягового зусилля від різних параметрів конструкції шляхової структури та екіпажної частини лінійного синхронного електродвигуна зі збудженням від джерела постійного магнітного поля;

4) розробка методу і засобів дослідження величини і якості тягового зусилля лінійного синхронного електродвигуна з збудженням від джерела постійного магнітного поля;

5) обґрунтування і постановка експерименту для підтвердження адекватності розробленої моделі та ефективності розроблених методів.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення енергії в тяговому лінійному двигуні високошвидкісного електротранспорту

**Предметом дослідження** є конструктивні параметри тягового лінійного електродвигуна з збудженням від джерела постійного магнітного поля високошвидкісного електротранспорту

**Методи дослідження.** При виконанні роботи використовувалися:

- аналіз та узагальнення науково-технічних публікацій з високошвидкісного наземного транспорту, лінійними електродвигунами та постійними магнітами для вибору підходів до вирішення поставлених завдань у першому розділі;

- методи математичного і фізичного моделювання тягового лінійного

електродвигуна зі збудженням від джерела постійного магнітного поля для теоретичного і практичного дослідження його роботи у третьому та п'ятому розділах;

- методи аналізу і синтезу за допомогою рядів Фур'є для аналітичної лінеаризації нелінійних залежностей, що необхідно для зниження трудомісткості розрахунків двигуна у третьому, четвертому та п'ятому розділах;

- методи безпосереднього вимірювання та чисельного аналізу отриманих результатів для визначення зв'язку різних параметрів конструкції лінійного синхронного електродвигуна зі збудженням від джерела постійного магнітного поля з величиною і якістю тягового зусилля у четвертому та п'ятому розділах;

- експериментальні дослідження для підтвердження отриманих результатів у п'ятому розділі.

### ***Наукова новизна одержаних результатів.***

1. Вперше отримано аналітичні залежності величини потокозчеплення джерела постійного магнітного поля збудження з котушкою шляхової структури, що дозволяє, на основі запропонованої математичної моделі, визначити раціональні конструктивні параметри тягового лінійного електродвигуна високошвидкісного електротранспорту.

2. Вперше розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення потокозчеплення джерела постійного магнітного поля з котушкою шляхової структури будь-якої форми і різного розташування на заданій площині за рахунок зміни меж інтегрування, що дозволило отримати емпіричні та аналітичні залежності для різних конструктивних параметрів лінійного двигуна.

3. Вперше розроблено метод вимірювання знакозмінного тягового зусилля, що виникає при взаємодії постійного магнітного поля збудження з котушкою шляхової структури, заснований на перетворенні зусилля зі знакозмінного на змінне зусилля одного знаку шляхом подачі в систему вимірювання додаткової постійного навантаження, яке перевищує від'ємне значення тягового зусилля, що дозволило підтвердити адекватність запропонованої математичної моделі та застосовність розроблених методів.

### ***Практичне значення отриманих результатів.***

1) розроблено математичні моделі тягового лінійного синхронного електродвигуна зі збудженням від джерела постійного магнітного поля і методи визначення тягового зусилля в ньому для живлення від джерела струму та джерела напруги, які можуть бути використані при проектуванні ВШНТ;

2) розроблено і створено стенд для дослідження джерел постійного магнітного поля за допомогою якого отримано залежності їх взаємодії від різних параметрів конструкції лінійного синхронного електродвигуна зі збудженням від джерела постійного магнітного поля, що дало змогу розробити рекомендації для раціоналізації геометричних розмірів та взаємного розташування котушок шляхової структури, а також конфігурації системи збудження, розташованої на екіпажі з точки зору величини і якості тягового зусилля.

3) розроблено і створено стенд для випробування лінійного синхронного електродвигуна зі збудженням від джерела постійного магнітного поля, що дало змогу провести фізичне моделювання роботи лінійного електродвигуна ВШНТ;

Результати досліджень впроваджено при проектуванні 3-ї черги гірничо-збагачувального комбінату ТОВ ВКФ «Велта» та у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна при вивченні дисципліни «Високошвидкісний наземний транспорт» студентами 4-го курсу спеціальності 7.05070203 – Електричний транспорт.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети і завдання досліджень виконано спільно з науковим керівником. У публікаціях, в яких відображені основні результати дисертації автор дисертації брав участь в обговоренні постановки завдання і результатів, а також проведенні досліджень: в [1-5], в [6] автор розробив метод, брав участь у підготовці та проведенні експерименту, обробив результати. Роботу [7] автором виконано самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались на IX Міжнародній конференції "Проблеми механіки залізничного транспорту" Дніпропетровськ - 1996р., X Міжнародній конференції "Проблеми механіки залізничного транспорту". Дніпропетровськ. - 2000 р., Конструктори електротранспорту: Наукові читання з циклу: "Видатні конструктори України". Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут. Державний політехнічний музей. - Київ - 2003 г., XI Міжнародної конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту» Дніпропетровськ. - 2004 р 65-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» Дніпропетровськ. - 2005 р., 66-й Міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" Дніпропетровськ. - 2006 р., 67-й Міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту" Дніпропетровськ. -2007 р.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в 14 наукових працях, у тому числі 7 статтях у спеціалізованих виданнях, з яких 1 статтю [7] опубліковано в виданні згідно переліку науково-метричної бази Index Scopus, 7 у тезах доповідей та матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаної літератури та додатків. Основний текст дисертації викладено на 114 сторінках. Дисертація містить 57 рисунків, з них 3 окремі сторінки, 6 таблиць, 98 найменувань літературних джерел, розміщених на 12 сторінках, та 2 додатки на 3 сторінках. Повний обсяг дисертації 132 сторінки.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета і завдання досліджень, наведені основні наукові положення і результати, що винесені на захист, а також наведені відомості про практичне значення результатів роботи, апробації та публікації матеріалів досліджень.

*Перший розділ* присвячено огляду розвитку високошвидкісного наземного електротранспорту. Показано, що природний шлях розвитку залізничного транспорту при високих швидкостях руху призводить до необхідності заміни локомотивної тяги моторвагонного рухомого складу, застосування лінійного електроприводу, а при подальшому зростанні швидкості - до безконтактного підвісу.

Базу для бурхливого розвитку сучасного високошвидкісного електротранспорту було підготовлено в першій половині ХХ-го століття у працях таких вчених, як А. Зеден, Ф.С. Сміт, м Кемпер, Г.Р. Полгрін, Х. Камерлінг-Оннес, Е. Башеле, Б.П. Вейнберг, Г. Тромбетта, П. А Фрідкін, Т.Є. Штурман.

З середини ХХ-го століття в багатьох країнах світу стали активно проводитися дослідження в напрямку практичного застосування високошвидкісного електротранспорту. Були побудовані дослідні та комерційні лінії (Е. Лейтвейт (Великобританія), Transrapid (ФРН), maglev-шаттл (Бірмінгем, Великобританія), MLU і MLX (Японія), JR-Maglev (Ванкувер, Канада), Трансрапід (Шанхай, КНР).

У СРСР, а пізніше в Україні проводилися і проводяться на даний час дослідження в області магнітолевітуючого високошвидкісного електротранспорту та лінійного електроприводу багатьма науковцями (Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Бурцев В.А., Бурьлов С.В., Васильев В.В., Васильева О.В., Винокуров В.А., Волчуков М.П., Ворошилов А.С., Воскобойник В.Э., Гетьман Г.К., Демин Ю.В., Дзензерский В.А., Зайцев А.Н., Зинченко В.И., Ким К.И., Клименко Е.Ю., Кожемякин СМ., Комаров С.В., Корепанов Г.Я., Коротенко М.Л., Костенко Ф.Б., Кочетков В.М., Краснопольская В.И., Кузнецова Т.И., Лазарян В.А., Лашер А.Н., Манашкин А.Л., Матин В.И., Мацур М.А., Набока Б.Г., Нагорский В.Д., Новиков С.И., Новогренко Н.М., Омельяненко Г.В., Омельяненко В.И., Осадчий Г.Ф., Палей Б.З., Платонов А.Д., Походенко Р.Н., Радченко Н.А., Салли И.В., Сапелкин С.А., Сергеев С.А., Соколов Б.И., Солодовник Л.М., Сохор Ю.Н., Талья И.И., Трещев И.И., Уманов М.И., Фришман Е.М., Хачапуридзе Н.М., Цымбал Н.Н., Эм А.И.).

Останнім часом стало можливим застосування висококоерцитивних магнітів для збудження в потужних синхронних електричних машинах для електротранспорту, методи розрахунку яких на даний час недостатньо розроблені.

У розвиток методів і способів дослідження магнітних полів внесли свій внесок вчені різних країн (Brown W.F., Herzog R.F.K., Kenji N., Lush M.J., Sweer J.H., Tadashi S., Tischler O., Афанасьев Ю.В., Богомоллов В.Н., Герцигер Л.Н., Гольдим Л.Л., Греков Н.Н., Гринбаум М.Б., Елпатьевская О.Д., Золотарев В.П., Кадкин В.А., Канторович В.Л., Кифер И.И., Кринчик Г.С., Нурмухамедов Г.М., Певзнер Е.М., Петров Е.А., Пятин Ю.М., Регель А.Р., Рябов А.П., Савенко В.Г., Скачков С.В., Соминский М.С, Шорин К.Н.).

Для електричних машин зі збудженням від постійних магнітів і магнітопроводом, з певними застереженнями, можна застосовувати існуючі

методи розрахунків. Для лінійних синхронних двигунів без магнітопровода, які застосовуються у високошвидкісному електротранспорті, застосовується метод еквівалентних котушок, який полягає в заміні постійного магніту набором котушок зі струмом, які створюють магнітне поле схожою конфігурації. Даний метод, на жаль, дуже громіздкий, оскільки, окрім власне розрахунку машини, для вибору параметрів цих котушок необхідно виконання розрахунків розподілу магнітних полів, створюваних в навколишньому просторі нелінійними елементами, якими є постійні магніти. При використанні декількох магнітів завдання ускладнюється в рази, а можливо і на порядки.

Це призвело до необхідності розробки узагальнених методів розрахунку, що враховують взаємодію шляхової котушки зі складним джерелом постійного магнітного поля невизначеної конфігурації. На даний момент, найбільш складним для розрахунку є магнітне поле групи постійних магнітів.

У результаті проведеного аналізу стало зрозуміло, що для забезпечення можливості раціонального вибору конструктивних параметрів лінійного синхронного двигуна високошвидкісного магнітолевітуючого екіпажу зі збудженням від джерела постійного магнітного поля, тобто для розв'язання оберненої задачі з некоректними умовами, необхідно мати інженерну (не пов'язану з великим обсягом обчислень) методику визначення тягового зусилля, що виникає при взаємодії магнітного поля збудження зі струмом у котушках шляхової структури.

*У другому розділі* розгорнуто напрямки вирішення основного завдання дослідження - створення основ методики визначення тягового зусилля.

Для зниження складності та трудомісткості розрахунку двигуна необхідно мати метод, який відповідає наступним вимогам:

- максимальне зниження трудомісткості визначення параметрів взаємодії між джерелом постійного магнітного поля і котушками шляхової структури;
- максимальне зниження ресурсоемності розрахунку зусиль, що виникають в результаті взаємодії джерела постійного магнітного поля з котушками шляхової структури, при використанні скалярних величин;
- максимально можлива заміна використання чисельних методів розрахунками за допомогою аналітичних залежностей.

В якості розумної альтернативи методу еквівалентних котушок було запропоновано метод розрахунку тягових зусиль, який не вимагає розрахунку просторового розподілу магнітного поля, в якому використовувалася інтегральна величина - потокозчеплення котушки шляхової структури з блоком постійних магнітів. Потокозчеплення в цьому випадку визначалося експериментально. На жаль, даний метод не позбавлений недоліків. Незважаючи на суттєве полегшення розрахункової частини, залишається все ще досить трудомістким процес вимірювання потокозчеплення, який важко автоматизувати. При цьому залежність визначається тільки для конкретної конфігурації котушки шляхової структури.

Більш прийнятним представляється розрахунково-експериментальний метод визначення залежності потокозчеплення котушки шляхової структури з блоком постійних магнітів від їх взаємного положення. Даний метод не



прив'язаний до конкретних розмірів котушки і, відповідно, спрощує експериментальну частину визначення шуканої залежності, оскільки заснований на вимірюванні індукції магнітного поля.

У *третьому розділі* проводиться перетворення стандартної математичної моделі лінійного двигуна в модель, в якій замість залежності взаєміндуктивності від часу використовується залежність потокозчеплення від переміщення.

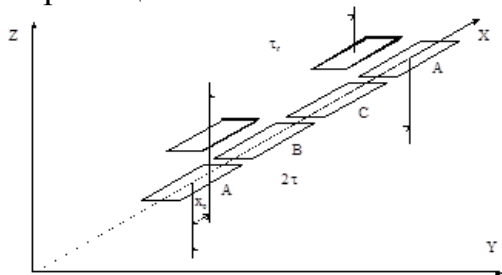


Рисунок 1— Розрахункова схема шляхової обмотки і обмотки збудження лінійного двигуна

Для ЛСД при русі транспортного засобу з постійною швидкістю в напрямку координати (рис.1) вважаємо, що обмотка (джерело постійного магнітного поля) збудження має відносно шляховий обмотки довільні зміщення в напрямку відповідних координатних осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Рівняння для миттєвих значень напруг, струмів і потокозчеплень ЛСД запишемо за наступних припущень:

- Активні опори, власні і взаємні індуктивності фазних обмоток не залежать від величини, частоти і форми струмів, які протікають у них;
- З'єднувальні дроти між окремими котушками колійних обмоток не мають магнітного зв'язку з електричними контурами, а їхні власні параметри враховуються в параметрах фазних обмоток;
- Фазні обмотки ЛСД симетричні, тобто мають однакову конструкцію і однакові просторові зміщення один щодо одного;
- Не враховується крайовий ефект, обумовлений скінченим числом котушок шляхової обмотки ЛСД;
- Не враховується зміна намагнічуваності постійних магнітів, обумовлена впливом магнітного поля котушок шляхової обмотки ЛСД;
- Нехтуємо впливом вихрових струмів, що наводяться в матеріалі котушок шляхової обмотки ЛСД;
- Перемикання напруги в безпосередньому перетворювачі частоти (БПЧ) відбувається миттєво;
- Припускаємо, що напруга, яку видає БПЧ на фазу не пульсує (випрямлена), та є постійною.

За таких припущень рівняння напруг ЛСД, що має трифазну шляхову обмотку, можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} U_A &= r_a i_A + L_{aa} \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_B}{dt} + M_a \frac{di_C}{dt} + \frac{d\psi_{Af}}{dt}; \\ U_B &= r_a i_B + L_{aa} \frac{di_B}{dt} + M_a \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_C}{dt} + \frac{d\psi_{Bf}}{dt}; \\ U_C &= r_a i_C + L_{aa} \frac{di_C}{dt} + M_a \frac{di_A}{dt} + M_a \frac{di_B}{dt} + \frac{d\psi_{Cf}}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $U_A, U_B, U_C, i_A, i_B, i_C$  — миттєві значення фазних напруг і струмів;  $r_a, L_{aa}, M_a$  —

активні опори, власні і взаємні індуктивності фазних обмоток;  $\psi_{Af}, \psi_{Bf}, \psi_{Cf}$  — потокозчеплення фазних обмоток, обумовлені потоком збудження.

Трифазну систему періодичних несинусоїдальних напруг, вхідних до затискачів шляховий обмотки ЛСД, і потокозчеплення системи збудження з котушкою шляхової структури можна представити виразами:

$$\begin{aligned} U_A &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos(n\omega t + \beta_n); & \psi_{Af} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} x; \\ U_B &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos(n\omega t - n \frac{2\pi}{3} + \beta_n); & \psi_{Bf} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} \left( x - \frac{2\tau}{3} \right); \\ U_C &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \cos(n\omega t + n \frac{2\pi}{3} + \beta_n), & \psi_{Cf} &= \psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \cos n \frac{\pi}{\tau} \left( x + \frac{2\tau}{3} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

де  $U_n, \beta_n$  — діюче значення і фазовий кут  $n$ -ої гармоніки напруги;  $\omega$  — кутова частота живлячої напруги, пов'язана з його періодом  $T$  співвідношенням  $\omega = 2\pi/T$ . Постійна складова і амплітуди гармонік потокозчеплення залежать від струму намагнічування  $i_f$   $\psi_n = i_f \cdot A_n$  ( $n = 0, 1, \dots$ ).

З урахуванням  $v = dx/dt$  діюче значення  $n$ -ої гармоніки е.р.с.  $E_n = \frac{1}{\sqrt{2}} n \frac{\pi}{\tau} v \psi_n$ .

За таких позначень електро-рушійна сила (е.р.с.), що наводиться у фазах шляхової обмотки і вимушені складові струмів будуть описуватися співвідношеннями:

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

де  $\bar{I}_n$  — комплекс діючого значення  $n$ -ої гармоніки фазного струму;  $j = \sqrt{-1}$ .

Представивши аналогічним чином в комплексній формі вирази для напруг (2) і е.р.с. (3) на підставі співвідношень (1) одержимо рівняння напруг для  $n$ -ої гармоніки

$$U_n e^{jn\omega t} e^{j\beta_n} = r_a \bar{I}_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} x} + jn \frac{\pi}{\tau} v L_{an} \bar{I}_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} x} + jE_n e^{jn \frac{\pi}{\tau} x}, \quad (4)$$

де індуктивність фазної обмотки для  $n$ -ої гармоніки

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

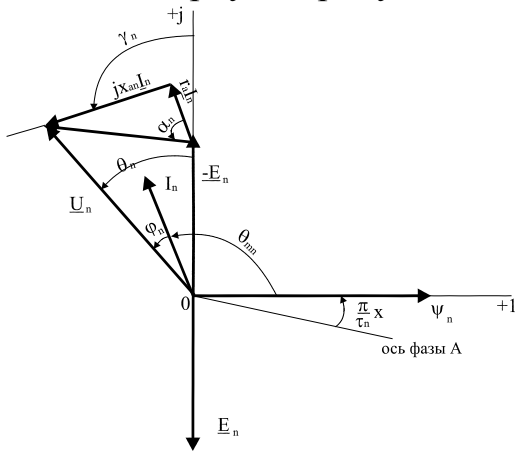
Врахуємо, що поточне зміщення осей обмоток  $x = x_0 + vt = x_0 + \frac{\pi}{\tau} \omega t$ , де  $x_0$  — зсув обмотки збудження відносно обмотки фази  $A$  в момент  $t = 0$  (рис.1).

Введемо позначення  $\beta_n - n \frac{\pi}{\tau} x_0 = \theta_n + \frac{\pi}{2}$ ;  $nL_{an} = x_{an}$ ;  $r_a + jx_{an} = \bar{Z}_n$  та на підставі (4) отримаємо співвідношення  $U_n e^{j\left(\theta_n + \frac{\pi}{2}\right)} = \bar{Z}_n \bar{I}_n + jE_n$  або  $\bar{U}_n = \bar{Z}_n \bar{I}_n - \bar{E}_n$ , де  $\bar{U}_n = U_n e^{j\left(\theta_n + \frac{\pi}{2}\right)}$ ;  $\bar{E}_n = jE_n$ .

На підставі останніх співвідношень для  $n$ -ої гармоніки струму запишемо

$$\overline{I}_n = \frac{U_n e^{j(\theta_n + \frac{\pi}{2})} - E_n e^{j\frac{\pi}{2}}}{Z_n} = \frac{\overline{U}_n - (-\overline{E}_n)}{Z_n}. \quad (5)$$

Векторну діаграму ЛСД наведено на рис.2.



$\theta_n$  – кут навантаження синхронної машини для, гармонійної складової довільного порядку  $n$ .

$$\Delta U_n = \sqrt{(U_n \cos \theta_n - E_n)^2 + (U_n \sin \theta_n)^2} \\ = \sqrt{U_n^2 + E_n^2 - 2U_n E_n \cos \theta_n};$$

$$\theta_{mn} = \frac{\pi}{2} + \gamma_n - \alpha_n;$$

$$\gamma_n = \arctg \frac{U_n \sin \theta_n}{U_n \cos \theta_n - E_n}.$$

$\theta_{mn}$  – магнітний кут навантаження синхронного двигуна

$\pi/2 + \theta_n = \theta_{mn} + \varphi_n$ .  $\theta_n = n \cdot \theta$ , де  $\theta = \theta_1$  — кут

Рисунок 2 – Векторна діаграма лінійного синхронного двигуна навантаження для основної (першої) гармоніки напруги.

Сили, що діють на обмотку збудження ЛСД і пов'язаний з нею транспортний засіб, визначаються співвідношенням

$$f_q = \left( i_A \frac{\partial \psi_{Af}}{\partial q} + i_B \frac{\partial \psi_{Bf}}{\partial q} + i_C \frac{\partial \psi_{Cf}}{\partial q} \right); \quad q = x, y, z. \quad (6)$$

Постійні складові зусиль, що діють на обмотку збудження ЛСД, визначатимуться доданками, що мають однаковий порядок гармонік струму і взаємної індуктивності:

$$F_x = -\frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{xn} \sin \theta_{mn};$$

$$F_y = \frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{yn} \cos \theta_{mn}; \quad (7)$$

$$F_z = \frac{3}{\sqrt{2}} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{zn} \cos \theta_{mn}.$$

Механічна потужність, що розвивається ЛСД, і рівна їй електромагнітна потужність:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} = F_x v = -\frac{3}{\sqrt{2}} v \sum_{n=1}^{\infty} I_n \psi_{xn} \sin \theta_{mn} = 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n E_n \sin \theta_{mn}. \quad (8)$$

Використовуючи рис. 2, вираз (8) можна представити у вигляді:

$$P_{\text{мех}} = 3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_n}{z_n} (U_n x_{an} \sin \theta_n + U_n r_a \cos \theta_n - r_a E_n) = 3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_n}{z_n} [U_n z_n \cos(\theta_n - \alpha_n) - r_a E_n].$$

Активна і повна потужність, що підводиться до шляхової обмотки ЛСД

$$P_a = P_{\text{мех}} + 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 r_a = 3 \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n, \quad S = 3 \left( \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2}.$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) і коефіцієнт потужності ЛСД, який є

аналогом  $\cos\varphi$  для кола синусоїдального струму:

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_a}, \quad K_\varphi = \frac{P_a}{S}.$$

Таким чином, розроблені вище співвідношення математичної моделі ЛСД для стаціонарних режимів дозволяють розрахувати характеристики ЛСД при довільному характері струму в шляховий обмотці або напруги на її затискачах. Для розрахунку характеристик ЛСД необхідно визначити амплітуди гармонік поточкозчеплення джерела постійного магнітного поля збудження з котушками шляхової структури лінійного двигуна.

**У четвертому розділі** проведено дослідження взаємодії джерела постійного магнітного поля збудження у вигляді блоку постійних магнітів з котушкою шляхової структури.

Для розрахунку лінійного двигуна високошвидкісного електротранспорту зі збудженням від постійних магнітів необхідно знати залежність поточкозчеплення джерела постійного магнітного поля з котушкою шляхової структури від їх взаємного розташування. Спочатку поточкозчеплення вимірювалося експериментально, але методика вимірювання поточкозчеплення є вкрай трудо- та часовитратною, а, головне, в силу особливостей самого процесу вимірювань, практично не піддається автоматизації.

Запропоновано розрахунково-експериментальний метод визначення залежності поточкозчеплення блоку постійних магнітів з котушкою шляхової структури від їх взаємного положення. Відмінність даного методу від прямого експериментального вимірювання полягає в тому, що замість безпосереднього вимірювання залежності поточкозчеплення котушки шляхової структури транспортного лінійного електродвигуна з блоком постійних магнітів від їх взаємного положення проводиться вимірювання розподілу індукції магнітного поля збудження, що створюється блоком постійних магнітів в площині середнього витка котушки шляхової структури (рис. 3). Причому, вимірювання проводиться по площині в усі сторони до нульових значень індукції. У зв'язку з тим, що тесламетр з датчиком Холла безпосередньо показує індукцію в кожній точці простору, такі виміри досить легко автоматизувати шляхом застосування планшетного вимірювача в комплексі з цифровим тесламетром. У такому випадку етап вимірювання індукції можна зменшити, що призведе до підвищення точності вимірювання, а відповідно, і точності подальших розрахунків тягових зусиль.

Після вимірювання розподілу індукції магнітного поля блоку постійних магнітів на певній висоті проводиться інтегрування індукції по площі котушки шляхової структури (рис. 4). При цьому визначається поточкозчеплення в точці розташування центру котушки. У разі послідовного зсуву області інтегрування отримується залежність поточкозчеплення блоку постійних магнітів з котушкою шляхової структури від їх взаємного розташування.

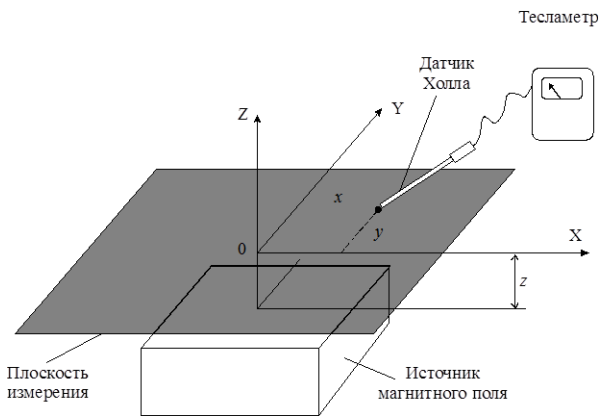


Рисунок 3 – Вимірювання розподілу індукції магнітного поля, створюваного блоком постійних магнітів в площині середнього витка котушки шляховий структури

чотири конструктивно однакових блоки постійних магнітів, результати вимірювання за якими осереднюються.

З урахуванням того, що шляхова обмотка має періодичну структуру, для дослідження і використання отриманої залежності в подальших розрахунках доцільно її розкладання в ряд Фур'є.

Вимірювання індукції магнітного поля досліджуваного блоку постійних магнітів проводилося за допомогою мілітесламетра ЕМ-1 (основна похибка 4%) на висотах (відстанях між поверхнею блоку і площиною середнього витка котушки) від 0,005 до 0,045 м. Для дослідження розподілу індукції поля було обрано

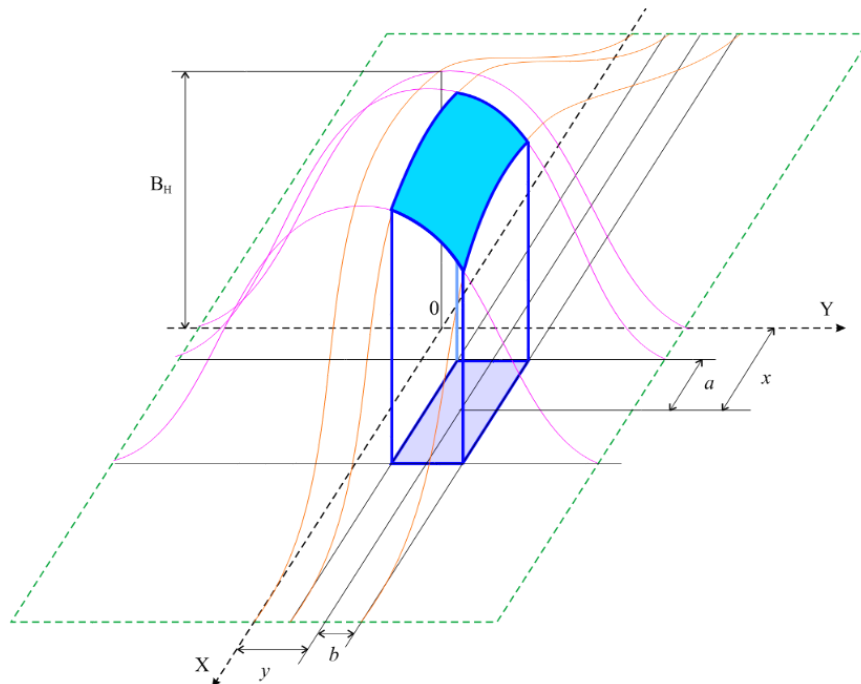


Рисунок 4 – Інтегрування індукції по площі котушки шляховий структури

На рис. 5 наведено зняті раніше за допомогою мікروهберметра Ф190 (основна похибка 2,5%) експериментальні (крива 1, 3, 5) і розрахунково-експериментальні (крива 2, 4, 6) залежності потокозчеплення котушки шляхової структури з блоком постійних магнітів від їх взаємного переміщення для висот  $z = 0,02$  м;  $0,03$  м;  $0,045$  м відповідно. Ці залежності наведені при строго співвісному (по осі X) переміщенні котушки шляхової структури щодо блоку постійних магнітів. Хороший якісний збіг обох кривих показує, що за допомогою запропонованого методу досить точно визначається потокозчеплення, а, отже, і сила взаємодії котушки з блоком постійних магнітів.

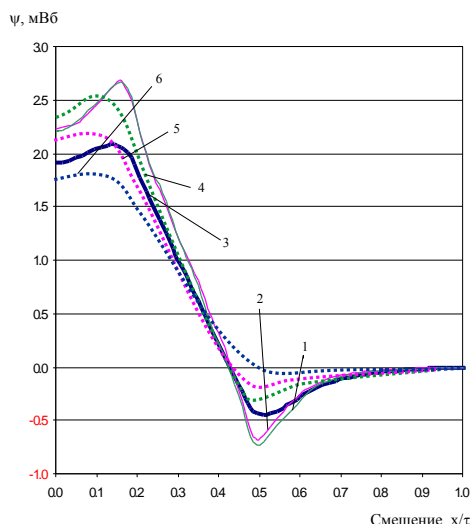


Рисунок 5 – Залежності потокозчеплення котушки шляхової структури з блоком постійних магнітів від їх взаємного зміщення

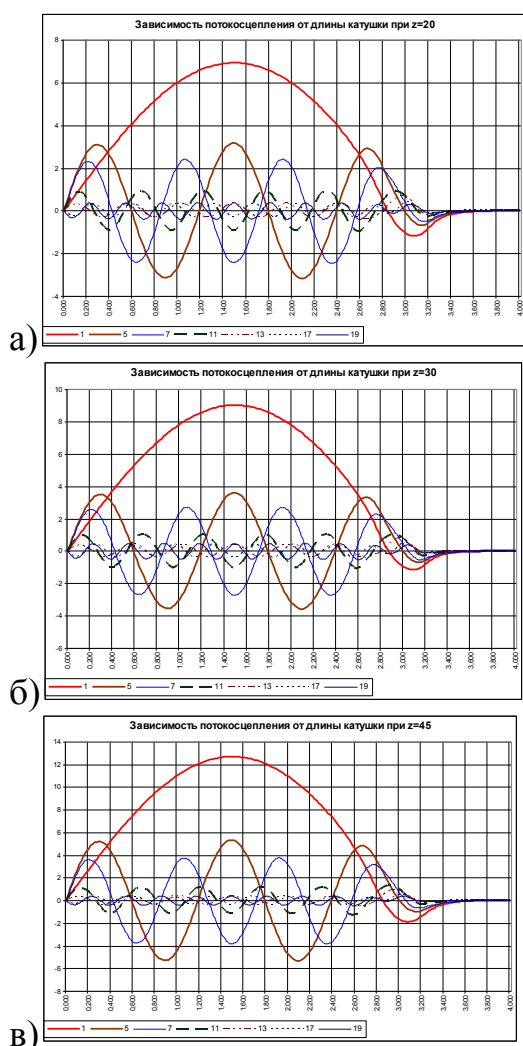


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнтів Фур'є від довжини котушки шляхової структури

На рис. 6 представлено залежності коефіцієнтів ряду Фур'є від довжини котушки шляхової структури на фіксованому інтервалі розкладання. Ці залежності наведені для висот  $z = 0,02$  м (а);  $0,03$  м (б);  $0,045$  м (в) при строго співвісному (по осі X) переміщенні котушки шляхової структури щодо блоку постійних магнітів. Незважаючи на те, що при розкладанні потокозчеплення наявні всі гармоніки, на цих і наступних малюнках наведено лише 1, 5, 7, 11, 13, 17 і 19 гармоніки. З рис. 6 видно, що при зміні довжини котушки від 0 і до 4 довжин поля блоку постійних магнітів отримані залежності мають 3 зони. У першій зоні (від 0 до 2,5) залежності явно гармонійні. У третій зоні, коли довжина котушки становить не менше 3,5 довжин поля потокозчеплення повертається до 0. У середній зоні відбувається деформація залежностей. Для різних висот графіки залежностей відрізняються тільки масштабом по осі ординат.

На рис. 7 представлено залежності коефіцієнтів ряду Фур'є для різних довжин котушки шляхової структури від номера гармоніки на фіксованому інтервалі розкладання. Ці залежності наведено для висот  $z = 0,02$  м (а);  $0,03$  м (б);  $0,045$  м (в) при строго співвісній (по осі X) переміщенні котушки шляхової структури щодо блоку постійних магнітів. По осі X (абсцис) наведені розміри котушки, наведені до довжини поля блоку постійних магнітів.

З рис. 7 видно, що можна вибрати таку довжину котушки, при якій буде мінімальна величина 5-ї та 7-ї гармонік, але при цьому буде досить велика 1-а гармоніка. Для різних висот графіки залежностей відрізняються тільки масштабом по осі ординат.

В даному випадку коефіцієнти взяті для котушки, що має довжину рівну півтори довжин поля блоку постійних магнітів.

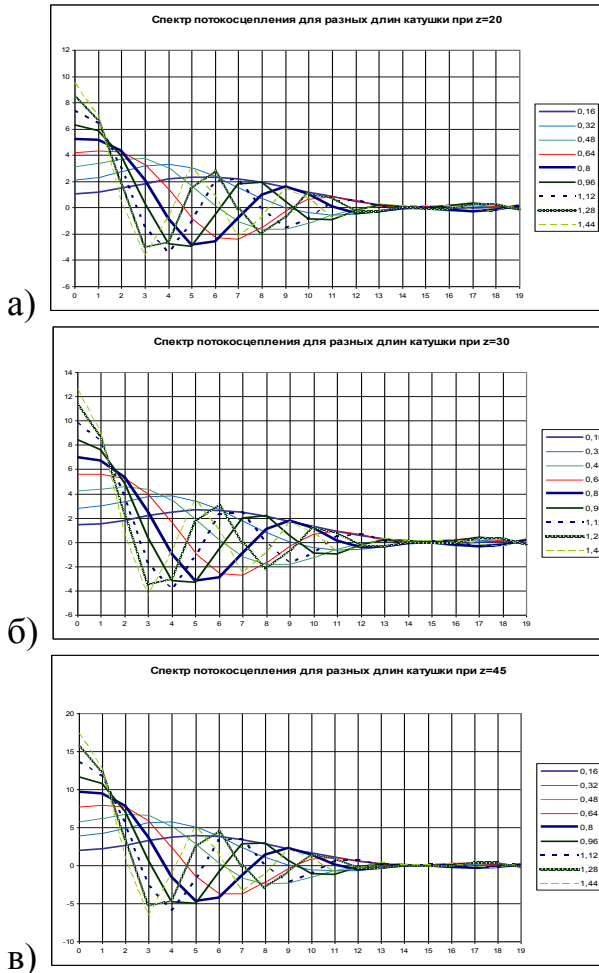


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнтів ряду Фур'є для різних довжин котушки шляхової структури від номера гармоніки

$$\psi(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{L} \cdot x\right) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \alpha_m \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{\lambda} \cdot x\right), \quad (9)$$

$$\text{де } a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L \psi(x) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{L} \cdot x\right) \cdot dx \quad \text{та} \quad \alpha_m = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda}^{\lambda} \psi(x) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot dx.$$

Перерахунок коефіцієнтів Фур'є:

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

при  $m \neq 0$

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

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

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

$$\alpha_m = a_n$$

При дослідженні джерела постійного магнітного поля невідомо, в двигуні з яким  $\tau$  він буде працювати. Отже, при первинному дослідженні джерела постійного магнітного поля період розкладання залежності його потокозчеплення з котушкою шляхової структури вибирається довільно. Оскільки коефіцієнти Фур'є залежать від періоду розкладання, необхідно мати можливість провести їх перерахунок для різних періодів. Виміряна парна залежність потокозчеплення джерела постійного магнітного поля з котушкою шляхової структури від їх взаємного зміщення уздовж осі  $Ox$  являє собою функцію  $\psi(x)$ , яку можна представити у вигляді косинусних рядів Фур'є (9) з різним періодом  $L$  і  $\lambda$ : а також номерами гармонік  $n$  і  $m$  відповідно:

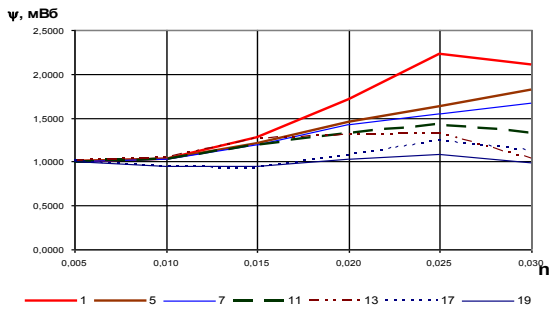


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнтів розкладання Фур'є для однакових гармонік при різних величинах робочих зазорів

З метою отримання рекомендацій щодо робочого зазору між площиною котушки і блоком постійних магнітів проведено порівняння залежностей коефіцієнтів розкладання Фур'є для однакових гармонік при різних величинах робочих зазорів, які наведено на рис. 8. З рис. 8 видно, що всі залежності, крім 5-ї та 7-ї гармоніки, а особливо перша, мають локальний максимум в області зазору 0,025 м.

За результатами досліджень даного блоку постійних магнітів можна дати наступні рекомендації:

- виходячи з необхідності практичного продавлення 5-ї та 7-ї гармоніки можна вибрати довжину котушки або 1,25, або 1,5 довжин поля блоку постійних магнітів;
- зазор повинен приблизно дорівнювати 0,025 м, оскільки перша гармоніка при даному зазорі має максимум, а 5-а і 7-я гармоніки ще недостатньо великі, щоб серйозно спотворити сили взаємодії;
- при величині зазору менше 0,025 м відбувається зменшення тягового зусилля.

*У н'ятому розділі* наведено доказ адекватності розробленої математичної моделі лінійного синхронного двигуна високошвидкісного електротранспорту та прийнятих припущень, а також застосовність методу розрахунку тягового зусилля, що виникає в ЛСД, при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Даний доказ побудовано на порівнянні розрахункових і експериментально отриманих значень величини тягового зусилля для різних конструкцій лінійного синхронного двигуна без феромагнітного магнітопроводу із живленням від постійних магнітів транспортного засобу (ТЗ).

Оскільки для емпіричних теорій позитивний результат експерименту не є однозначним доказом істинності, для однозначного висновку про адекватність розробленої моделі та ефективності розроблених методів необхідно провести їх перевірку на фальсифікованість? . Відповідно до цього критерію, необхідно не просто провести експеримент, результати якого співпадуть з розрахунковими, але потрібно ще уникнути помилок, викликаних випадковим їх збігом. Для цього проводиться експеримент зі змінними параметрами.

Для експериментального дослідження лінійного тягового електропривода на дослідно-експериментальному полігоні ІТСТ НАНУ «Трансмаг» було створено стенд, який включає в себе шляхову естакаду, транспортний засіб (ТЗ) і перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком. ТЗ (рис.9), виконано з алюмінієвих труб прямокутного профілю 1. На ній кріпляться колеса 2 і блоки постійних магнітів збудження 3.

У літературі не описано, методи вимірювання знакозмінних тягових зусиль уздовж осі переміщення при відсутності механічного зв'язку між ТЗ і



естакадою в напрямку переміщення, тому було запропоновано наступне технічне рішення.

Вимірювалися зусилля, що діють на транспортний засіб при зміщенні його вздовж шляхової структури в умовах зафіксованих миттєвих розподілів струмів у фазах шляхової структури і, відповідно, при фіксованих розподілах магнітного поля уздовж шляховий структури. Для моделювання миттєвих значень струмів у фазах використовувався постійний струм. Система вимірювання тягового зусилля наведена на рис. 10.

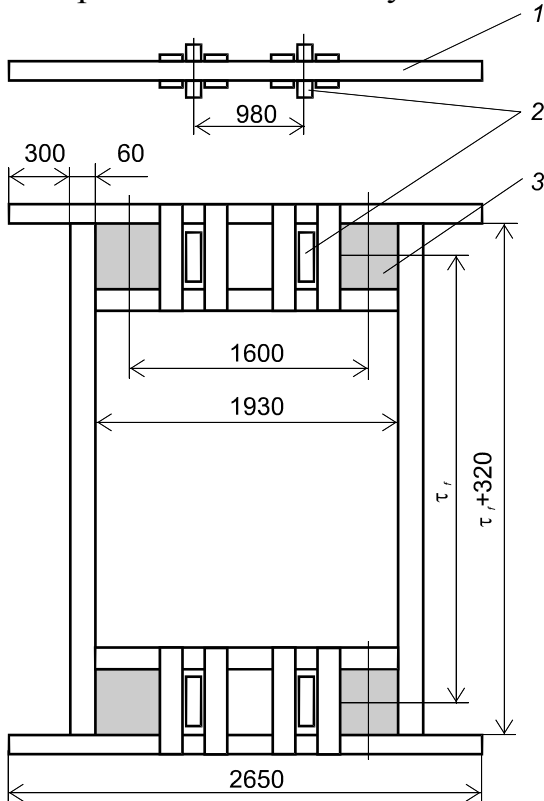


Рисунок 9 – Експериментальний візок

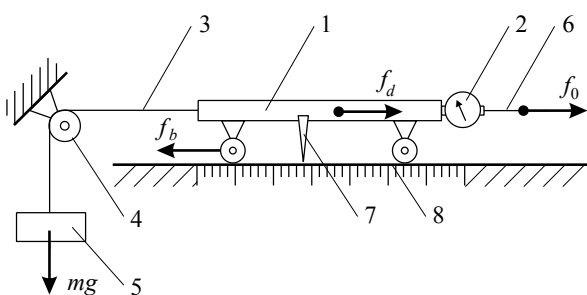


Рисунок 10 – Система вимірювання тягового зусилля

До транспортного засобу 1 прикріплений динамометр 2, з протилежного від динамометра боку за допомогою гнучкого троса 3, перекинутого через блок 4, прикріплений вантаж 5 по вазі перевищував максимальний розмах коливань тягового зусилля. Вимірюється зусилля зсуву транспортного засобу прикладалося до динамометра за допомогою гнучкого троса 6. За допомогою покажчика 7 і шкали 8, жорстко закріплених на транспортному засобі і шляховій структурі відповідно, фіксувалися відносні зміщення останніх. Для експериментального підтвердження адекватності математичної моделі лінійного синхронного двигуна і прийнятих припущень, а також застосовності методу розрахунку тягового зусилля, що виникає в ЛСД, при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури проведено порівняння розрахункових і вимірних зусиль при різних конфігураціях систем збудження (рис. 11). Для згладжування пульсацій тягового зусилля необхідно пригнітити п'яту та сьому гармоніки потягозчеплення (рис. 11ж), так як більш

високі гармоніки істотно впливу на форму кривої зусилля не надають. Для пригнічування вищих гармонік в електричних машинах застосовуються різні методи, серед яких зміна довжини полюсів, вкорочення кроку обмотки і т.д. У разі лінійного двигуна з двома парами полюсів відносно вкорочення кроку шляховий обмотки (збільшення кроку обмотки збудження) призводить не стільки до пригнічування вищих непарних гармонік, скільки до зростання парних, зокрема другої (рис. 11и). Отже, даний шлях в наших умовах не

підходить.

У зв'язку з неможливістю прямого подовження полюсів внаслідок відсутності висококоерцитивних постійних магнітів, було запропоновано спосіб непрямого збільшення довжини полюсів збудження. Даний спосіб полягає у зміщенні однієї пари полюсів збудження відносно іншої на  $0,2\tau$ , причому всередині пари відстань між полюсами залишається незмінною (рис. 11к). Залежність тягового зусилля від зсуву (рис. 11к) в даному випадку має практично синусоїдальний характер.

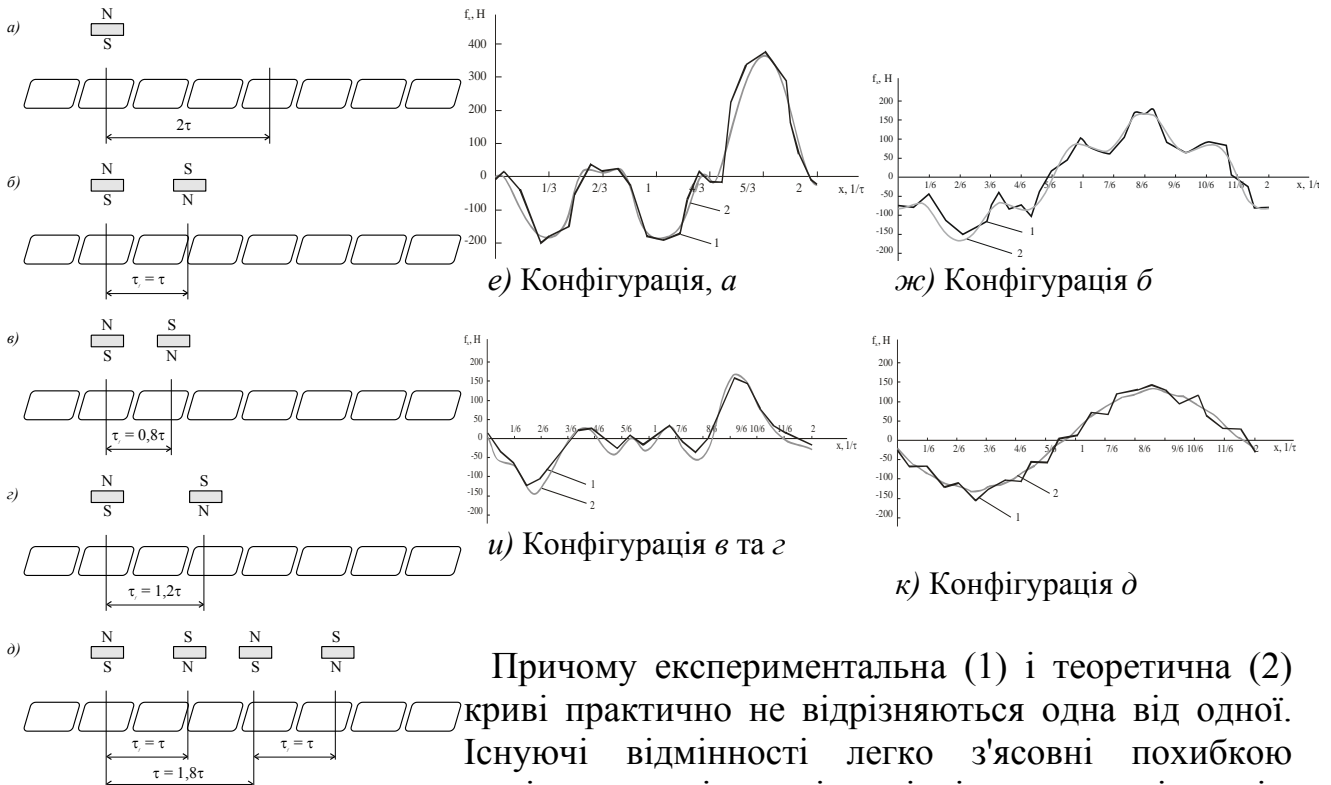


Рис. 11 – Порівняння зусиль при різних конфігураціях систем збудження

Причому експериментальна (1) і теоретична (2) криві практично не відрізняються одна від одної. Існуючі відмінності легко з'ясовні похибкою вимірювань і нерівномірністю зазорів між полюсами збудження і котушками шляхової структури.

### Висновки.

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок про те, що обґрунтовано ефективні принципи і методи розрахунку раціональних параметрів тягового лінійного електродвигуна зі збудженням від постійних магнітів високошвидкісного електротранспорту, тобто створено основи для розробки практично застосовного в інженерній практиці методу розрахунку лінійного синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів, а саме:

1. Розроблено математичну модель лінійного синхронного двигуна без феромагнітного магнітопроводу зі збудженням від постійних магнітів високошвидкісного електротранспорту. У даній моделі в якості базового показника взаємодії використовується залежність потокозчеплення джерела магнітного поля збудження з котушкою шляхової структури від їх взаємного розташування.

2. Розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення залежності потокозчеплення джерела магнітного поля збудження з котушкою

шляхової структури від їх взаємного розташування. Цей спосіб полягає в експериментальному визначенні розподілу індукції магнітного поля збудження в площині середнього витка шляховий котушки з подальшим інтегруванням по її площі. Що дозволяє, при зміні меж інтегрування, легко визначати магнітний потік (а відповідно і потокозчеплення) через котушку будь-якої форми і різного розташування на площині вимірювання.

3. Розроблено та виготовлено стенд для експериментального визначення розподілу індукції поля постійного магніту збудження в площині середнього витка шляхової котушки при різному розташуванні такої площини, що дало змогу отримати залежності, у тому числі аналітичні, потокозчеплення джерела постійного магнітного поля з котушкою шляхової структури від їх взаємного розташування для різних конструктивних параметрів лінійного двигуна (довжина та ширина котушки, робочий зазор, полюсний розподіл та конфігурація системи збудження), що дало змогу розробити рекомендації для раціонального вибору геометричних розмірів та взаємного розташування котушок шляхової структури, а також конфігурації системи збудження, розташованої на екіпажі з точки зору величини і якості тягового зусилля. Наприклад робочий зазор для заданих блоку магнітів та котушки має бути 25 мм.

4. Розроблено метод розрахунку тягового зусилля, що виникає в лінійному синхронному двигуні при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Даний метод, заснований на запропонованій моделі лінійного двигуна, дає можливість визначити залежність величини тягового зусилля від місця розташування транспортного засобу щодо шляховий структури. Тягове зусилля можна визначити в широкому діапазоні значень геометричних параметрів конструкції двигуна, що дає можливість на етапі проектування варіювати геометричні параметри двигуна задля досягнення потрібної якості тягового зусилля.

5. Розроблено метод вимірювання знакозмінного тягового зусилля, що виникає при взаємодії поля постійного магніту системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Даний метод полягає в поданні на систему вимірювання додаткової постійного навантаження, яке свідомо перевищує від'ємне значення тягового зусилля, з подальшою його фільтрацією. При дотриманні певних умов вимірювання такий метод забезпечує точність вимірювань, яка визначається, фактично, точністю вимірювальної системи (5%), що дає можливість точного визначення якості тягового зусилля.

6. Доведено адекватність математичної моделі лінійного синхронного двигуна високошвидкісного електротранспорту та прийнятих припущень, а також застосовність методу розрахунку тягового зусилля, що виникає в ньому, при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Даний доказ побудовано на порівнянні розрахункових і експериментально отриманих значень величини тягового зусилля для різних конструкцій лінійного синхронного двигуна без

ферромагнітного магнітопроводу зі збудженням від постійних магнітів екіпажу. Відхилення не перевищує 8%.

***Список опублікованих наукових праць за темою дисертаційної роботи.***

***Основні праці:***

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

***Додаткові праці:***

8. 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.
9. Ворошилов А. С. Тяговое усилие линейного синхронного двигателя / А. С. Ворошилов, В. А. Дзензерский, В. Ф. Новиков. // Тезисы докладов IX Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" Днепропетровск: ДИИТ. – 1996. – С. 154–155

10. Новиков В.Ф. Электродинамические параметры линейных синхронных двигателей для ВШНТ / В. Ф. Новиков, А. С. Ворошилов, В. В. Васильев. // Тезисы докладов IX Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта". Днепропетровск: ДИИТ – 1996. – С. 174.
11. Новиков В.Ф. 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". – С. 122.
12. Комаров С. В. 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.
13. Новиков В. Ф. 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.
14. Новіков В.Ф. Високошвидкісні транспортні системи з магнітним підвісом "MAGLEV"/ В.Ф. Новіков, С.В. Бурилов, В.Е. Воскобойник, В.О. Дзензерський. // 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.

### АНОТАЦІЯ

Новіков В.Ф. Визначення раціональних параметрів тягового лінійного двигуна для високошвидкісного електротранспорту. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2016.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню ефективних принципів і методів розрахунку раціональних параметрів та розробці основ практично застосовного в інженерній практиці методу розрахунку тягового лінійного електродвигуна зі збудженням від джерела постійного магнітного поля високошвидкісного електротранспорту.

Розроблена математична модель лінійного синхронного електродвигуна без феромагнітного магнітопроводу зі збудженням від постійних магнітів екіпажу базується на використанні залежності потокозчеплення джерела магнітного поля збудження з котушкою шляхової структури від їх взаємного розташування.

За допомогою розробленого розрахунково-експериментального методу та виготовленого стенду отримано залежності, у тому числі аналітичні, потокозчеплення джерела постійного магнітного поля з котушкою шляхової структури від їх взаємного розташування для різних конструктивних параметрів лінійного двигуна.

Розроблено методи розрахунку та вимірювання знакозмінного тягового зусилля,

що виникає в лінійному синхронному двигуні при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури, який дає можливість визначити залежність величини тягового зусилля від місця розташування транспортного засобу щодо шляхової структури в широкому діапазоні значень геометричних параметрів конструкції двигуна.

Ключові слова: лінійний синхронний двигун, високошвидкісний електротранспорт, постійний магніт, потокозчеплення, котушка шляхової структури.

### **АННОТАЦІЯ**

Новиков В.Ф. Определение рациональных параметров тягового линейного двигателя для высокоскоростного электротранспорта. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 - электротранспорт. - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2016.

Диссертация посвящена вопросу обоснования эффективных принципов и методов расчета рациональных параметров тягового линейного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов высокоскоростного электротранспорта и разработке основ практически применимого в инженерной практике метода расчета такого двигателя, основанный на разработанной математической модели линейного синхронного электродвигателя без ферромагнитного магнитопровода с возбуждением от постоянных магнитов экипажа. В данной модели в качестве базового показателя взаимодействия используется зависимость потокозчепления источника магнитного поля возбуждения с катушкой дорожной структуры от их взаимного расположения.

Разработан расчетно-экспериментальный метод определения зависимости потокозчепления источника магнитного поля возбуждения с катушкой путевой структуры от их взаимного расположения, который заключается в экспериментальном определении распределения индукции магнитного поля возбуждения в плоскости среднего витка путевой катушки с последующим интегрированием по её площади. При изменении границ интегрирования легко определяется магнитный поток (а соответственно и потокозчепление) через катушку любой формы и различного расположения на плоскости измерения.

Разработан и изготовлен стенд для экспериментального определения распределения индукции поля постоянного магнита возбуждения в плоскости среднего витка путевой катушки при различном расположении такой плоскости.

Получены зависимости, в том числе аналитические, потокозчепления источника постоянного магнитного поля с катушкой путевой структуры от их взаимного расположения для различных конструктивных параметров линейного двигателя.

На основе предложенной математической модели разработан метод расчета тягового усилия, возникающего в линейном синхронном двигателе при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры, который дает возможность определить зависимость величины тягового усилия от

местоположения транспортного средства относительно путевой структуры в широком диапазоне значений геометрических параметров конструкции двигателя.

Разработан метод измерения знакопеременного тягового усилия, возникающего при взаимодействии поля постоянного магнита системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры.

Адекватность математической модели и применимость методов расчёта тяговых усилий подтверждена путём проведения критического эксперимента на основе модифицированного критерия Поппера.

Ключевые слова: линейный синхронный двигатель, высокоскоростной электротранспорт, постоянный магнит, потокосцепление, катушка путевой структуры.

### **ABSTRACT**

Novikov V.F. Finding of rational parameters of the linear motor traction for high-speed electric vehicles. – The manuscript.

The dissertation for a degree of candidate of technical sciences in specialty 05.22.09 – electrical transport. – Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazarjan, Dnepropetrovsk, 2016.

Dissertation is devoted to the study of effective principles and methods of estimation of rational parameters and development of basics of practical engineering methodology of design of the traction linear synchronous motor with excitation from permanent magnetic field source for high speed vehicle.

Developed mathematical model of linear synchronous electromotor without ferromagnetic circuit with excitation from permanent magnets of vehicle is based on usage of dependence of flux linkage of the excitation magnetic field source and track coil from their mutual arrangement. With the help of developed calculated-experimental method and designed and made stand it was obtained the dependencies, including analytical, of the flux linkage of the permanent magnetic field source with a track coil from their arrangement for the various design parameters of the linear motor.

It was developed methods of calculation of the alternating driving force occurred in the linear synchronous motor in the presence of interaction between permanent magnetic field of exciting system of the vehicle and the track coil, which makes possibility to determine dependence of the driving force from vehicle position on the track in a wide range of geometrical design parameters of the motor. Appropriateness of mathematical model and applicability of methods for calculation of traction were validated with the help of experiments based on the modified Popper criterion.

Keywords: linear synchronous motor, high-speed electric transport, permanent magnet, flux linkage, track coil.

**НОВІКОВ ВОЛОДИМИР ФЕДОРОВИЧ**

**ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ТЯГОВОГО ЛІНІЙНОГО ДВИГУНА  
ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО  
ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Формат 60x84 1/16.

Ум. друк. арк. 0,75. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 пр.

Видавництво Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Свідоцтво  
суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.03

вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010