

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 621.313.17

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ В.Ф.Шинкаренко

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

**на тему: «Інноваційний синтез тягово-підйомного модуля для
високошвидкісного транспорту на електромагнітному підвісі»**

Виконав:

студент II курсу, групи ЕМ-81мн

Красовський Павло Олексійович _____

Керівник:

Зав. кафедри, д.т.н, професор

Шинкаренко Василь Федорович _____

Консультант:

Асистент, к.т.н.

Монахов Є.А. _____

Рецензент:

Професор, д.т.н.

Толочко О.І. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електромеханіки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою магістра

Спеціальність (спеціалізація) 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» («Електричні машини і апарати»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.Ф.Шинкаренко

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Красовському Павлу Олексійовичу

1. Тема дисертації: інноваційний синтез тягово-підйомного модуля для високошвидкісного транспорту на електромагнітному підвісі

2.

науковий керівник дисертації Шинкаренко В.Ф., д.т.н, професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «16» квітня 2020 р. № 1016-С

2. Термін подання студентом дисертації 15 травня 2020 р.

3. Об'єкт дослідження: тягові електромеханічні системи поступального руху, що реалізують функції тяги і підвісу,

4. Предмет дослідження: принципи структуроутворення модульних ЕМ-об'єктів; макрогенетична програма ЕМ-об'єктів; генетичні моделі синтезу; результати розрахункового аналізу; принцип групового симетрування тягової електромеханічної системи.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Здійснити аналіз тенденцій за напрямом дослідження. 2) Визначити генетичні принципи і рівні структуроутворення ЕМ-об'єктів модульного типу. 3) Розробити узагальнену генетичну модель синтезу модульних структур ЕМ поступального руху. 4) Визначити макрогенетичні програми ЕМ-об'єктів модульного типу. 5) Синтезувати варіанти структур тягово-підйомних модулів та обґрунтувати

вибір проектного варіанту. 6) Здійснити групову симетризацію фазних струмів тягової системи модульного типу. 7) Виконати електромагнітні розрахунки проектного варіанта модульного ЕМ-об'єкта.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 1) Мета, об'єкт і задачі досліджень та результати аналізу стану досліджень; 2) Генетичні принципи і макрогенетична програма структуроутворення модульних ЕМ-структур; 3) Узагальнена генетична модель ЕМ-об'єктів модульного виконання. 4) Генетична модель і результати синтезу. 5) Результати електромагнітних розрахунків. 6) Ескізний варіант спроектованого модуля.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1) Рівні структурної організації тягових електричних машин модульного типу; 2) Макрогенетична програма класу тягових електродвигунів модульного виконання; 3) Синтез модульних ЕМ-структур.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 3.3-3.5	Монахов Є.А., к.т.н.		

9. Дата видачі завдання 03.09.2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз проблеми, пошук літературних джерел	03.09.19 - 11.11.19	
2	Генетичний синтез модульного лінійного електродвигуна	12.11.19 – 15.12.19	
3	Електромагнітні розрахунки ЛІД	16.12.19 – 02.02.20	
4	Проходження переддипломної практики	03.02.20 – 08.03.20	
5	Групове симетрування модулів	09.03.20 – 21.03.20	
6	Розробка стартап-проекту	21.03.20 – 04.04.20	
7	Оформлення пояснювальної записки	05.04.30 – 21.04.20	
8	Оформлення графічної частини	22.04.20 – 08.05.20	

Студент

_____ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Робота за даною темою виконується вперше.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: 111 сторінок основного тексту, 26 таблиць, 34 рисунки, списку використаної літератури з 59 найменувань.

Актуальність теми: на сьогодні, в умовах жорсткої конкуренції галузь електротранспорту потребує інноваційних рішень для економії часу та удосконалення існуючих технологій. Виникає потреба швидкого реагування на запити суспільства в освоєнні сучасних транспортних технологій. Перспективним і актуальним напрямом реалізації поставлених задач, є створення і широке використання транспортних систем на магнітному підвісі, на основі модульних платформ і модульного принципу проектування тягового електромеханічного обладнання.

Тема магістерської дисертації входить до переліку напрямів спільних наукових досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського і Асоціації Польських електриків, відповідно до підписаної сторонами рамкової угоди.

Мета і задачі дослідження: метою дослідження є науково-технічне обґрунтування системного підходу до проектування модульних тягових електричних машин і його реалізація на прикладі лінійного індукторного тягово-підйомного модуля для високошвидкісної транспортної системи на магнітному підвісі.

Для досягнення поставленої мети здійснено постановку і розв'язання наступних задач: визначити генетичні принципи і рівні структуроутворення ЕМ-об'єктів модульного типу; розробити узагальнену генетичну модель синтезу модульних структур ЕМ поступального руху, визначити макrogenетичні програми ЕМ-об'єктів модульного типу; розробити уточнену генетичну модель багаторівневого синтезу тягово-підйомного модуля; синтезувати варіанти структур тягово-підйомних модулів та обґрунтувати вибір проектного варіанту; виконати електромагнітні розрахунки проектного варіанта модульного ЕМ-об'єкта; здійснити групову симетризацію фазних струмів тягової системи модульного типу.

Об'єкт дослідження: структури тягових електромеханічних систем поступального руху, що реалізують функції тяги і підвісу.

Предмет дослідження: принципи структуроутворення модульних електромеханічних об'єктів; макрогенетична програма електромеханічних структур модульного типу; домінуючі види ЕМ-об'єктів модульного типу; генетичні моделі і результати синтезу; обґрунтування і вибір проектного варіанта тягового модуля; результати розрахункового аналізу; принцип групового симетрування тягової електромеханічної системи.

Методи дослідження: структурно-системний підхід, положення теорії генетичної еволюції електромеханічних перетворювачів енергії, методи генетичного аналізу і синтезу електромагнітних структур, аналітичні методи електромагнітних розрахунків, математичне моделювання, еволюційні та комп'ютерні експерименти.

Наукова новизна одержаних результатів:

1) вперше встановлено, що модульний принцип структуроутворення має генетичну природу, проявляється на всіх рівнях складності ЕМ-структур, від хромосомного до системного і визначається генетичними механізмами реплікації і структурної ізомерії, що суттєво спрощує і формалізує пошукові процедури синтезу модульних ЕМ-об'єктів.

2) вперше визначено макрогенетичну програму модульних ЕМ-об'єктів поступального руху, за результатами аналізу якої визначено домінуючий Вид і розроблено узагальнену генетичну модель синтезу модульних структур.

3) вперше розроблено уточнену багаторівневу генетичну модель Виду PL 2.2x з використанням якої синтезовано модульну структуру тягового двофункціонального синхронного двигуна поступального руху;

4) з використанням принципу дисиметризації-симетризації Кюрі-Шубнікова, якому підпорядковані первинні джерела магнітного поля в межах довільних малих періодів ГК, розроблено метод групового симетрування

електромагнітно несиметричних елементарних модулів лінійного індукторного двигуна, що дозволило збільшити тягову силу на 21%.

Апробація результатів дисертації: матеріали магістерської дисертації доповідалися і обговорювалися на Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (2018 – 2019 р.р.); XX International Students R&D Conference, 28 November, 2019 (КПІ ім. Ігоря Сікорського); підсумковій науковій конференції II туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт за спеціальністю «Електричні машини і апарати» (КрНУ ім. Михайла Остроградського, м. Кременчук, 2019); XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси «ІРТК-2020», 19 – 20 травня, НАУ (м. Київ).

Публікації: основні наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковано у 9 наукових працях (2 без співавторів), з них: 1 – у науковому фаховому виданні України, 6 тез доповідей у збірниках матеріалів Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних конференцій; 2 – у заявках на винахід і корисну модель (знаходяться на експертизі в Укрпатенті).

Ключові слова: лінійний індукторний двигун, реплікація, структурна ізомерія, макрогенетична програма, модульний принцип, генетичний синтез, групова симетризація, магнітне поле.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 111 страниц основного текста, 26 таблиц, 34 рисунков, списка использованной литературы из 59 наименований.

Актуальность темы: сегодня, в условиях жесткой конкуренции отрасль электротранспорта нуждается в инновационных решениях для экономии времени и усовершенствования существующих технологий. Возникает потребность быстро реагировать на запросы общества в освоении современных транспортных технологий. Перспективным и актуальным направлением реализации поставленных задач, является создание и широкое использование транспортных систем на магнитном подвесе, на основе модульных платформ и модульного принципа проектирования тягового электромеханического оборудования.

Тема магистерской диссертации входит в перечень направлений совместных исследований КПИ им. Игора Сикорского и Ассоциации польских электриков, в соответствии с подписанным сторонами рамочного соглашения.

Цель и задачи исследования: целью исследования является научно-техническое обоснование системного подхода к проектированию модульных тяговых электрических машин и его реализация на примере линейного индукторного тягово-подъемного модуля для высокоскоростной транспортной системы на магнитном подвесе.

Для достижения поставленной цели осуществлена постановка и решение следующих задач: определить генетические принципы и уровни структурообразования ЭМ-объектов модульного типа; разработать обобщенную генетическую модель синтеза модульных ЭМ-структур поступательного движения, определить макрогенетические программы ЭМ-объектов модульного типа; разработать уточненную генетическую модель многоуровневого синтеза тягово-подъемного модуля; синтезировать

варианты структур тягово-подъемных модулей и обосновать выбор проектного варианта; выполнить электромагнитные расчеты проектного варианта модульного ЭМ-объекта; осуществить групповую симметризацию фазных токов тяговой системы модульного типа.

Объект исследования: структуры тяговых электромеханических систем поступательного движения, реализующие функции тяги и подвеса.

Предмет исследования: принципы структурообразования модульных электромеханических объектов; макрогенетическая программа электромеханических структур модульного типа; доминирующие виды ЭМ-объектов модульного типа; генетические модели и результаты синтеза; обоснование и выбор проектного варианта тягового модуля; результаты расчетного анализа; принцип группового симметрирования тяговой электромеханической системы.

Методы исследования: структурно-системный подход, положения теории генетической эволюции электромеханических преобразователей энергии, методы генетического анализа и синтеза электромагнитных структур, аналитические методы электромагнитных расчетов, математическое моделирование, эволюционные и компьютерные эксперименты.

Научная новизна полученных результатов:

1) впервые установлено, что модульный принцип структурообразования имеет генетическую природу, проявляется на всех уровнях сложности ЭМ-структур, от хромосомного до системного и определяется генетическими механизмами репликации и структурной изомерии, что существенно упрощает и формализует поисковые процедуры синтеза модульных ЭМ-объектов.

2) впервые определено макрогенетическую программу модульных ЭМ-объектов поступательного движения, по результатам анализа которой

определено доминирующий Вид и разработана обобщенная генетическая модель синтеза модульных структур.

3) впервые разработано уточненную многоуровневую генетическую модель Вида PL 2.2x с использованием которой синтезирована модульная структура тягового двухфункционального синхронного двигателя поступательного движения;

4) с использованием принципа дисиметризации-симетризации Кюри-Шубникова, которому подчинены первичные источники магнитного поля в пределах произвольных малых периодов ГК, разработан метод группового симметрирования электромагнитно несимметричных элементарных модулей линейного индукторного двигателя, что позволило увеличить тяговую силу на 21%.

Апробация результатов диссертации: материалы магистерской диссертации докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электроэнерготехники и автоматики» (2018 - 2019 г.г.); XX International Students R&D Conference, 28 November, 2019 (КПИ им. Игоря Сикорского) итоговой научной конференции II тура Всеукраинского конкурса студенческих научных работ по специальности «Электрические машины и аппараты» (КрНУ им. Михаила Остроградского, м. Кременчуг, 2019); XIII Международный научно-технической конференции «Интегрированные интеллектуальные робототехнические комплексы» ИИРТК-2020 », 19 - 20 мая, НАУ (г.. Киев).

Публикации: основные научные положения, результаты и выводы диссертационной работы опубликованы в 9 научных работах (2 без соавторства), из них: 1 – в научном профессиональном издании Украины, 6 тезисов докладов в сборниках материалов международных и Всеукраинских научно-технических конференций; 2 – заявках на изобретение и полезную модель (находятся на экспертизе в Укрпатенте).

Ключевые слова: линейный индукторный двигатель, репликация, структурная изомерия, макрогенетична программа, модульный принцип, генетический синтез, групповая симетризации, магнитное поле.

ABSTRACT

The master's thesis contains of 111 pages, 26 tables, 34 figures, a list of literature on 59 titles.

Relevance of the topic: today, in the face of fierce competition, the electric transport industry needs innovative solutions to save time and improve existing technologies. There is a need to quickly respond to the needs of society in the development of modern transport technologies. A promising and relevant direction for the implementation of the tasks is the creation and widespread use of transport systems with magnetic suspension, based on modular platforms and the modular design principle of traction electromechanical equipment.

The topic of the master's thesis is included in the list of areas of joint research Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute and the Association of Polish Electricians, in accordance with the framework agreement signed by the parties.

Purpose and objectives of research: The aim of the study is the scientific and technical substantiation of a systematic approach to the design of modular traction electric machines and its implementation on the example of a linear induction traction and lifting module for a high-speed transport system with a magnetic suspension.

To achieve this goal, the following tasks were formulated and solved: to determine the genetic principles and levels of structure formation of modular type EM objects; to develop a generalized genetic model for the synthesis of modular EM structures of translational motion, to determine the macrogenetic programs of EM objects of a modular type; to develop an updated genetic model of a multi-level synthesis of a traction and lifting module; to synthesize the structures of the traction and lifting modules and justify the choice of the design option; perform electromagnetic calculations of the design version of a modular EM object; to carry out group symmetrization of phase currents of a traction system of a modular type. **Object of research:** structures of traction electromechanical systems of translational motion, realizing the functions of traction and suspension.

Subject of reseach: principles of structure formation of modular electromechanical objects; macrogenetic program of electromechanical structures of a modular type; dominant types of EM objects of a modular type; genetic models and synthesis results; substantiation and selection of the design variant of the traction module; calculation analysis results; principle of group symmetrization of traction electromechanical system.

Research methods: structural-systematic approach, the provisions of the theory of genetic evolution of electromechanical energy converters, methods of genetic analysis and synthesis of electromagnetic structures, analytical methods of electromagnetic calculations, mathematical modeling, evolutionary and computer experiments.

Scientific novelty of the results:

1) it was first established that the modular principle of structure formation is of a genetic nature, manifests itself at all levels of complexity of EM structures, from chromosomal to systemic and is determined by the genetic mechanisms of replication and structural isomerism, which greatly simplifies and formalizes the search procedures for the synthesis of modular EM objects.

2) for the first time, the macrogenetic program of modular EM objects of translational motion was determined, the analysis of which determined the dominant species and developed a generalized genetic model for the synthesis of modular structures.

3) for the first time, an updated multi-level genetic model of Type PL 2.2x was developed using which the modular structure of a traction two-functional synchronous translational motion engine was synthesized;

4) using the Curie-Shubnikov principle of disimetrization-symmetrization, to which the primary sources of the magnetic field are subordinate within arbitrary small GC periods, a group symmetry method for the electromagnetically asymmetric elementary modules of a linear induction motor has been developed, which has increased the traction force by 21%.

Approbation of the results: materials of the master's thesis were presented and discussed at the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Graduate Students and Students “Modern Problems of Electric Power Engineering and Automation” (2018 - 2019); XX International Students R&D Conference, November 28, 2019 (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute); on the final scientific conference of the 2nd round of the Ukrainian competition of student research papers specializing in Electrical Machines and Devices (Mikhailo Ostrogradsky KrNU, Kremenchuk, 2019); XIII International Scientific and Technical Conference "Integrated Intelligent Robotic Systems" IIRS-2020 ", May 19 - 20, NAU (Kiev).

Publications: the main scientific provisions, results and conclusions of the research work are published in 9 scientific papers (2 without co-authorship), of which: 1 - in the scientific professional publication of Ukraine, 6 abstracts in collections of materials of international and Ukrainian scientific and technical conferences; 2 - applications for an invention and utility model (they are under examination in Ukrpatent).

Key words: linear induction motor, replication, structural isomerism, macrogenetic program, modular principle, genetic synthesis, group symmetrization, magnetic field.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	16
Розділ 1. Аналіз напрямів досліджень і розробок тягових електромеханічних систем для високошвидкісного транспорту на магнітному підвісі	17
1.1 Тенденції розвитку тягових електромеханічних систем.....	17
1.2 Еволюція транспортних систем з магнітним підвісом.....	18
1.3 Модульність як сучасний напрям технічного прогресу.....	25
1.4. Модульний принцип в електромеханіці	29
Висновки до розділу 1	32
Розділ 2. Принципи структуроутворення і генетичний синтез лінійного індукторного двигуна модульного типу	34
2.1 Принципи і рівні структуроутворення модульних електромеханічних структур.....	34
2.2. Область існування і макрогенетична програма електромеханічних систем модульного типу.....	38
2.3. Рівні структурної організації модульних ЕМ-об'єктів	43
2.4. Узагальнена генетична модель структуроутворення модульних ЕМ-об'єктів в межах довільного Виду електромеханічної системи	46
2.5 Уточнена генетична модель синтезу безконтактного лінійного тягового синхронного двигуна модульного типу	48
2.6 Синтез структурних варіантів лінійного індукторного двигуна.....	49
Висновки до розділу 2	53
Розділ 3. Електромагнітні розрахунки лінійного тягового синхронного двигуна модульного типу	55
3.1 Вихідні дані.....	55
3.2 Електромагнітний розрахунок	55
3.3 Комп'ютерне моделювання модуля ЛІД	72
3.4 Розрахунок зусиль магнітного тяжіння і механічних зусиль, що діють на вторинний елемент.....	75

3.5 Розрахунок маси модуля та ККД.....	77
3.6 Опис конструкції модуля двигуна та схеми підключення.....	79
Висновки до розділу 3	81
Розділ 4. Групова симетризація електромагнітно несиметричних модулів лінійних тягових двигунів	82
4.1 Огляд систем з груповою симетризацією	82
4.2 Генетична природа кінцевих ефектів.....	83
4.3 Фізична природа поздовжнього кінцевого ефекту	88
4.4 Метод групового симетрування електромеханічних модулів	90
4.5 Комп'ютерне моделювання симетризованого з'єднання модулів	93
Висновки до розділу 4	94
Розділ 5. Розробка стартап-проекту	96
5.1 Опис проекту	96
5.2 Технічний аудит ідеї проекту.....	97
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	98
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	102
5.5 Розробка маркетингової стратегії стартап-проекту	105
Висновки до розділу 5	107
Висновки	108
Перелік посилань.....	110
Додаток А. Технічне завдання	116
Додаток Б. Список опублікованих наукових праць	117
Додаток В. Копія диплому переможця Всеукраїнського конкурсу	119
Додаток Г. Копія диплому ФЕА за кращу наукову доповідь	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

EDS – електродинамічна система;
EMS – електромагнітна система;
ГК – генетична класифікація
Е-системи – електричні і електромеханічні системи;
ЕМ – електрична машина;
ЕМПЕ – електромеханічний перетворювач енергії;
ЕМ-об'єкт – електромеханічний об'єкт;
ЕМ-структура – електромеханічна структура;
ЕРС – електрорушійна сила;
КЕ – кінцевий ефект;
КЗ – коротке замикання;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ЛАД – лінійний асинхронний двигун;
ЛІД – лінійний індукторний двигун;
МГД – магнітогідродинамічний;
ОЗ – обмотка збудження;
ОКБ ЛЕД – Особливе конструкторське бюро лінійних електродвигунів;
ПДП – первинне джерело поля;
ТСД – тяговий синхронний двигун;
ХХ – холостий хід.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТРАНСПОРТУ НА МАГНІТНОМУ ПІДВІСІ

1.1 Тенденції розвитку тягових електромеханічних систем

За майже 200 років розвитку електромеханіки люди створили сотні мільйонів різноманітних електромагнітних перетворювачів енергії. У сучасному світі електричні машини супроводжують нас усюди: від смартфона чи розумного годинника [1] до надпотужних генераторів атомних електростанцій [2], від мікроскопічних роботів, що імплантуються в тіло людини [3] до персонального [4] та громадського електротранспорту, що полонить великі міста. Людство потребує не лише нарощення кількості вже існуючих типів, а й створення якісно нових видів перетворювачів електричної енергії.

За останні декілька десятиліть активно розвивалися технології створення систем безконтактного керування ЕМ, використання нових магнітних матеріалів $RCo5$ та $NdFeB$ з великою коерцитивною силою, підвищення енергетичних показників, розробки нових конструкційних та ізоляційних матеріалів.

Автомобільний транспорт, що за останні роки все активніше переходить на електричну тягу [5] також створює великий попит на розробку і виготовлення електричних машин. Окрім цього традиційно «електрифікований» транспорт: залізничний, міський електротранспорт активно розвивається і потребує, як розробки і вдосконалення існуючих типів електричних машин для вже існуючих систем (наприклад заміна двигунів тролейбуса при модернізації [6]), розробки і адаптації до нових систем (поїзд на водневих паливних елементах Coradia iLint [7]), а також створення нових підходів у використанні електричної енергії для тяги, наприклад вже

запущена в комерційну експлуатацію система поїздів на магнітній подушці Maglev [8] та перспективна технологія вакуумних поїздів Hyperloop [9].

Перспективним напрямком є створення модульних електричних машин, що дозволяє на основі використання модульних платформ і уніфікованих вузлів та елементів створювати конкурентоздатні технологічно взаємопов'язані ряди електричних машин з широким діапазоном потужностей.

1.2 Еволюція транспортних систем з магнітним підвісом

В 1902 році німецький винахідник Альфред Зеден отримав патент на конструкцію поїзда, оснащеного лінійним двигуном. А вже через чотири роки Франклін Скотт Сміт розробив ще один ранній прототип поїзда на електромагнітному підвісі. Трохи пізніше, в період з 1934 року по 1941 рік, ще кілька патентів на потяги, оснащених лінійними електродвигунами, отримав німецький інженер Герман Кемпер [10].

В кінці 1940-х років дослідники перейшли від слова до діла. Британському інженеру Еріку Лейтвейту, якого багато хто називає «батьком Маглева», вдалося розробити перший робочий повнорозмірний прототип лінійного асинхронного двигуна. Пізніше, в 1960-х роках, він приєднався до розробки швидкісного поїзда Tracked Hovercraft. Але, на жаль, в 1973 році проект закрили через брак коштів [11].

В 1966 році у Києві на території ВДНГ була побудована перша в світі транспортна система естакадного типу з лінійними електродвигунами для перевезення пасажирів (рис. 1.1 а). Проект реалізовано інженерами Київського заводу електротранспорту у співпраці з вченими Київського політехнічного інституту О.Г. Шаповаленком, К.О. Биковим, О.І. Вишнікіним та С.О. Ребровим. За два роки було створено дослідне конструкторське бюро лінійних електродвигунів (ОКБ ЛЕД) з власним полігоном під Києвом (рис. 1.1 б) [12].



Рис. 1.1 Перша у світі пасажирська транспортна система з лінійними двигунами (Київ) (а) та полігон ОКБ ЛЕД (б)

На той час, за рівнем науково-технічного оснащення та за технічними можливостями щодо проведення повномасштабних динамічних випробувань систем швидкісного електротранспорту з тяговими електродвигунами, полігон ОКБ ЛЕД не мав аналогів ні в СРСР, ні в Європі. Вперше на дослідному полігоні були проведені динамічні випробування систем рейкового і естакадного електротранспорту з тяговими ЛАД потужністю 120, 360, 480, 600, 800 та 1200 кВт [13]. Конструкторами ОКБ ЛЕД вперше була створена і випробувана повномасштабна платформа на основі синхронних індукторних двигунів модульного типу (рис. 1.2).

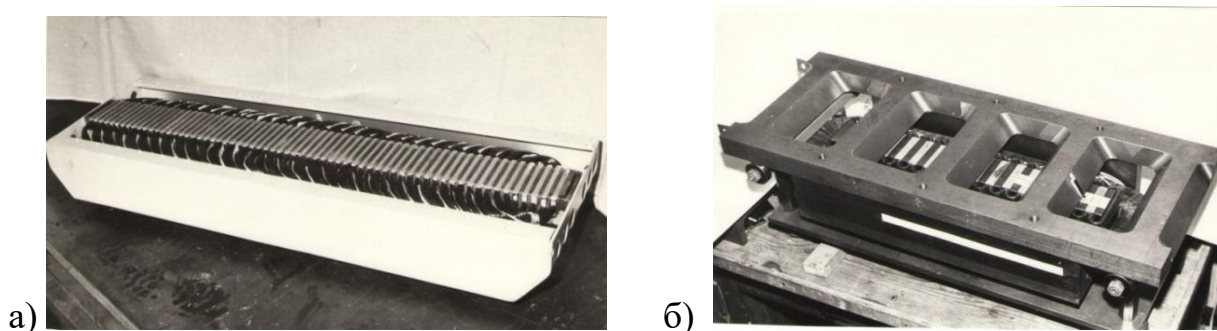


Рис. 1.2 Тягово-підйомний індукторний модуль ОКБ ЛЕД для пасажирської транспортної системи на магнітному підвісі: а) модуль якоря; б) модуль двигуна з секцією явнополюсного вторинного елемента.

У 1979 році з'явився перший в світі прототип поїзда на магнітній подушці, ліцензований для надання послуг з перевезення пасажирів –

Transrapid 05. Випробувальний трек довжиною 908 м був побудований в Гамбурзі і представлений в ході виставки IVA 79. Інтерес до проекту виявився настільки великий, що Transrapid 05 вдалося успішно пропрацювати ще три місяці після закінчення виставки і перевезти в цілому близько 50 тис. пасажирів. Максимальна швидкість цього поїзда становила 75 км/год.

В тому ж році на 36 метровому тестовому полігоні в Раменському під Москвою розпочалися випробування першого радянського поїзда на магнітному підвісі ТП-01 з тяговими лінійними асинхронними двигунами ОКБ ЛЕД. Згодом полігон було розширено та побудовано ще декілька поїздів. Останній з них ТП-05 (рис. 1.3) був призначений для використання на лінії Єреван-Абовян, що будувалася. Але через землетрус у Вірменії 1988 року та подальший розвал Радянського Союзу проект припинив своє існування [14].



Рис. 1.3 Дослідний магнітоплан ТП-05 на полігоні у Раменському

Перший комерційний магнітоплан з'явився в 1984 році в Бірмінгемі, Англія. Транспортна лінія на магнітному підвісі з'єднувала термінал міжнародного аеропорту Бірмінгема і розташовану поруч залізничну станцію. Вона успішно пропрацювала з 1984 по 1995 рік. Протяжність лінії

становила всього 600 м, а висота, на яку склад з лінійним асинхронним двигуном піднімався над полотном – 15 міліметрів [15].

В основі технології магнітного підвісу лежать три основні підсистеми: левітації, стабілізації і прискорення. У той же час на даний момент існує дві основні технології магнітного підвісу і одна експериментальна, доведена лише на папері.

Потяги, побудовані на базі технології електромагнітного підвісу (EMS) (рис 1.4 б) для левітації використовують електромагнітне поле, сила якого змінюється за часом. При цьому практична реалізація даної системи дуже схожа на роботу звичайного залізничного транспорту. Тут застосовується Т-подібне рейкове полотно, виконане з провідника (в основному металу), але поїзд замість колісних пар використовує систему електромагнітів – опорних і напрямних. Опорні та напрямні магніти при цьому розташовані паралельно до феромагнітного статора, розміщеного на краях Т-подібного полотна.

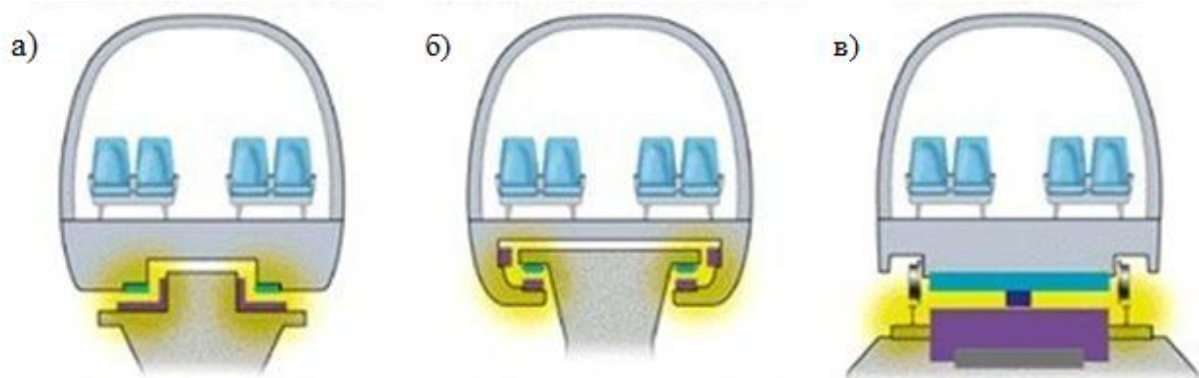


Рис. 1.4 Технології магнітного підвісу: а) електродинамічна (EDS);
б) електромагнітна (EMS); в) Inductrack [16]

Головний недолік технології EMS – відстань між опорним магнітом і статором, яка становить 15 міліметрів і має контролюватися і коригуватися спеціальними автоматизованими системами в залежності від безлічі факторів, включаючи непостійну природу електромагнітної взаємодії. До слова, працює система левітації завдяки батареям, встановленим на борту поїзда, які заряджаються лінійними генераторами, вбудованими в опорні

магніти. Таким чином, в разі зупинки потяг зможе досить довго левітувати на батареях. На базі технології EMS побудовані поїзди Transrapid і, зокрема, шанхайський Маглев (рис 1.5 а).

Потяги на базі технології EMS приводяться в рух і здійснюють гальмування за допомогою синхронного лінійного двигуна низького прискорення, представленого опорними магнітами і полотном, над яким летить магнітоплан. За великим рахунком, система руху, вбудована в полотно, являє собою звичайний статор (нерухома частина лінійного електродвигуна), а опорні електромагніти, в свою чергу, працюють в якості якоря електродвигуна. Таким чином, замість отримання крутного моменту, змінний струм в котушках генерує магнітне поле збуджуючих хвиль, яке безконтактно переміщує поїзд. Зміна сили і частоти змінного струму дозволяє регулювати тягу і швидкість. При цьому щоб уповільнити хід, потрібно змінити напрям магнітного поля.



Рис 1.5 Високошвидкісні поїзди на магнітному підвісі:

а) Transrapid 08 (Китай) та б) JR-Maglev L0 (Японія)

У разі застосування технології електродинамічного підвісу (EDS) (рис. 1.4 а) левітація здійснюється при взаємодії магнітного поля в полотні й поля, створюваного надпровідними магнітами на борту. На базі технології EDS побудовані японські поїзди JR-Maglev (рис. 1.5 б). На відміну від технології EMS, в якій застосовані звичайні електромагніти і котушки проводять струм тільки в той момент, коли підключені до джерела живлення, надпровідні

електромагніти можуть проводити струм навіть після того, як джерело живлення було відключено, наприклад, в разі відключення електроенергії. Охолоджуючи котушки до температур при яких виникає ефект надпровідності в системі EDS можна заощадити досить багато енергії. Проте, кріогенна система охолодження, яка використовується для підтримки низьких температур в котушках, може виявитися досить дорогою.

Головною перевагою системи EDS є висока стабільність – при незначному скороченні відстані між полотном і магнітами виникає сила відштовхування, яка повертає магніти в початкове положення, в той же час збільшення відстані знижує силу відштовхування і підвищує силу тяжіння, що знову ж таки веде до стабілізації системи. У цьому випадку ніякої електроніки для контролю і коригування відстані між поїздом і полотном не потрібно.

Щоправда, без недоліків тут також не обійшлося – достатня для левітації поїзда сила виникає тільки на великих швидкостях. З цієї причини поїзд на системі EDS повинен бути оснащений колесами, які зможуть забезпечувати рух при низьких швидкостях (до 100 км/год). Відповідні зміни також повинні бути внесені по всій довжині полотна, так як поїзд може зупинитися в будь-якому місці в зв'язку з технічними несправностями.

Ще одним недоліком EDS є те, що при низьких швидкостях в передній і задній частинах відштовхуючих магнітів в полотні виникає сила тертя, яка діє проти них. Це одна з причин, по якій в JR-Maglev відмовилися від повністю відштовхуючої системи і подивилися в бік системи бокової левітації. Варто також відзначити, що сильні магнітні поля в секції для пасажирів породжують необхідність установки магнітного захисту. Без екранування подорож в такому вагоні для пасажирів з електронним стимулятором серця або магнітними носіями інформації (HDD і кредитні картки), протипоказана. Підсистема прискорення в поїздах на базі технології

EDS працює точно також, як і в складах на базі технології EMS за винятком того, що після зміни полярності статори тут на мить зупиняються.

Третьою, найбільш близькою до реалізації технологією, яка існує поки тільки на папері, є варіант EDS з постійними магнітами Inductrack (рис 1.4 в), для активації яких не потрібна енергія. До недавнього часу дослідники вважали, що постійні магніти не володіють достатньою для левітації поїзда силою. Однак цю проблему вдалося вирішити шляхом розміщення магнітів у так званий «масив Хальбаха» [17]. Магніти при цьому розташовані таким чином, що магнітне поле виникає над масивом, а не під ним, і здатні підтримувати левітацію поїзда на дуже низьких швидкостях – близько 5 км/год. Правда, вартість таких масивів з постійних магнітів дуже висока, тому поки і не існує жодного комерційного проекту даного роду.

Багато країн продовжують інвестувати кошти в проекти зі створення високошвидкісних залізничних магістралей. Не так давно в Японії було відновлено швидкісні випробування поїзда на магнітній подушці Maglev L0, який увійде в експлуатацію до 2027 року [18].

Окрім вищезгаданих високошвидкісних систем існують також і тихохідні транспортні системи на магнітному підвісі.

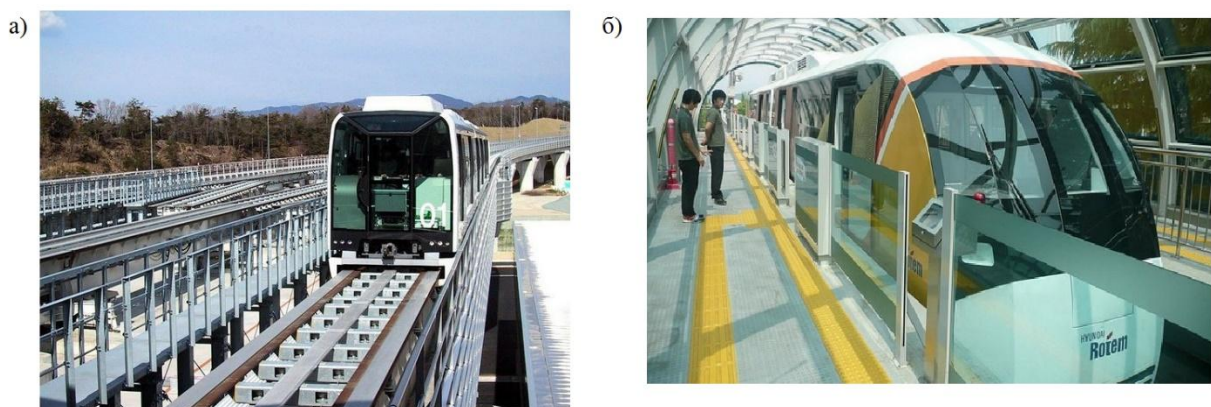


Рис. 1.6 Міські поїзди на магнітному підвісі:

а) Linimo (Японія) та б) UTM-02 (Південна Корея)

Поїзд на магнітній подушці Linimo [19], експлуатація якого почалася в березні 2005 року, був розроблений компанією Chubu HSST і досі

використовується в Японії. Він курсує між двома містами префектури Аїті. Протяжність полотна, над яким летить поїзд становить близько 9 км (9 станцій). При цьому максимальна швидкість Linimo дорівнює 100 км/год. Це не завадило йому тільки протягом перших трьох місяців з моменту запуску перевезти понад 10 млн пасажирів.

Ще одна залізнична лінія на магнітному підвісі успішно експлуатується в місті Теджон, Південна Корея [20]. UTM-02 став доступний пасажиром 21 квітня 2008 року, а на його розробку і створення пішло 14 років. Залізнична лінія на магнітному підвісі з'єднує Національний музей науки і виставковий парк, відстань між якими всього лише 1 км.

1.3 Модульність як сучасний напрям технічного прогресу

Передвісник модульного принципу в сучасній техніці відомий ще з початку XIX століття, коли Елі Уїтні запропонував конгресу США технологію виробництва однакових пістолетів [21]. А в 1910 році американське «Товариство автомобільних інженерів» вже запропонувало здійснити стандартизацію в рамках цілої галузі. Вони пропонували забезпечити сумісність деталей різних автовиробників. Але через спротив останніх їхня пропозиція була відхилена.

До початку XX-го століття промисловість змогла відпрацювати масове виробництво конструкцій з використанням стандартизованих і замінних технологічних вузлів. Хоча це були переважно конструкції типу component-swapping modularity (два або більше альтернативних компонентів можуть поєднуватися з одним і тим же базовим продуктом), component-sharing modularity (два або більше компонентів можуть використовуватися всередині різних продуктів), cut-to-fit modularity або fabricate-to-fit modularity (один або кілька стандартних компонентів використовуються з довільними додатковими компонентами), а також bus modularity (продукт, що володіє

двома або більше областями контакту, може з'єднуватися з будь-яким поєднанням компонентів з певного набору) [22].

Теоретичні основи модульного виробництва, визначені Г. Шлезінгером (Schlesinger) і Ф. Кенігсбергера (Koenigsberger) в 1930 році як «das Baukasten System». Головним завданням впровадження модульної архітектури в цей період вбачалася раціоналізація розробки і виробництва продукції, перехід до більш економічного і швидкого шаблонного проектування. Спочатку модульні конструкції застосовувалися в машинобудуванні. У 1920-ті роки були створені модульні конструкції токарних і фрезерних верстатів, секційні конструкції використовувалися в транспортному машинобудуванні (на одне шасі ставилися кузова різних виробників) і т.д.

У 1960-і роки почався перехід до наступного етапу розвитку модульного виробництва – створення модульних платформ. Почалася перша «модульна революція». Вона проявилася як перехід не просто до модульних конструкцій, а до модульних платформ, тобто до складання готових виробів з модулів-блоків, що мають стандартизовані інтерфейси, жорстку прив'язку до потрібних функцій, які, тим не менш, не пов'язані з індивідуально заданими продуктом. А тому ці модулі (отже, і функції) можуть бути використані при конструюванні та виробництві не тільки конкретно цієї, а й інших видів продукції. Виробництво тільки в цей момент по-справжньому зробило крок від стандартизації до модульності, відкривши величезний комплекс нових можливостей для масового випуску. Модульні платформи дозволили досягти індивідуалізації продукції, що випускається, не стільки за рахунок включення унікальних компонентів, скільки завдяки оригінальному комбонуванню стандартизованих модулів, з'єднаних через стандартизовані інтерфейси. Це в свою чергу ще раз прискорило проектування продукції, знову дозволило знизити витрати при її виробництві, забезпечити управління якістю навіть в умовах розрізнення виробництва окремих модулів і їх компонентів, а також полегшити сервісне обслуговування та модернізацію продукції.

Якщо перший етап розвитку модульного виробництва можна умовно назвати етапом «раціоналізації», то другий етап – період освоєння модульних інструментів – «управління складністю» (management of complexity), підвищення гнучкості реагування виробництва на ринкові зміни. Таким чином, якщо в 1900-1950-х роках йшло накопичення модульних рішень, то 1960-1980-ті стали часом формування модульних платформ, відпрацювання методик їх проектування і використання. [23]

У 1960-х в технічній літературі пройшла широка дискусія з приводу можливостей модульного виробництва, сформувався комплекс уявлень про платформи, сімейства (серії) продуктів. В теорії на зміну терміну «блок» (building block system/das Baukasten System) прийшов термін «модуль» (modul).

У 1962 році архітектор, інженер і соціолог К. Александер (Alexander) опублікував свою фундаментальну роботу про шаблони проектування. У 1969 році Бранкамп (Brankamp) і Герман (Herrmann) описали ієрархічні модульні конструкції. Приблизно в цей же час модульне конструювання отримало подальший розвиток в математичному оформленні: американський математик Ульф Гренадер (Grenander) сформулював теорію паттернів (pattern theory) [24], яка відкрила можливості для розширення модульного проектування в програмному забезпеченні.

Першими галузями, в яких сформувалися розвинені модульні «платформи», виявилися самі кастомізовані і самі інформатизовані галузі, пов'язані з серійним виробництвом складної техніки: електроніка, зв'язок, автомобілебудування (зокрема, серед компаній, одними з перших реалізували стратегії переходу до модульних платформ, були IBM, Sony, Honda та ін.). За ними модульний підхід почав широко застосовуватися в індустрії інженерних систем споруд (HVAC), судно- та авіабудуванні (відповідно, серед компаній, що реалізують модульне проектування і виробництво

виділилися такі, як Boeing, Chrysler, Ford, Motorola, Swatch, Microsoft, Conti Tires і ін.).

Але далі за всіх в модульному виробництві на базі модульних платформ все ж просунулася електроніка, виробництво комп'ютерів. Компанії в цій галузі реально перейшли від «мислення портфелем продуктів» (portfolio thinking) до «мислення платформами» (platform thinking). Причому відмовитися від переходу до використання модульних платформ виявилось неможливо. Без цього не можна добитися масової кастомізації.

Зростання «модульного ентузіазму» почало затухати до 1990-х років. З одного боку, перехід до модульних конструкцій став здійснюватися в масовому порядку в усіх галузях, де широкого поширення набув виробничий аутсорсинг, і де конструкція вироблених продуктів була досить складною. Тим самим, на ринку з'явилися ті, кого називають «пізніми послідовниками». Ефективність застосування нових виробничих технологій в умовах, коли до них переходять всі і повсюдно, виявилася відносною. довелося констатувати, що модульність не вирішує величезної кількості виникаючих виробничих задач. З іншого боку, модульне виробництво зіткнулося з проблемою «перевиробництва» модулів і модульних платформ. Всі ці причини, а також заміна в 1990-і роки ранніх версій «бережливого» виробництва більш просунутим варіантом «бережливого збалансованого» виробництва, впровадження управління всім життєвим циклом, вимагали оптимізувати модель модульного виробництва і запустити етап заміни простих модульних платформ уніфікованими модульними платформами. Це ще не «відкрита» модульна архітектура, але базою збирання продукції є зовсім не унікальні, а стандартизовані модулі, нерідко застосовні для збирання і на інших платформах. [25]

Уніфікація, скорочення числа модифікацій модулів і платформ, ієрархічні системи поставок, спрямовані на зменшення кількості постачальників на кожному рівні, а також скорочення числа

використовуваних платформ [26] при підвищенні гнучкості їх реагування, зростання числа модифікацій на базі кожної окремої платформи стали трендом, що визначає розвиток модульного виробництва в 1990-2000-і роки. Цей період був надзвичайно продуктивним для розвитку модульного виробництва. За лідерами у використанні модульних конструкцій рушили компанії, які не були лідерами в «модуляризованих» галузях (наприклад, в автопромі спеціальні програми з розвитку модульних виробництв в 1990-2000-і реалізували Scania, Volkswagen і Mercedes-Benz (згодом DaimlerChrysler), Fiat та ін.) [27]. Наступним етап у розвитку модульного виробництва пережило верстатобудування. На даний момент в стадію формування модульних платформ входить будівництво.

1.4. Модульний принцип в електромеханіці

Модульний принцип широко використовується як один з ефективних напрямів структурно-функціональної оптимізації, стандартизації, уніфікації і дизайну технічних об'єктів. В методології проектування модульний підхід орієнтований на максимальне використання однотипних вузлів (або елементів), при створенні складних систем, в умовах сучасного автоматизованого виробництва [3]. Практична реалізація модульного принципу втрачає сенс при проектуванні одного механізму або однієї машини. Тільки в умовах розробки серій машин, або машин багатоцільового призначення, з використанням обмеженої кількості уніфікованих вузлів, останні набувають статусу структурно-функціональних модулів. Стосовно використання модульного принципу в об'єктах електромеханіки, відомі публікації присвячено питанням розрахунку і вибору параметрів, обґрунтуванню та удосконаленню окремих функціональних типів електромеханічних модулів [28-31], аналізу їх техніко-експлуатаційних характеристик [32], а також дослідженню динамічної стійкості руху виконавчого органу модульної ЕМ-системи [33].

Уніфікація в електричних машинах має широке застосування, про що свідчить серійне виробництво з використанням уніфікованих типорозмірів в залежності від висоти осі обертання. Вагомий внесок в конструювання модульних тягових електричних машин поступального руху, зроблено конструкторами ОКБ ЛЕД.

Конструкторами ОКБ вперше було створено і випробувано тягові ЛАД модульного виконання для пасажирської транспортної системи з активною шляховою структурою (рис. 1.7 а), а також для тягової системи конвеєрних потягів Рибальського гранітного кар'єру (Дніпропетровська обл.) і тягового електроприводу системи слябоподачі (рис. 1.7 б) Новокраматорського металургійного заводу (НКМЗ) [13]. На рис. 1.7 показані перші в СРСР повномасштабні тягові двигуни модульного виконання для пасажирського і промислового електротранспорту з активною шляховою структурою [13].

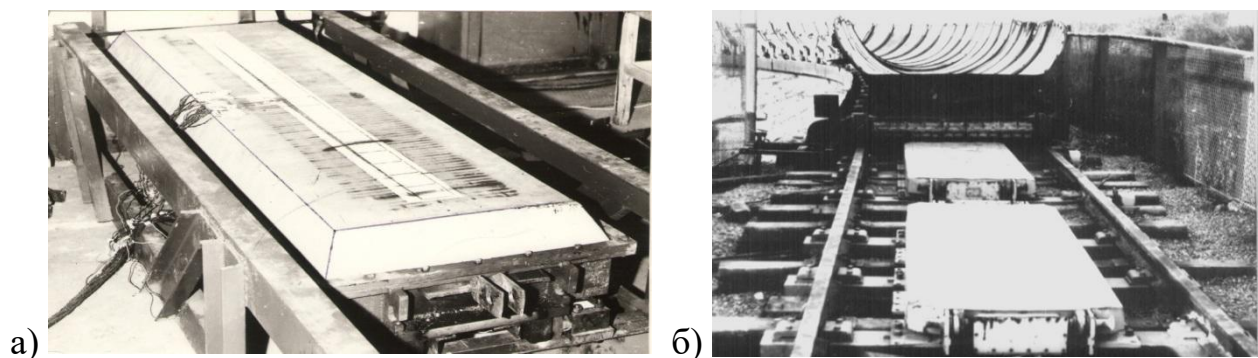


Рис. 1.7 Уніфіковані модулі тягових ЛАД ОКБ ЛЕД: а) для пасажирської транспортної системи; б) конвеєрного потяга ($M = 50$ т) з модульним багатоіндукторним лінійними асинхронним двигунами ЛАО 26000/6.5

Також відомі інші типи модульних електричних машин, наприклад вентильна електрична модульна машина з модульними П-подібними сердечниками [34], універсальна модульна електрична машина [35]. Також особливої уваги заслуговує лінійка модульних електричних двигунів компанії EMRAX [36] (рис 1.8), які можуть використовуватися кожен модуль окремо, так і з'єднуватися у дво- і тримодульне виконання. При наявності декількох типорозмірів та можливості поєднання розмірів при наявності

лише 5 моделей двигуна вдалося перекрити діапазони потужностей від 60 до 900 кВт.

В різних літературних джерелах під модулем електричної машини розуміють як саму електричну машину, так і її окремі конструктивні елементи. Тому доцільно розділити модульні електричні машини на два типи. Перший тип – електрична машина, кожен модуль якої є самодостатньою електричною машиною і може поєднуватися з іншими подібними модулями. В даному випадку модулем електричної машини є сама електрична машина. Другий тип – електрична машина, конструктивні елементи якої складаються зі змінних модулів, які можуть бути замінені на інші, а потім, за необхідності, повернуті на своє місце. В даному випадку модулем електричної машини є конструктивний елемент електричної машини.



Рис. 1.8 Лінійка модульних тягових електродвигунів компанії EMRAX

Незважаючи на широке використання структурно-функціональних модулів в сучасній техніці, системні принципи їх структуроутворення і конструювання залишаються невизначеними, що не дозволяє формалізувати процедури передбачення і синтезу модульних об'єктів. Складність теоретичного обґрунтування принципів структуроутворення модульних систем визначається, перш за все, різними вимогами до функціонування і широкою різноманітністю їх структурних реалізацій, що неодмінно призводить до різкого збільшення кількості критеріїв, що визначають функціональні властивості синтезованих об'єктів. Тому дослідження

системної природи структуроутворення модульних електромагнітних та електромеханічних структур (ЕМ-структур), становить актуальну науково-технічну задачу.

Висновки до розділу 1

Швидкий розвиток науково-технічного прогресу вимагає створення модульних платформ і уніфікованих конструкцій, які можуть забезпечувати випуск великого асортименту продукції з використанням обмеженої кількості уніфікованих вузлів і деталей.

Транспортні системи на магнітному підвісі отримують все більше поширення, але незважаючи на всі переваги все ще є занадто високовартісними для широкого впровадження. Використання модульних конструкцій при їх проектуванні може значно зменшити вартість і підвищити конкурентоздатність реалізації подібних проектів.

Модульні конструкції відомі ще з XIX сторіччя та знайшли широке застосування у багатьох галузях техніки, особливо в електроніці та комп'ютерній техніці. Незважаючи на доволі велику кількість модульних конструкцій в електромеханіці відсутні системні дослідження за напрямом визначення принципів структуроутворення тягових модульних електричних машин, тому основними задачами дослідження визначено наступні:

1. Визначити генетичні принципи і встановити рівні структуроутворення ЕМ-об'єктів модульного типу.
2. Розробити узагальнену генетичну модель синтезу модульних структур ЕМ поступального руху.
3. Визначити макрогенетичні програми ЕМ-об'єктів модульного типу.
4. Визначити домінуючий вид ЕМ-структур поступального руху, зі схильністю до модульного виконання.
5. Розробити уточнену генетичну модель багаторівневого синтезу тягово-підйомного модуля.

6. Синтезувати варіанти структур тягово-підйомних модулів та обґрунтувати вибір проектного варіанту.
7. Здійснити групову симетризацію фазних струмів тягової системи модульного типу.
8. Виконати електромагнітні розрахунки проектного варіанта модульного ЕМ-об'єкта.

РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ І ГЕНЕТИЧНИЙ СИНТЕЗ ЛІНІЙНОГО ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА МОДУЛЬНОГО ТИПУ

2.1 Принципи і рівні структуроутворення модульних електромеханічних структур

Модульний принцип є одним з найбільш поширених і продуктивних принципів структуроутворення, який широко представлений як в живій природі, так і в сучасних технічних системах. Модульність є властивістю довільної структурованої системи, безпосередньо пов'язаною з можливістю її декомпозиції на ряд внутрішньо пов'язаних між собою уніфікованих блоків (модулів). Модульний принцип використовується на всіх рівнях структурної організації технічних систем, що дозволяє скоротити термін освоєння нової техніки і забезпечити гнучкість керування зростаючою складністю об'єктів виробництва. Характерною рисою модульного підходу є його універсальність і міждисциплінарність. У зв'язку з автоматизацією складних технологічних процесів виробництва і тенденцією розвитку екологічно чистих видів транспорту, в останні роки активізувалися дослідження і розробки силових модулів в робототехніці і верстатобудуванні, а також за напрямом створення високоефективних гібридних тягових електромеханічних об'єктів модульного виконання в системах магістрального електротранспорту, електромобілях, безпілотних літальних апаратах та ін. Географія і напрями практичного використання систем модульного типу на даний час настільки масштабні, що це явище порівнюється з епохою панування модульних платформ і модульною революцією [37].

В генетичній концепції модульного проектування лежить структурно-системний підхід, при якому сукупність об'єктів, призначених для виконання

заданих функцій, розглядається як складна система, яка складається з ряду підсистем.

Практична реалізація модульного принципу при проектуванні тягових ЕМ-об'єктів може здійснюватися на різних рівнях їх складності. В загальному випадку структурно-функціональна уніфікація вузлів може здійснюватися на рівні індукторів і якорів електричних машин, магнітопроводів і секціонованих обмоток, індукторних систем багатомашинних агрегатів і систем гібридного типу.

В теорії генетично організованих систем блочно-модульна організація є результатом реалізації генетичного принципу реплікації. Реплікація (від пізньолат. *replicatio* – повторення) – один з основних принципів структуроутворення, який реалізується шляхом збільшення кількісного складу (розмноження) елементарних генетично визначених структур, які забезпечують передачу спадкових властивостей в ряду поколінь, від первинних елементів (породжувальних хромосом) до об'єктів-нащадків.

В задачах генетичного синтезу модульний принцип моделюється і реалізується з використанням генетичного оператора реплікації f_R , який забезпечує синтез багатоелементних електромагнітних структур з заданою кількістю елементів $N \geq 2$ і наступним утворенням ізомерних просторових композицій (рис. 2.1).

Генетичний оператор реплікації f_R відповідає за кількісний склад елементів структурної композиції K , утвореної з k однотипних елементів типу s_0 :

$$f_R(s_0) \rightarrow k_r s_0 \in K \subset R^3, \quad (2.1)$$

де: s_0 – електромагнітна хромосома-реплікатор; k_r – коефіцієнт реплікації; R^3 – тривимірний простір структуроутворення композицій K .

Для значень коефіцієнта реплікації $k_R \geq 2$, синтезована структура допускає N варіантів просторових композицій в R^3 , кількість яких буде зростати зі збільшенням розмірності k_R , тому, електромагнітні хромосоми-

реплікатори мають статус інформаційних хромосом, так як вони містять неявну генетичну інформацію стосовно множини можливих просторових реалізацій синтезованої структури. Властивість, яка пов'язана з наявністю множини варіантів розміщення з однакової кількості однотипних елементів, узагальнюється поняттям просторової ізомерії (на відміну від ізомерії речовини), а множина їх просторових композицій – структурними ізомерами [38].

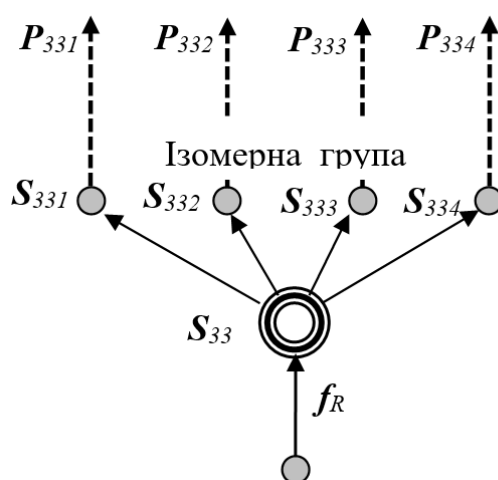


Рис. 2.1 Генетична модель структуроутворення ізомерної групи в задачах генетичного синтезу: f_R – генетичний оператор реплікації; S_{33} – хромосома-реплікатор; $S_{331} - S_{334}$ – ізомерна група електромагнітних хромосом; $P_{331} - P_{334}$ – популяції ізомерних просторових композицій структур-нащадків.

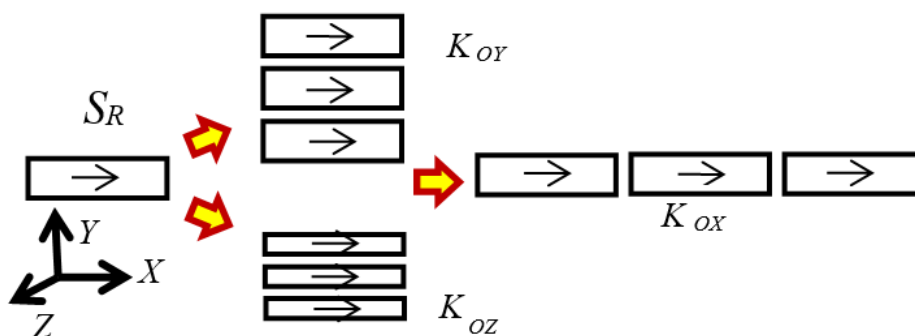


Рис. 2.2 Варіанти просторових ізомерних композицій (K_i), синтезованих в R^3 з використанням генетичного оператора реплікації ($k_r = 3$). $S_R = 3ПЛ$
2.2х. – хромосома-реплікатор.

В структуроутворенні електричних машин принцип реплікації і синтезовані ізомерні групи можна ефективно використовувати на всіх рівнях структурної організації з відповідним вибором електромагнітних хромосом і коефіцієнта реплікації (табл. 2.1) [39].

Таблиця 2.1. Рівні структурно-функціональної відповідності генетичного принципу реплікації

Рівень генетичної організації	Структурний модуль	Реплікована структура	Емерджентний ефект
Хромосомний	Первинне джерело поля	Ізомерна композиція	БД просторових композицій для прийняття рішень
Елементний	Секція, полюс, котушка, ...	Секціоновані обмотки, багатополюсні, багатокотушкові обмотки	Уніфікація, технологічність, розширення функціональних можливостей
Об'єктний	Пакет магнітопроводу, індуктор, якор, статор, ротор, ...	Багатопакетні магнітопроводи, багатоіндукторні, багатостаторні, багатороторні ЕМ-об'єкти	Уніфікація, технологічність, резервування, ремонтоздатність, розширення функціональних можливостей
Системний	Двигун, генератор, гібридні і суміщені системи	Багатодвигунний електропривод; багатомашинна електромеханічна система; система «двигун – генератор), ...	Розширення функціональних можливостей

Рівень первинних джерел електромагнітного поля (хромосомний) в періодичній структурі ГК виконує функцію глобальної генетичної програми для постановки і розв'язання задач синтезу і генетичного аналізу ізомерних груп і композицій ЕМ-об'єктів довільного рівня складності.

На об'єктному рівні ізомерні композиції реалізуються у вигляді відповідних технічних рішень модульного типу, які широко представлені в

технічній еволюції тягових електричних машин, в тому числі, машин тягового призначення.

Системний рівень технічної реалізації модульного принципу тягової ЕМ-системи дозволяє забезпечити високий рівень функціональності, технологічність виготовлення, уніфікацію вузлів, гнучкість системи керування, підвищити надійність і ремонтоздатність.

2.2. Область існування і макрогенетична програма електромеханічних систем модульного типу

Концептуальну основу для визначення допустимих меж і варіантів структуроутворення ЕМ-об'єктів становлять результати системного аналізу їх макрогенетичних програм. Наявність генетичних програм є необхідною умовою існування і розвитку генетично організованих систем, як природного, так і антропогенного походження [40]. Під генетичною програмою розуміється кінцева множина електромагнітних хромосом, які спільно з генетичними принципами структуроутворення, визначають межі видоутворення і генетично допустиму різноманітність структур-нащадків [41]. В залежності від рівня структурної організації ЕМ-систем генетичні програми поділяються на макро- і мікрогенетичні [42]. Програми макрогенетичного рівня визначають межі існування і структуру функціональних класів ЕМ-об'єктів на видовому і надвидовому рівнях їх структурної організації. Мікрогенетичні програми містять інформацію стосовно внутрішньовидової різноманітності ЕМ-структур.

Макрогенетичні програми відповідних функціональних класів ЕМ-систем визначаються методами генетичного аналізу в предметній області системної моделі, функцію якої виконує ГК первинних джерел електромагнітного поля [40]. В загальному випадку, за результатами генетичного аналізу визначаються:

- область існування видової різноманітності досліджуваного класу (Q_i);

- кількісний склад генетично допустимих Видів ($\sum N_S$);
- за умови наявності результатів патентно-інформаційного пошуку та ідентифікації генетичних кодів, визначається кількісний склад і генетично допустима різноманітність реально-інформаційних (N_H) і неявних (N_F) Видів класу, ще відсутніх на даний час еволюції класу;
- домінуючий Вид класу (S_D).

Розглянемо задачу визначення макрогенетичної програми і домінуючого Виду ЕМ-об'єктів, представники якого будуть задовольняти сукупності вимог F_S , що ставляться до тягової електричної машини модульного виконання.

Виходячи з аналізу вихідних вимог, інтегральна функція пошуку в пошуковому просторі предметної області ГК $F_S \in R^n$ має задовольняти наступній сукупності часткових вимог:

1) об'єкт дослідження має забезпечувати ступеневе нарощування потужності за умови живлення від бортового джерела енергії ($P_2 \rightarrow var$);

2) структура тягового двигуна має формуватися з уніфікованих функціональних модулів, з можливістю дискретної зміни тягової потужності ($N_M \rightarrow var$);

3) зміна потужності двигуна має здійснюватися за умови збереження просторової геометрії активних поверхонь елементарних функціональних модулів і повітряних зазорів ($S_\delta \rightarrow const$);

4) об'єкт дослідження має забезпечувати реалізацію енергозбережних способів збудження основного магнітного потоку ($P_\phi \rightarrow min$);

З метою забезпечення коректності результатів пошуку, накладемо наступні обмеження на R^n :

пошук здійснюється в предметній області первинних елементів першого великого періоду ГК;

багатовимірний пошуковий простір R^n обмежується предметною областю електромагнітних хромосом базового рівня ГК і джерел-ізопопів першого покоління.

З врахуванням зазначених вимог та обмежень, інтегральна функція пошуку набуває наступного виду:

$$\sum F_S = [P_2 \rightarrow var; N_M \rightarrow var; S_\delta \rightarrow const; P_\phi \rightarrow min;] \subset R^n \quad (2.2)$$

Макрогенетична програма досліджуваного класу ЕМ-об'єктів визначається через процедуру ідентифікації кінцевої множини батьківських хромосом, генетична схильність яких задовольняє реалізації вимог інтегральної функції $\sum F_S$. Генетична схильність батьківської хромосоми визначає здатність структур – нащадків до реалізації заданої функції [41]. З врахуванням основних типів ЕМПЕ та аналізу сукупності вимог, представлених функцією пошуку (2.2), визначимо генетично допустиму множину електромагнітних хромосом, які забезпечують модульний принцип нарощування потужності, за умови збереження геометрії елементарних модулів (вимога 3).

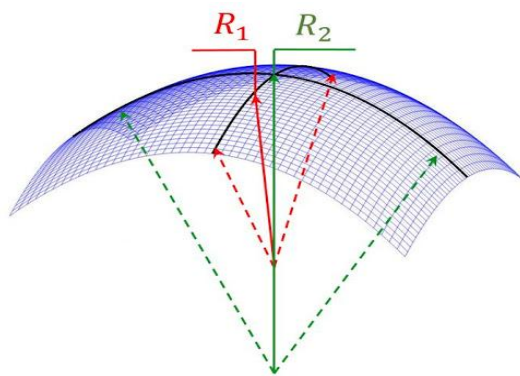


Рис. 2.3 Визначення кривизни Гауса

Якщо вимозі 1 задовольняє генетична інформація переважної більшості хромосом першого великого періоду ГК, схильних до реалізації обертового і поступального руху, то з врахуванням вимоги 3 пошуковий простір R^n суттєво обмежується і задача зводиться до визначення джерел поля, геометрія активної поверхні яких задовольняє нульовій кривизні Гауса. Як

відомо, відповідно до теореми Гауса, існує кількісна характеристика кривизни поверхні в R^3 (рис. 2.3) [34].

Якщо для кожної точки поверхні можна провести дві ортогональні лінії з радіусами R_1 і R_2 , які перетинаються в даній точці, то така поверхня належить до класу поверхонь з гауссовою кривизною K , значення якої визначається добутком обернених радіусів:

$$K_i = 1 / R_1 \cdot R_2 \quad (2.3)$$

Якщо принаймні, один з радіусів кривизни $R_i \rightarrow \infty$, то гауссова кривизна $K_0 = 0$ і такі поверхні називаються поверхнями нульової гауссової кривизни.

В структурі підгрупи 0.2у першого великого періоду ГК, нульовою кривизною K_0 наділені електромагнітні хромосоми трьох родів

$$K_0 = (G_{CL}, G_{PL}, G_{TP}) \quad (2.4)$$

Але з врахуванням вимог 1 і 3, інтегральній функції пошуку задовольняють лише електромагнітні хромосоми, просторова геометрія активної поверхні яких «нечутлива» до зміни немагнітного повітряного зазору δ .

$$G_{CL} = (CL2.2x, {}^1CL2.2x) \quad (2.5)$$

$$G_{TP} = (TP0.0y, TP0.2y, {}^1TP2.0x, TP2.2y) \quad (2.6)$$

$$G_{PL} = (PL2.0x, PL2.2x, {}^1PL2.2x) \quad (2.7)$$

де G_{CL} , G_{TP} , G_{PL} – родові набори електромагнітних хромосом, які генетично схильні до реалізації модульного принципу структуроутворення.

Хромосомні набори (2.5 – 2.7) виконують функцію макрогенетичної програми досліджуваного класу тягових двигунів, які допускають модульний принцип з врахуванням обмежень, накладених заданою функцією $\sum F_s$. Макрогенетична програма узагальнює генетичну інформацію стосовно 9 видів машин модульного типу, серед яких:

4 види визначають структурну різноманітність машин обертального руху:

$$S_{\omega} = (TP0.0y, TP0.2y, {}^1TP2.0x, TP2.2y) \quad (2.8)$$

5 видів визначають межі структуроутворення підкласу тягових двигунів поступального руху:

$$S_V = (CL2.2x, {}^1CL2.2x, PL2.0x, PL2.2x, {}^1PL2.2x) \quad (2.9)$$

Макрогенетична програма (2.5 – 2.7) узагальнює генетичну інформацію електромагнітних хромосом, яка інваріантна відносно:

- способу утворення магнітного поля;
- фізичної природи тягової сили (моменту);
- рівня складності тягової системи;
- кількості тягових модулів;
- функціонального призначення тягової системи;
- часу реалізації еволюційної події.

Так як хромосомні набори відповідних підгруп мають детермінований зв'язок з топологією і просторовою геометрією активних поверхонь і *m*-фазних обмоток, то процедура подальшого пошуку буде визначатися аналізом їх відповідності технологічним вимогам. За критерієм технологічності і уніфікації активних частин найбільш високим рівнем технологічності наділені магнітні системи і обмотки Виду тягових машин з плоскою (Вид PL 0.2y) і тороїдальною плоскою активною поверхнями (Вид TP 0.2y).

Отже, з врахуванням вимог забезпечення технологічності, уніфікації вузлів і конструктивної простоти електромеханічних модулів, статус домінуючого Виду, набувають базові Види з генетичними кодами PL 2.2x і TP 0.2y. Генетична схильність структурних представників зазначених Видів найбільш повно задовольняє заданій сукупності часткових вимог і функції пошуку $\sum F_S$, які забезпечують функціонування тягового двигуна зі змінною структурою тягових модулів.

2.3. Рівні структурної організації модульних ЕМ-об'єктів

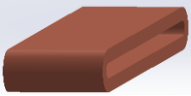
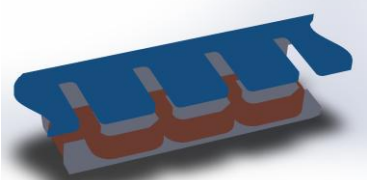
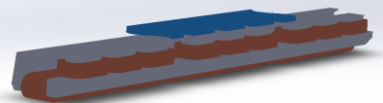
Практична реалізація модульного принципу при проектуванні ЕМ-об'єктів може здійснюватися на різних рівнях їх складності. Концептуальну основу ідеї модульності становлять поняття структури, цілісності, дискретності, упорядкованості і функціональності. В загальному випадку структурно-функціональна дискретність має місце на хромосомному, елементному, об'єктному, груповому і системному рівнях структурної організації електромеханічних систем (табл. 2.2).

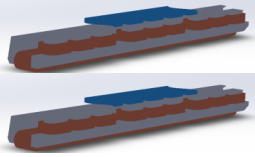
Хромосомний рівень структурної організації представлений первинними джерелами електромагнітного поля, які виконують роль генетично визначених цілісних структур для моделювання і синтезу модульних структур більш високого рівня складності. Системним носієм упорядкованої множини електромагнітних хромосом виступає періодична структура генетичної класифікації первинних джерел електромагнітного поля, яка є основою для визначення макрогенетичних програм структуроутворення довільних функціональних класів ЕМ-об'єктів, включаючи модульні.

Широка номенклатура модульних структур елементного рівня (секцій і котушок обмоток, полюсів, елементарних магнітопроводів тощо), для переважної більшості ЕМ-об'єктів є природною і необхідною умовою реалізації процесу електромеханічного перетворення енергії. Вона зумовлена необхідністю забезпечення періодичного закону розподілу магнітного поля в активній зоні перетворювача. Характерною особливістю структурних модулів елементного рівня є їх дискретність і упорядкованість (регулярність) за напрямом розповсюдження хвилі магнітного поля. Тому модульно-регулярна структура активних елементів є невід'ємною властивістю електричних машин як історичного минулого, так і їх сучасних технічних реалізацій.

Модульну основу об'єктного рівня визначає дискретна структура електромеханічних перетворювачів енергії з відповідним набором функцій і видом просторового руху, які в сукупності з системами керування, контролю і діагностики визначають технічний рівень сучасних технічних систем. Необхідність реалізації модульного принципу на об'єктному рівні визначається результатами техніко-економічного аналізу ЕМ-системи. Вони конкретизуються за результатами структурно-параметричного синтезу і реалізуються у вигляді відповідних технічних рішень.

Таблиця 2.2. Модульний принцип в багаторівневій структурі електромеханічної системи тяги і магнітного підвісу

Рівень структурної організації	Структура (тип) модуля	Візуалізація структури
Хромосомний	Первинне джерело поля якоря ($PL_{2.2x}$)	
	Первинне джерело поля збудження ($PL_{2.0x}$)	
Елементний	Магнітопровід якоря ($M_{мя}$)	
	Магнітопровід ОЗ ($M_{мз}$)	
	Обмотка якоря ($M_{оя}$)	
	Обмотка збудження ($M_{ф}$)	
	Секція вторинного елемента (C_{BE})	
Об'єктний	Електромагнітний модуль (M_{EM})	
	Індукторний модуль ($M_I = n(M_{EM})$)	

Груповий	Модуль електромагнітної лижі ($M_{EL}=n(M_L)$)	
	Секціонована структура ВЕ $M_{BE}=n(C_{BE})$	
Системний – А (вагон)	Модульна електромеханічна система тяги і підвісу вагона ($M_B=2[(M_{EL}),n(M_{BE})]$)	
Системний – В (потяг)	Модульна електромеханічна система тяги і підвісу потяга ($M_{\Pi}=N_B(M_{\Pi\Pi})$)	
Системний – С (транспортна мережа)	Модульна система транспортної мережі ($M_{TM}=N_{\Pi}(M_{\Pi})$)	

Системний рівень технічної реалізації модульного принципу визначається задачами міждисциплінарного синтезу, з врахуванням функціональних, техніко-економічних і експлуатаційних вимог технічного комплексу вищого рівня складності.

Модульний принцип технічної реалізації ЕМ-об'єктів системного рівня є закономірним і передбачуваним результатом еволюційного процесу структурно-функціональної адаптації генетично визначених структур до зростаючих вимог зовнішнього середовища. Його характерною особливістю є тенденція ускладнення модульних об'єктів, які на системному рівні можуть суміщувати декілька видів перетворювачів енергії різної фізичної природи (електромеханічних, тепломеханічних, електрохімічних тощо), а також включати допоміжні механічні, електронні, гідравлічні та інші підсистеми модульного типу.

2.4. Узагальнена генетична модель структуроутворення модульних ЕМ-об'єктів в межах довільного Виду електромеханічної системи

Генетичні моделі структурного синтезу належать до класу природоподібних моделей які відтворюють процеси структуроутворення на основі генетично визначеного елементного базису (електромагнітних хромосом) і операторів синтезу. Методи генетичного синтезу суттєво спрощують процедуру формалізації, забезпечують повноту пошукових процедур і реалізують синтез з гарантованим інноваційним ефектом.

Існуюча структурна різноманітність ЕМ-об'єктів модульного типу має генетичну природу, так як їх структури визначаються генетичним оператором реплікації і кінцевою множиною варіантів їх просторового розміщення, які узагальнюються поняттям структурної ізомерії. Функцію батьківської хромосоми C_{00} в задачах генетичного синтезу, може виконувати довільне первинне джерело магнітного поля з множини генетично допустимих (включаючи джерела-ізотопи) в періодичній структурі породжувальної системи [42]. Вибір батьківських хромосом здійснюється за критерієм наявності генетичної схильності до виконання заданої функції синтезу F_s (рис.2.4).

За допомогою оператора реплікації синтезується електромагнітна хромосома-реплікатор інформаційного типу C_{10} , яка виконує функцію породжувальної відносно групи просторових ізомерних композицій K_{210} , K_{211} , K_{212} .

$$f^R(C_{00}) = C_{10} \rightarrow (K_{210}, K_{211}, K_{212}) \subset S_{PL02y} \quad (2.10)$$

Синтез просторових композицій здійснюється в R^3 з використання групи симетричних перетворень: паралельного перенесення (трансляції), поворотів та їх комбінацій. За результатами аналізу відповідності ізомерних композицій заданій функції синтезу F_s , здійснюється вибір проектного варіанта

модульної структури (на рис. 2.1 представлена хромосомою-ізомером S_{312}). Структурна формула обраної просторової композиції є основою для розробки варіантів технічних реалізацій ЕМ-об'єктів модульного виконання.

За результатами аналізу відповідності ізомерних композицій заданій функції синтезу F_s , здійснюється вибір проектного варіанта модульної структури, представленої на рис. 1 хромосомою - ізомером C_{312} . Структурна формула обраної просторової композиції C_{312} є основою для розробки варіантів технічного рішень шуканого ЕМ-об'єкта модульного виконання T_M .

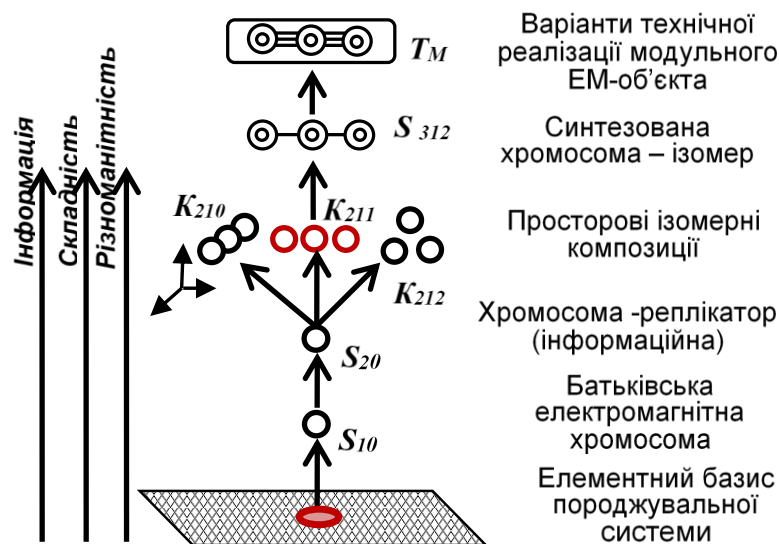


Рис. 2.4. Узагальнена генетична модель структуроутворення ЕМ-об'єктів модульного виконання

Модель показує детермінований взаємозв'язок елементного базису ГК з структурою модульного об'єкта-нащадка, який забезпечується через принцип збереження генетичної інформації і реалізується через генетичні механізми реплікації і структурної ізомерії. Запропонована генетична модель (рис. 2.4) є інваріантною до генетичної природи Виду, рівня складності і функціональної приналежності модульного ЕМ-об'єкта.

2.5 Уточнена генетична модель синтезу безконтактного лінійного тягового синхронного двигуна модульного типу

Задача синтезу полягає у знаходженні варіанта структури безконтактного лінійного тягового синхронного двигуна (ТСД), призначеного для високошвидкісного транспорту на магнітному підвісі, здатного реалізувати функцію тяги і керованого електромагнітного підвісу, за умови покращення масогабаритних показників і зменшення споживаної потужності.

В генетичній моделі синтезу функцію батьківської електромагнітної хромосоми обмотки якоря виконує хромосома $PL\ 2.2x$, а обмотки збудження $PL\ 2.0x$ (рис. 2.5). Результати аналізу результатів моделювання узагальнено в табл. 2.3.

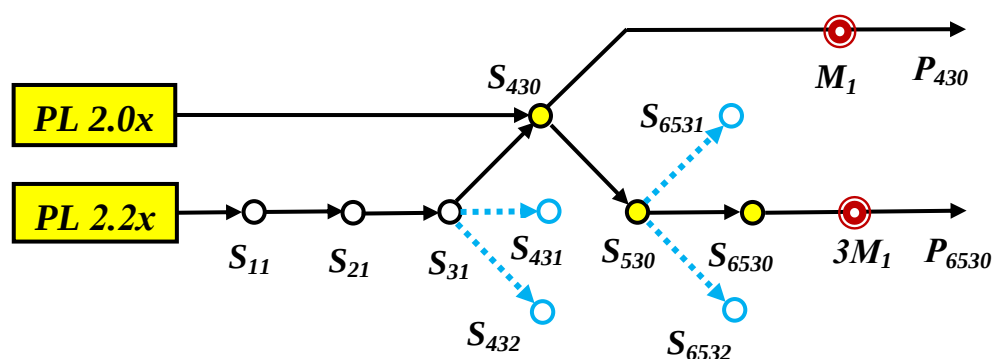


Рис. 2.5. Уточнена генетична модель синтезу дворівневої модульної структури тягового синхронного двигуна поступального руху: $PL\ 2.2x$ – батьківська хромосома обмотки якоря; $PL\ 2.0x$ – батьківська хромосома обмотки збудження; S_{430} , S_{430} – хромосоми, що породжують; M_1 , $3M_1$ – одномодульна і тримодульна структури ТСД.

Таблиця 2.3. Результати розшифрування генетичної програми структуроутворення дворівневої модульної структури ТСД поступального руху

Код хромосоми	Структурна формула	Статус хромосоми
S_{01}	$PL\ 2.2x$	Батьківська, обмотки якоря

S_{02}	$PL\ 2.0x$	Батьківська, обмотка збудження
S_{11}	$(PL2.2x)_1 \times (PL2.2x)_2$	Парна електромагнітна, інформаційна
S_{21}	$(PL2.2x)_1 \times [(PL2.2x):M_L]_2$	Мутована ($L_2 > L_1$), інформаційна
S_{31}	$[2(PL2.2x):R_{OX}]_1 \times (PL2.2x):M_L]_2$	Реплікатор ($k_r = 2$) $_{OX}$, інформаційна
S_{430}	$[2(PL2.2x):R_{OX} \times (PL2.0x)]_1 \times (PL2.2x):M_L]_2$	Гібридний ізомер (R_{OX}), породжувальна (M_1)
S_{530}	$3[2(PL2.2x):R_{OX} \times (PL2.0x)]_1 \times (PL2.2x):M_L]_2$	Реплікатор ($k_r = 3$) $_{OX}$, інформаційна
S_{6530}	$3[2(PL2.2x):R_{OX} \times (PL2.0x):R_{OX}]_1 \times (PL2.2x):M_L]_2$	Ізомер (R_{OX}), породжувальна ($3M_1$)

За результатами моделювання визначаємо структурні формули модульних варіантів ТСД поступального руху:

Одиничний модуль якоря двигуна визначається генетичною інформацією хромосоми S_{430} :

$$S_{430} = [2(PL2.2x):R_{OX} \times (PL2.0x)]_1 \times (PL2.2x):M_L]_2 \quad (2.11)$$

Повна структура якоря лінійного двигуна визначається формулою:

$$S_{6530} = 3[2(PL2.2x):R_{OX} \times (PL2.0x):R_{OX}]_1 \times (PL2.2x):M_L]_2 \quad (2.12)$$

2.6 Синтез структурних варіантів лінійного індукторного двигуна

Структурній формулі (2.12) ставиться у відповідність дворівнева модульна конструкція ТСД поступального руху індукторного виконання. Для вибору оптимального варіанту конструкції створимо графічну базу даних синтезованих структур тягово-підйомних модулів, що представлена на рисунку 2.6.

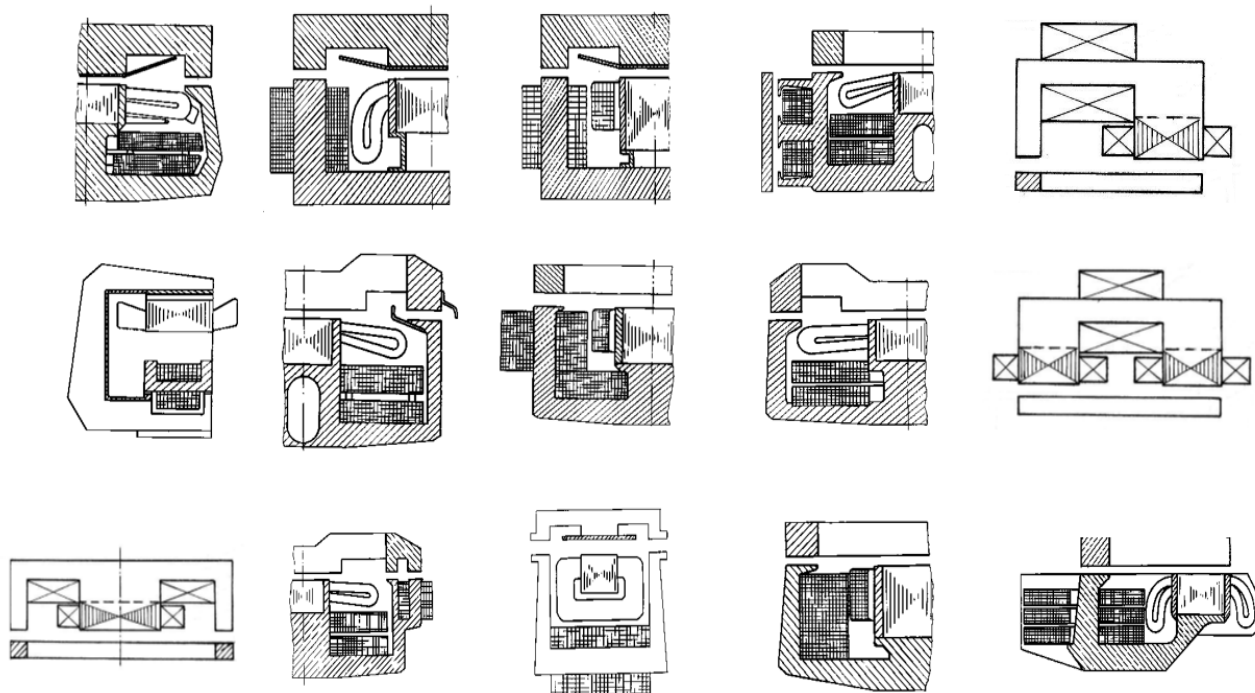


Рис. 2.6 Ескізи варіантів технічної реалізації синтезованої структури (в межах популяції P_{6530}).

Кожен з представлених варіантів ТСД має свої переваги та недоліки.

З наведених варіантів обираємо 3 найбільш оптимальних для виконання поставленої задачі та проведемо їх порівняльний аналіз. Обрані варіанти представлені на рисунку 2.7.

Лінійні індукторні двигуни, що представлені на рис. 2.7, складаються з якоря 1, Ш-подібного (рис. 2.7 а) або П-подібного (рис. 2.7 б, в) перетину, багатофазної обмотки якоря та обмотки збудження. Якір індуктора може бути однопакетним (рис. 2.7 а, в) та двопакетним (рис. 2.7 б). Вторинна частина двигуна 4 складається з дискретних елементів, що знаходяться в зоні якоря із суцільною поздовжньою частиною в зоні пасивних полюсів індуктора (рис. 2.7 а, в).

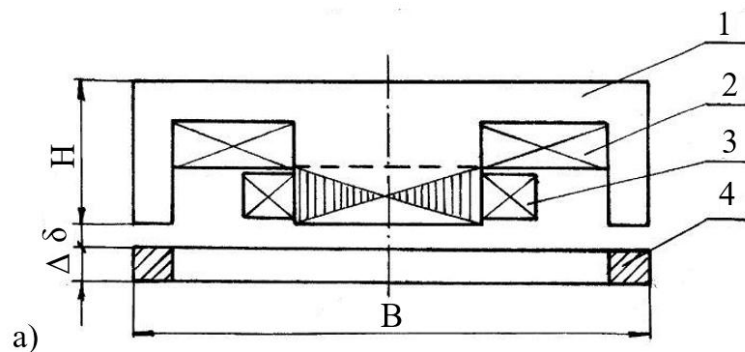
Варіант «а» з Ш-подібним магнітопроводом споживає малу потужність збудження, а також має малу габаритну висоту H , зручний для монтажу, однак має більшу габаритну ширину B , що являється його основним

недоліком, так як при цьому збільшується маса і відповідно витрата матеріалів вторинного елемента.

Варіант «б» забезпечує більш високе, у порівнянні з іншими варіантами, значення питомої електромагнітної потужності з одиниці активної поверхні. Однак також має більшу габаритну ширину.

Варіант «в» незначно поступається іншим варіантам питомими енергетичними показниками, має порівняно невелику габаритна ширину, що при використанні для системи тяги на магнітному підвісі має вирішальну перевагу в порівнянні з іншими варіантами.

З врахуванням вищесказаного варіант «в» обираємо в якості основного для виконання поставленого завдання в даній магістерській дисертації. На основі ескізу (рис. 2.7 в) створюємо тривимірну модель тягово-підйомного модуля, що представлена на рисунку 2.8.



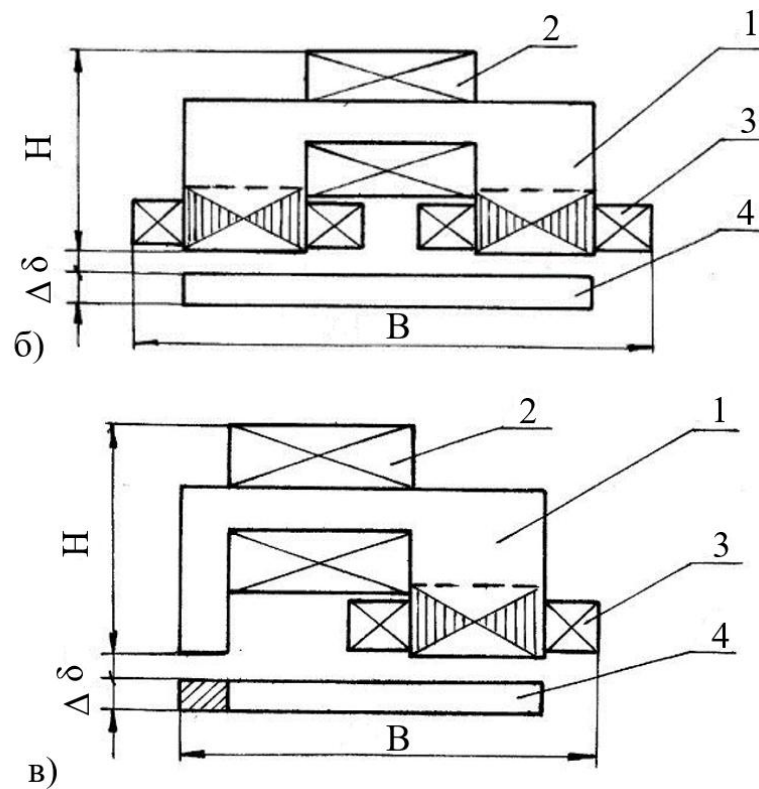


Рис. 2.7 Синтезовані варіанти структур елементарного модуля ЛІД

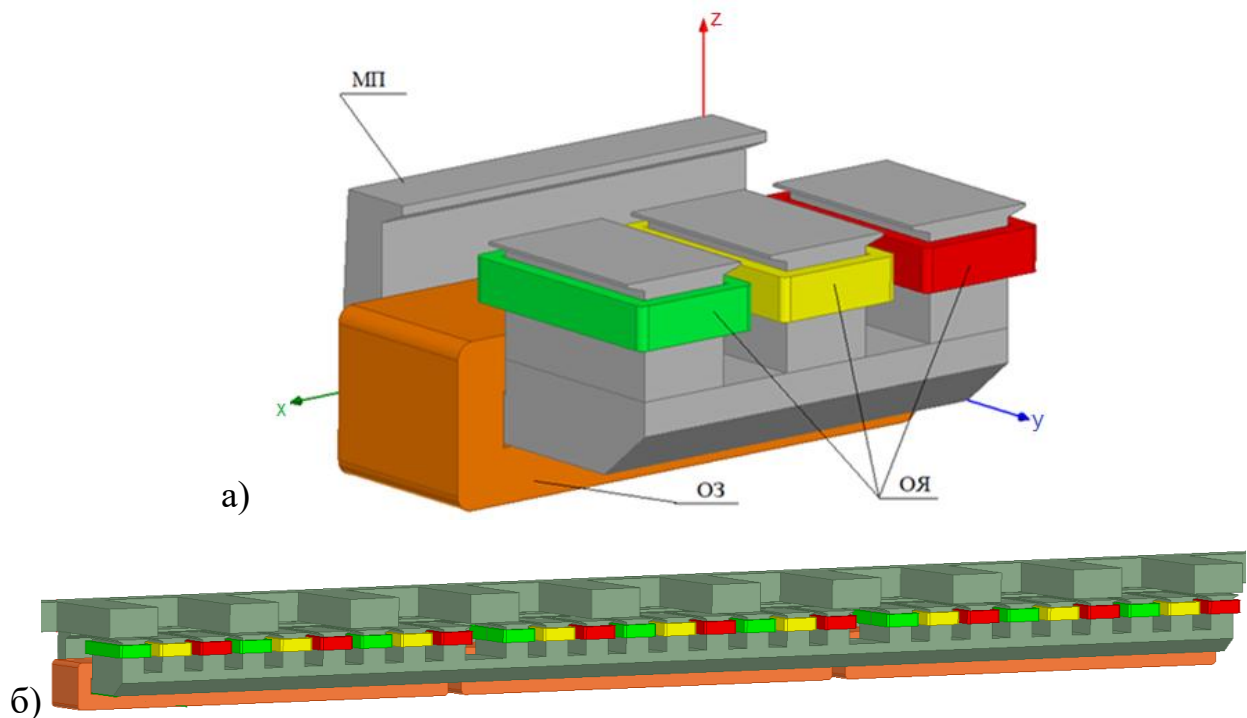


Рис. 2.8. 3D – модель синтезованих структур елементарного (а) (хромосома S_{430}) та функціонального (б) (хромосома S_{6530}) тягово-підйомних модулів бортової електромеханічної системи високошвидкісного транспорту на електромагнітному підвісі: ОЗ – модулі обмотки збудження; ОЯ – модулі обмотки якоря; МП – модулі магнітопроводу

Структура синтезованого двигуна (рис. 2.8) характеризується трьома рівнями модульної організації. Перший рівень представлений модулями електромагнітної системи якоря і обмотки збудження, кількість яких визначається за співвідношенням $N_{\text{я}} = km$, де m – кількість фаз обмотки якоря; $k = 1, 2, 3, \dots$. Другий рівень модульності представлено електромагнітними модулями явнополюсної обмотки якоря. Модульна організація третього рівня представлена багатоіндукторною системою бортових магнітних «лиж».

Висновки до розділу 2

Результати структурно-системних досліджень можна узагальнити наступними положеннями:

1. Встановлено, що модульний принцип, як в природі, так і в техніці, має генетичну природу походження, так як проявляється на всіх рівнях структуроутворення ЕМ-об'єктів і визначається на рівні елементного базису загальносистемними генетичними принципами реплікації і структурної ізомерії.

2. За результатами генетичного аналізу встановлено, що максимальною генетичною схильністю до утворення модульних композицій об'єктного і системного рівнів наділені електромагнітні хромосоми з нульовою гауссовою кривизною, що дозволяє локалізувати пошуковий простір синтезу.

3. Розроблено узагальнену генетичну модель синтезу модульних ЕМ-об'єктів, основу структуроутворення якої визначають генетичні принципи реплікації, мутації і просторової ізомерії.

4. Вперше визначено макрогенетичні програми структуроутворення тягових машин модульного виконання, які містять інформацію стосовно генетично допустимих Видів як відомих, так і Видів, ще відсутніх на даний час еволюції класу.

5. За результатами аналізу макрогенетичних програм визначено домінуючі Види ЕМ-об'єктів з генетичними кодами ТР 0.2у (для обертових ЕМ) і РL 2.2у (для ЕМ поступального руху), структури яких максимально адаптовані до модульної технічної реалізації. Результати дослідження відкривають можливість постановки задач синтезу конкурентоздатних модульних структур ЕМ-об'єктів довільного рівня складності за заданою функцією синтезу.

6. Відповідно до вихідних даних, розроблено уточнену генетичну модель синтезу дворівневої модульної структури тягового синхронного двигуна поступального руху, яка враховує модульність на елементному, об'єктному і функціональному рівнях.

7. За результатами розшифрування мікрогенетичної програми, здійснено синтез елементарних і функціональних модулів тягового двофункціонального синхронного двигуна індукторного типу.

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ РОЗРАХУНКИ ЛІНІЙНОГО ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА МОДУЛЬНОГО ТИПУ

3.1 Вихідні дані

Відповідно до технічного завдання (додаток 1) в даному розділі виконуються розрахунки тягового модуля з наступними властивостями:

- забезпечення поступального руху та керованого магнітного підвісу транспортного засобу;
- індукторний (синхронний) принцип дії;
- модульність функціонального (об'єктного) рівня.

Вихідні параметри модуля приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Вихідні дані модуля

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Номінальна потужність	S	18	кВА
2	Номінальна швидкість	V _н	33	м/с
3	Номінальна лінійна напруга	U _{лн}	180	В
4	Напруга обмотки збудження	U _з	24	В
5	Номінальний повітряний проміжок	δ	5	мм
6	Номінальне значення ККД	η _н	0.85	
7	Кількість фаз	m	3	
8	Номінальна частота	f	100	Гц
9	Номінальний cosφ	cosφ	0.85	

3.2 Електромагнітний розрахунок

Визначення основних параметрів лінійного індукторного двигуна обраної конструкції проводиться за методикою ОКБ ЛЕД м. Києва з подальшим моделюванням в пакеті програмного забезпечення ANSYS AIM Student.

3.2.1 Розрахунок геометричних розмірів

Полюсний поділ обмотки якоря:

$$\tau = \frac{V_n}{2 \cdot f} = \frac{33}{2 \cdot 100} = 0.165 \text{ м} \quad (3.1)$$

Зубцевий крок якоря:

$$t_1 = \frac{2 \cdot \tau}{m} = \frac{2 \cdot 0.165}{3} = 0.107 \text{ м} \quad (3.2)$$

Розрахункова потужність активної поверхні якоря модуля:

$$S_a = \frac{S}{S_{\Pi}} = \frac{18}{141} = 0.128 \text{ м}^2 \quad (3.3)$$

де $S_{\Pi}=141 \text{ кВА/м}^2$ – питома потужність, що знімається з поверхні якоря (120-150 кВА/м²) [44] при $\delta=5 \text{ мм}$.

Ширина сердечника модуля:

$$L_i = \frac{S_a}{L} = \frac{0.128}{1} = 0.128 \text{ м} \quad (3.4)$$

де $L=1 \text{ м}$ – попередня довжина модуля [44].

Число пар полюсів:

$$p = \frac{L}{2 \cdot \tau} = \frac{1}{2 \cdot 0.165} = 3.125 \quad (3.5)$$

Приймаємо число пар полюсів $p=3$.

Число пазів якоря:

$$Z_1 = p \cdot m = 3 \cdot 3 = 9 \quad (3.6)$$

Уточнюємо довжину модуля:

$$L = 2 \cdot p \cdot \tau = 2 \cdot 3 \cdot 0.16 = 0.96 \text{ м} \quad (3.7)$$

Ширина паза якоря:

$$b_{\text{нл}} = 0.45 \cdot t_1 = 0.45 \cdot 0.107 = 0.048 \text{ м} \quad (3.8)$$

Ширина зубця у основи:

$$b_{z1} = t_1 - b_{\text{нл}} = 0.107 - 0.048 = 0.059 \text{ м} \quad (3.9)$$

Ширина зубця у активної поверхні:

$$b_{z11} = t_1 - b_{\text{по}} = 0.107 - 0.022 = 0.085 \text{ м} \quad (3.10)$$

де $b_{\text{по}} = (3.6 - 5.5) \cdot \delta = 4.4 \cdot 0.005 = 0.022 \text{ м}$ – відкриття паза попередньо [44].

Зубцевий крок вторинного елемента:

$$t_2 = 2 \cdot \tau = 2 \cdot 0.165 = 0.33 \text{ м} \quad (3.11)$$

Ширина вторинного елемента:

$$b_{z2} = 0.8 \cdot \tau = 0.8 \cdot 0.16 = 0.128 \text{ м} \quad (3.12)$$

Ширина паза вторинного елемента:

$$b_{п2} = t_2 - b_{z2} = 0.32 - 0.128 = 0.192 \text{ м} \quad (3.13)$$

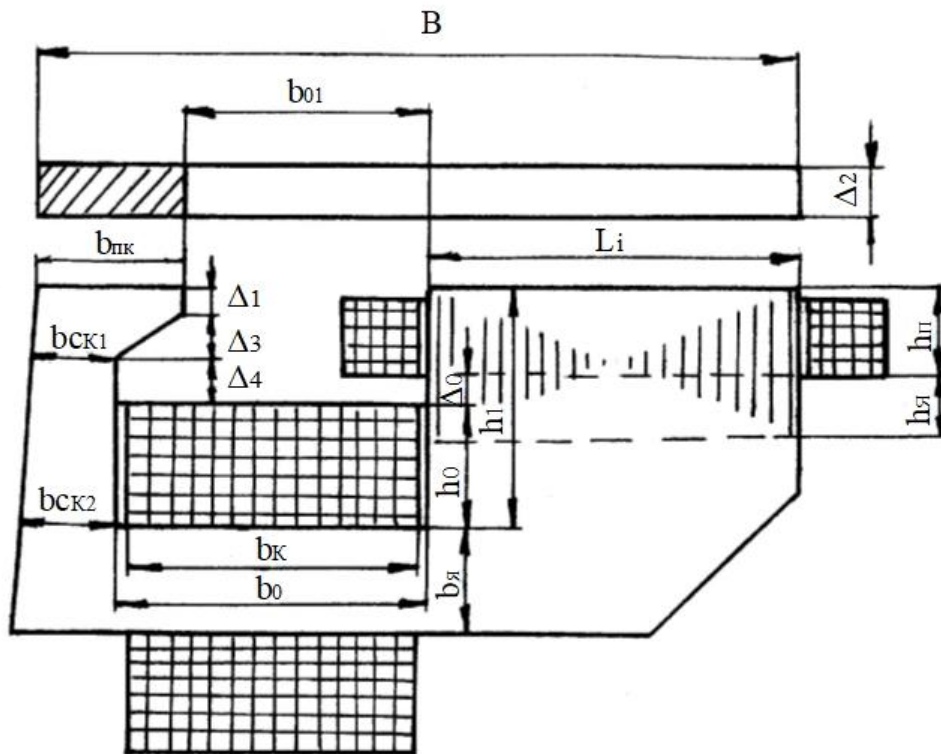


Рис. 3.1 Розрахункова модель тягово-підйомного модуля (поперечний переріз)

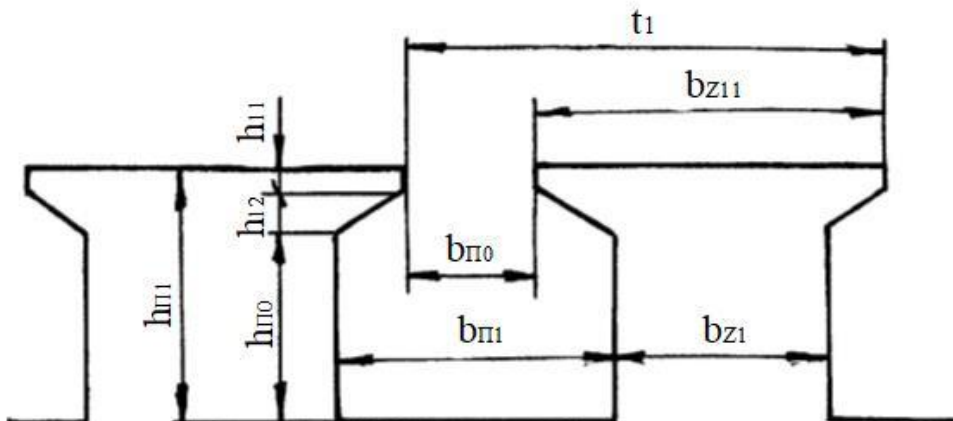


Рис. 3.2 Поздовжній переріз тягово-підйомного модуля

3.2.2 Розрахунок обмоткових даних

Активна розрахункова потужність:

$$P_i = S \cdot \cos \phi = 18 \cdot 0.85 = 15.3 \text{ кВт} \quad (3.14)$$

Струм якоря модуля:

$$I_{\text{я}} = \frac{P_i}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЛН}} \cdot \cos \phi} = \frac{15300}{\sqrt{3} \cdot 180 \cdot 0.85} = 57.74 \text{ А} \quad (3.15)$$

Число витків в пазу:

$$w_{\text{п}} = \frac{A_{\text{л}} \cdot t_1 \cdot a}{I_{\text{я}}} = \frac{250 \cdot 0.107 \cdot 1}{57.35} = 46.19 \quad (3.16)$$

де $A_{\text{л}}=250 \text{ А/см}$ – лінійне струмове навантаження [44];

$a=1$ – число паралельних гілок.

Приймаємо $w_{\text{п}}=46$ витків.

Число витків в котушці обмотки якоря:

$$w_{\text{к}} = \frac{w_{\text{п}}}{2} = 23 \quad (3.17)$$

Число пазів на полюс і фазу індуктора:

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{9}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 0.5 \quad (3.18)$$

Число витків на фазу:

$$w_{\text{я}} = \frac{w_{\text{п}} \cdot p \cdot q}{a} = \frac{46 \cdot 3 \cdot 0.5}{1} = 69 \quad (3.19)$$

Висота паза якоря:

$$h_{\text{п}} = \frac{w_{\text{п}} \cdot g_{\text{я}}}{b_{\text{п}} \cdot k_3} = \frac{46 \cdot 1.925 \cdot 10^{-5}}{48 \cdot 0.52} = 0.035 \text{ м} \quad (3.20)$$

де $k_3=0.52$ – коефіцієнт заповнення паза [35];

$g_{\text{я}} = \frac{I_{\text{я}}}{J_{\text{я}}} = \frac{57.74}{3 \cdot 10^6} = 1.925 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ – необхідний перетин провідника;

$J_{\text{я}} = 3 \text{ А/мм}^2$ – прийнята густина струму в обмотці якоря.

Обираємо для намотки прямокутний обмотковий провід ПСДКТ-2 [45].

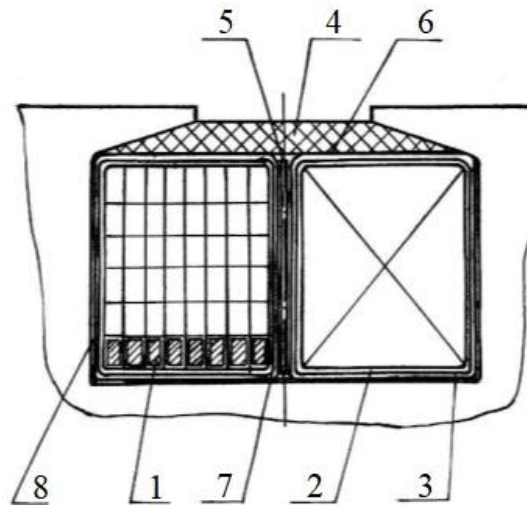


Рис. 3.3 Переріз паза якоря

Таблиця 3.2 Специфікація паза якоря

№ поз.	Найменування	Товщина	По ширині		По висоті	
			Кількість слоїв	Загальна товщина	Кількість слоїв	Загальна товщина
	Котушка					
1.	Провід ПСДКТ 2.24x4.25 2.51x4.52		8	20.08	6	27.12
2.	Склянодоплатова стрічка ЛИФК-Т40	0.12	2 слоя з перекриттям ½ ширини	0.96	2 слоя з перекриттям ½ ширини	0.96
3.	Скляна стрічка ЛЭС-0.1	0.1	1 слой з перекриттям ½ ширини	0.4	1 слой з перекриттям ½ ширини	0.4
	Допуск на пропитку			0.56		0.32
	Розмір котушки			22		28.8
	Пазова ізоляція					
4	Клин склотекстоліт	3.5				3.5
5	Склотекстоліт СТЭФ-1		1	2.0		
6	Склотекстоліт СТЭФ-1	0.25			1	0.25
7	Склотекстоліт СТЭФ-1	0.25			1	0.25
8	Склотекстоліт СТЭФ-1	0.5	2	1.0		
	Допуск на укладку			1.0		0.2
	Коронка зубця					2.0

	Фактичний розмір паза			48		35
--	-----------------------	--	--	----	--	----

3.2.3 Розрахунок коефіцієнтів провідності розсіювання обмотки якоря

Коефіцієнт пазової провідності обмотки якоря:

$$\begin{aligned}\lambda_{\Pi} &= 0.4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{h_{\Pi 1}}{3 \cdot b_{\Pi 1}} + \frac{h_{11} + h_{12}}{2 \cdot (b_{\Pi 0} + b_{\Pi 1})} \right) = \\ &= 0.4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0.035}{3 \cdot 0.048} + \frac{0.002 + 0.004}{2 \cdot (0.022 + 0.048)} \right) = 0.363\end{aligned}\quad (3.21)$$

де $h_{11}=0.002$ м, $h_{12}=0.004$ м за рекомендаціями [44].

Коефіцієнт диференціальної провідності розсіювання обмотки якоря:

$$\lambda_{\Delta} = 0.368 \cdot \pi \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{t_1}{b_{\Pi 0}} - 1 \right)}{2} \right) = 0.368 \cdot \pi \cdot \log \left(\frac{\pi \cdot \left(\frac{0.107}{0.022} - 1 \right)}{2} \right) = 0.903 \quad (3.22)$$

Коефіцієнт провідності розсіювання по коронкам зубців якоря:

$$\lambda_{\kappa} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{5 \cdot b_{\Pi 0} + 4 \cdot \delta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0.005}{5 \cdot 0.022 + 4 \cdot 0.005} = 0.242 \quad (3.23)$$

Коефіцієнт розсіювання в лобовій зоні обмотки якоря:

$$\lambda_{\Delta} = 0.184 \cdot \pi \cdot \log \left(\frac{L_{\Delta}}{h_{\Pi 1} + \frac{b_{\Pi 1}}{2}} \right) = 0.184 \cdot \pi \cdot \log \left(\frac{0.12}{0.035 + \frac{0.048}{2}} \right) = 0.176 \quad (3.24)$$

де $L_{\Delta}=0.12$ м за рекомендаціями [46].

3.2.4 Розрахунок параметрів двигуна

Індуктивний опір розсіювання обмотки якоря:

$$\begin{aligned}X_s &= \frac{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot w_{\Delta}^2}{p \cdot q} \cdot \left[(\lambda_{\Pi} + \lambda_{\kappa} + \lambda_{\Delta}) \cdot L_i + \lambda_{\Delta} \cdot L_i \right] = \frac{\pi \cdot 100 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 69^2}{3 \cdot 0.5} \cdot \\ &\cdot \left[(0.363 + 0.242 + 0.903) \cdot 0.128 + 0.176 \cdot 0.128 \right] = 0.269 \Omega\end{aligned}\quad (3.25)$$

Активний опір обмотки якоря:

$$R_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}} \cdot w_{\text{я}}}{g_{\text{я}}} \cdot \rho \cdot (1 + \alpha_{\tau} \cdot (t_0 - 20)) =$$

$$= \frac{0.495 \cdot 69}{1.925 \cdot 10^{-5}} \cdot 0.0171 \cdot (1 + 0.00438 \cdot (120 - 20)) = 0.044 \Omega \quad (3.26)$$

де $L_{\text{я}} = 2 \cdot (L_{\text{i}} + L_{\text{л}}) = 2 \cdot (0.128 + 0.176) = 0.495 \text{ м};$

$\rho = 0.0171 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – питомий електричний опір матеріалу обмотки якоря [46];

$\alpha_{\tau} = 0.0048 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ – температурний коефіцієнт питомого електричного розширення [46];

$t_0 = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температуру нагріву обмотки якоря [46].

Внутрішня ЕРС двигуна:

$$E_{\text{i}} = \sqrt{(U_{\text{я}} \cdot \cos \varphi + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}})^2 - (U_{\text{я}} \cdot \sin \varphi + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}})^2} =$$

$$= \sqrt{(103.9 \cdot 0.85 + 57.74 \cdot 0.044)^2 - (103.9 \cdot 0.527 + 57.74 \cdot 0.044)^2} = 70.54 \text{ В} \quad (3.27)$$

3.2.5 Розрахунок коефіцієнтів випучування магнітного потоку

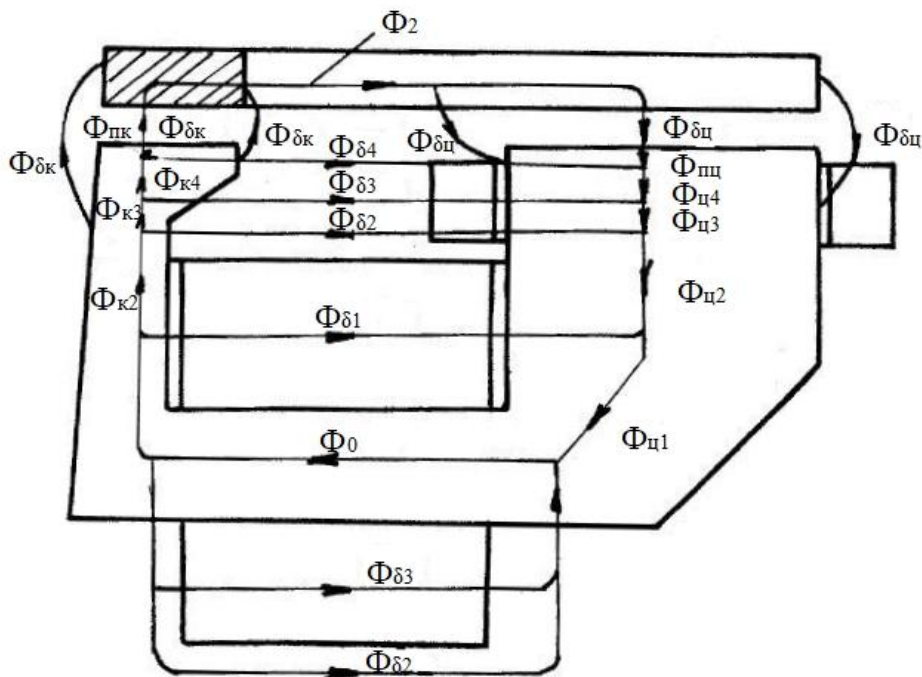


Рис. 3.4 Модель для розрахунку магнітного кола якоря

Розрахунковий перетин пасивного полюсу:

$$\begin{aligned} S_{\text{кр}} &= L_1 \cdot b_{\text{пк}} + 2 \cdot (L_1 + b_{\text{пк}}) \cdot \frac{\delta}{\pi} + \frac{\delta^2}{2} = \\ &= 0.48 \cdot 0.05 + 2 \cdot (0.48 + 0.05) \cdot \frac{0.005}{\pi} + \frac{0.005^2}{2} = 0.026 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

де $L_1 = 0.5 \cdot L = 0.5 \cdot 0.96 = 0.48 \text{ м}$;

$b_{\text{пк}} = 0.05 \text{ м}$ – за рекомендаціями [44].

Коефіцієнт питомої провідності в повітряному проміжку в зоні пасивного полюсу:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{пк}} &= 2 \cdot \mu_0 \left(\frac{1}{\text{Ln} \left(\frac{2 \cdot b_{01} + L_1}{L_1} \right)} + \frac{1}{\pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{b_{01} + 2 \cdot b_{\text{пк}}}{b_{01}} \right) \right) = \\ &= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{\text{Ln} \left(\frac{2 \cdot 0.096 + 0.48}{0.48} \right)} + \frac{1}{\pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{0.096 + 2 \cdot 0.05}{0.096} \right) \right) = \\ &= 8.074 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (3.29)$$

де $b_{01} = B - L_i - b_{\text{пк}} = 0.273 - 0.128 - 0.05 \text{ м}$

$B = (2 \dots 2.5) \cdot L_i = 2.14 \cdot 0.128 = 0.28 \text{ м}$ – за рекомендаціями [44].

Розрахунковий параметр для пасивного полюса:

$$P_K = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{\text{пк}}}{\mu_0 \cdot S_{\text{кр}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8.074 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.026}} = 22.36 \quad (3.30)$$

Повний коефіцієнт провідності пасивного полюса:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{кб}} &= \frac{\mu_0 \cdot S_{\text{кр}} \cdot P_K \cdot \text{ch}(P_K \cdot \delta)}{\text{Sh}(P_K \cdot \delta)} = \\ &= \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.026 \cdot 22.36 \cdot \text{ch}(22.36 \cdot 0.005)}{\text{Sh}(22.36 \cdot 0.005)} = 6.49 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Коефіцієнт провідності пасивного полюса в зазорі:

$$\lambda_K = \frac{\mu_0 \cdot b_{\text{ПК}} \cdot L_1}{\delta} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.05 \cdot 0.48}{0.005} = 6.03 \cdot 10^{-6} \quad (3.32)$$

Коефіцієнт випучування магнітного потоку на пасивному полюсі:

$$\kappa_{\text{БК}} = \frac{1.018 \cdot \lambda_{\text{Кб}}}{\lambda_K} = \frac{1.018 \cdot 6.49 \cdot 10^{-6}}{6.03 \cdot 10^{-6}} = 1.095 \quad (3.34)$$

Розрахунковий перетин активного полюса:

$$\begin{aligned} S_{\text{ЦР}} &= \frac{p \cdot \tau \cdot L_i}{2} \cdot (p \cdot \tau + 2 \cdot L_i) \cdot \frac{\delta}{\pi} + \frac{\delta^2}{2} = \\ &= \frac{3 \cdot 0.16 \cdot 0.128}{2} \cdot (3 \cdot 0.16 + 2 \cdot 0.128) \cdot \frac{0.005}{\pi} + \frac{0.005^2}{2} = 0.032 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (3.35)$$

Питомий коефіцієнт провідності у повітряному зазорі в зоні активного полюса:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{ПЦ}} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{1}{\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot b_{01} + L_1}{L_1} \right)} + \frac{1}{\pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{b_{01} + 4 \cdot L_i}{b_{01}} \right) \right) = \\ &= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{1}{\text{Ln} \left(\frac{4 \cdot 0.096 + 0.48}{0.48} \right)} + \frac{1}{\pi} \cdot \text{Ln} \left(\frac{0.096 + 4 \cdot 0.128}{0.096} \right) \right) = \\ &= 5.77 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Розрахунковий параметр активного полюса:

$$P_{\text{Ц}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{\text{ПЦ}}}{\mu_0 \cdot S_{\text{ЦР}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5.77 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.032}} = 16.99 \quad (3.37)$$

Коефіцієнт Картера:

$$\kappa_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \frac{b_{\text{П0}}^2}{\delta \cdot \left(5 + \frac{b_{\text{П0}}}{\delta} \right)}} = \frac{0.107}{0.107 - \frac{0.022^2}{0.005 \cdot \left(5 + \frac{0.022}{0.005} \right)}} = 1.11 \quad (3.38)$$

Повний коефіцієнт провідності активного полюса:

$$\lambda_{\text{цв}} = \frac{1.3 \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{цр}} \cdot P_{\text{ц}} \cdot \text{ch}(P_{\text{ц}} \cdot \delta \cdot \kappa_{\delta})}{\text{Sh}(P_{\text{ц}} \cdot \delta \cdot \kappa_{\delta})} =$$

$$= \frac{1.3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.032 \cdot 16.99 \cdot \text{ch}(16.99 \cdot 0.005 \cdot 1.11)}{\text{Sh}(16.99 \cdot 0.005 \cdot 1.11)} = 9.42 \cdot 10^{-6} \quad (3.39)$$

Коефіцієнт провідності активного полюса:

$$\lambda_{\text{ц}} = \frac{\mu_0 \cdot L_i \cdot L_1 \cdot \tau}{2 \cdot \delta \cdot \kappa_{\delta} \cdot b_{z2}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.128 \cdot 0.48 \cdot 0.16}{2 \cdot 0.005 \cdot 1.11 \cdot 0.128} = 8.7 \cdot 10^{-6} \quad (3.40)$$

Коефіцієнт випучування магнітного потоку в пасивному полюсі:

$$\kappa_{\text{вц}} = \frac{\lambda_{\text{цв}}}{\lambda_{\text{ц}}} = \frac{9.42 \cdot 10^{-6}}{8.7 \cdot 10^{-6}} = 1.083 \quad (3.41)$$

3.2.6 Розрахунок магнітного кола

Магнітний потік обмотки збудження на подвійну полюсну поділку:

$$\Phi_{2\tau} = \frac{\pi \cdot E_i \cdot \beta_0}{4.44 \cdot f \cdot w_{\text{я}} \cdot \kappa_0 \cdot \beta_1} = \frac{\pi \cdot 70.54 \cdot 0.52}{4.44 \cdot 100 \cdot 69 \cdot 0.866 \cdot 0.34} = 0.013 \text{ Вб} \quad (3.42)$$

де $\beta_0=0.52$; $\beta_1=0.34$ – коефіцієнти магнітного поля за даними [47];

$\kappa_0=0.866$ – обмоточний коефіцієнт для зосередженої обмотки [46].

Магнітна індукція в повітряному проміжку на поверхні зубця вторинного елемента:

$$B_{\delta\text{м}} = \frac{\Phi_{2\tau}}{2 \cdot \tau \cdot L_i \cdot \beta_0} = \frac{0.013}{2 \cdot 0.16 \cdot 0.128 \cdot 0.52} = 0.6 \text{ Т} \quad (3.43)$$

Магнітна індукція в повітряному проміжку під пасивним плюсом:

$$B_{\delta\text{к}} = B_{\delta\text{м}} \cdot \frac{S_{\text{ц}} \cdot \kappa_{\text{вц}}}{S_{\text{к}} \cdot \kappa_{\text{бк}}} = 0.6 \cdot \frac{0.049 \cdot 1.083}{0.048 \cdot 1.095} = 0.6 \text{ Т} \quad (3.44)$$

$$\text{де } S_{\text{к}} = 2 \cdot p \cdot \tau \cdot b_{\text{пк}} = 2 \cdot 3 \cdot 0.16 \cdot 0.05 = 0.048 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{ц}} = p \cdot b_{z2} \cdot L_i = 3 \cdot 0.128 \cdot 0.48 = 0.049 \text{ м}^2$$

Визначаємо ширину полюсного наконечника пасивного полюса:

$$b_{\text{ПК}} = \frac{b_{z2} \cdot L_i \cdot \kappa_{\text{бЦ}}}{2 \cdot \tau \cdot \kappa_{\text{БК}}} = \frac{0.128 \cdot 0.128 \cdot 1.083}{2 \cdot 0.16 \cdot 1.095} = 0.051 \text{ м} \quad (3.45)$$

Товщина вторинного елемента:

$$\Delta_2 = \frac{B_{\delta\text{м}} \cdot \tau \cdot \kappa_{\text{бЦ}} \cdot L_i}{\kappa_{\text{БК}} \cdot b_{z2} \cdot B_2} = \frac{0.6 \cdot 0.16 \cdot 1.083 \cdot 0.128}{1.095 \cdot 0.128 \cdot 1.5} = 0.063 \text{ м} \quad (3.46)$$

де $B_2=1.5 \text{ Т}$ – магнітна індукція у ВЕ за рекомендаціями [44].

Магнітна індукція в зубці якоря:

$$B_{z1} = B_{\delta\text{м}} \frac{(b_{z2} - b_{\text{ПІ}})}{b_{z1} \cdot \kappa_{3\text{С}}} = 0.6 \frac{(0.128 - 0.048)}{0.059 \cdot 0.92} = 0.89 \text{ Т} \quad (3.47)$$

де $\kappa_{3\text{С}} = 0.92$ – коефіцієнт заповнення пакета сталлю.

МРС повітряного проміжку зазору під пасивним полюсом:

$$F_{\delta\text{К}} = \frac{B_{\delta\text{К}} \cdot \delta}{\kappa_{\text{бЦ}} \cdot \mu_0} = \frac{0.6 \cdot 0.005}{1.083 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 2232 \text{ А} \quad (3.48)$$

МРС повітряного проміжку під активним полюсом:

$$F_{\delta\text{Ц}} = \frac{B_{\delta\text{Ц}} \cdot \delta \cdot \kappa_{\delta}}{\mu_0} = \frac{0.6 \cdot 0.005 \cdot 1.11}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 2677 \text{ А} \quad (3.49)$$

МРС на ділянці 1-2' за схемою на рисунку 3.4:

$$F_{1-2'} = F_{\delta\text{К}} + F_{\delta\text{Ц}} + F_2 = 2232 + 2677 + 616.5 = 5526.5 \text{ А} \quad (3.50)$$

де $F_2 = A_2 \cdot (L_2 + \Delta_2) = 2890 \cdot (0.15 + 0.063) = 616.5 \text{ А}$;

$A_2=2890 \text{ А/м}$ – за кривою намагнічування для сталі ст.3 при індукції в 1.5 Т ;

$L_2=0.15 \text{ м}$ – відстань між осями активного і пасивного полюса.

МРС реакції якоря:

$$F_{\text{я}} = \frac{m \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{я}} \cdot w_{\text{я}} \cdot \kappa_0}{\pi \cdot p} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 57.74 \cdot 69 \cdot 0.866}{\pi \cdot 3} = 1553 \text{ А} \quad (3.51)$$

Магнітний потік під пасивним полюсом:

$$\Phi_{\text{ПК}} = B_{\delta\text{К}} \cdot S_{\text{К}} \cdot \kappa_{\text{БК}} = 0.6 \cdot 0.048 \cdot 1.095 = 0.032 \text{ Вб} \quad (3.52)$$

Магнітний потік під активним полюсом:

$$\Phi_{\text{III}} = B_{\delta\text{m}} \cdot S_{\text{II}} \cdot \kappa_{\text{bII}} = 0.6 \cdot 0.049 \cdot 1.083 = 0.032 \text{ Вб} \quad (3.53)$$

В якості матеріалу обираємо сталь 3413, для пасивного полюсу – 10895.

Сталь ст.3 – матеріал для вторинного елемента.

Індукція під пасивним полюсом якоря:

$$B_{\text{ПК}} = B_{\delta\text{K}} \cdot \kappa_{\text{bK}} = 0.6 \cdot 1.095 = 0.7 \text{ Т} \quad (3.54)$$

$$B_{\text{III}} = B_{\delta\text{m}} \cdot \kappa_{\text{bII}} = 0.6 \cdot 1.083 = 0.7 \text{ Т} \quad (3.55)$$

Магнітна напруженість на пасивному полюсі:

$$F_{\text{ПК}} = A_{\text{ПК}} \cdot \Delta_1 = 261 \cdot 0.006 = 1.57 \text{ А} \quad (3.56)$$

де $A_{\text{ПК}}=261 \text{ А/м}$ – для індукції 0.7 Т для сталі;

$\Delta_1=0.006 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітна напруженість в зубцях:

$$F_{21} = A_{21} \cdot h_{\text{II}} = 126 \cdot 0.035 = 4.47 \text{ А} \quad (3.57)$$

де $A_{12}=126 \text{ А/м}$ – для індукції 0.9 Т для сталі Ст. 3413.

Магнітний опір на ділянці 3-3'. Розсіяння у вікні обмотки збудження.

$$R_{\sigma 4} = \frac{b_{01}}{\mu_0 \cdot \Delta_1 \cdot L_1} = \frac{0.096}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.006 \cdot 0.48} = 2.64 \cdot 10^7 \Omega \quad (3.58)$$

Магнітне напруження на ділянці 3-3':

$$F_{33'} = F_{12'} + F_{\text{ПК}} + F_{21} = 5526 + 1.556 + 4.469 = 5532 \text{ А} \quad (3.59)$$

Магнітний потік розсіювання на ділянці 3-3':

$$\Phi_{\sigma 4} = \frac{F_{33'}}{R_{\sigma 4}} = \frac{5532}{2.64 \cdot 10^7} = 2.096 \cdot 10^{-4} \text{ Вб} \quad (3.60)$$

Магнітний потік на ділянці 3-4:

$$\Phi_{\kappa 4} = \Phi_{\text{ПК}} + \Phi_{\sigma 4} = 0.032 + 0.0002 = 0.032 \text{ Вб} \quad (3.61)$$

Магнітний опір на ділянці 4-4' розсіювання у вікні обмотки збудження:

$$R_{\sigma 3} = \frac{b_0 + b_{01}}{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta_3 \cdot L_1} = \frac{0.114 + 0.096}{2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.008 \cdot 0.48} = 2.171 \cdot 10^7 \Omega \quad (3.62)$$

де $\Delta_3=0.008 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітна індукція в зубці сердечника якоря:

$$B_{z2} = B_{z1} \cdot \frac{b_{211} \cdot \Phi_{K4}}{b_{21} \cdot \Phi_{III}} = 0.89 \cdot \frac{0.085 \cdot 0.032}{0.059 \cdot 0.032} = 1.13 \text{ Тл} \quad (3.63)$$

Обмежимо максимальне значення індукції в магнітопроводі $B_{\delta H} = 1.6 \text{ Тл}$

Магнітне напруження на ділянці 3-4:

$$F_{K4} = A_{K4} \cdot L_{K4} = 2090 \cdot 0.008 = 16.7 \text{ А} \quad (3.64)$$

де $A_{K4} = 2090 \text{ А/м}$ – при індукції 1.6 Тл для сталі 10895.

$L_{K4} = 0.008 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітне напруження на ділянці 3'-4':

$$F_{II4} = A_{II4} \cdot L_{II4} = 222 \cdot 0.008 = 1.8 \text{ А} \quad (3.65)$$

де $A_{II4} = 2090 \text{ А/м}$ – при індукції 1.13 Тл для сталі 3413;

$L_{II4} = 0.008 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітна напруженість на ділянці 4-4':

$$F_{44'} = F_{33'} + F_{K4} + F_{II4} = 5532 + 16.7 + 1.8 = 5550 \text{ А} \quad (3.66)$$

Магнітний потік розсіяння на ділянці 4-4':

$$\Phi_{\sigma 3} = \frac{F_{44'}}{R_{\sigma 3}} = \frac{5550}{2.171 \cdot 10^7} = 2.556 \cdot 10^{-4} \text{ Вб} \quad (3.67)$$

Магнітне напруження на ділянці 4-5:

$$F_{K3} = A_{K3} \cdot L_{K3} = 2890 \cdot 0.025 = 72.25 \text{ А} \quad (3.68)$$

де $A_{K3} = 2890 \text{ А/м}$ – при індукції 1.6 Тл для сталі 10895.

$L_{K3} = 0.008 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітний опір на ділянці 5-5':

$$R_{\sigma 2} = \frac{b_0}{\mu_0 \cdot L_{\sigma 2} \cdot L_1} = \frac{0.114}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.17 \cdot 0.48} = 1.112 \cdot 10^6 \Omega \quad (3.69)$$

де $L_{\sigma 2} = 0.17 \text{ м}$ – довжина магнітного потоку $\Phi_{\sigma 2}$;

Магнітний потік на ділянці 4-5:

$$\Phi_{K3} = \Phi_{K4} + \Phi_{\sigma 3} = 0.032 + 2.556 \cdot 10^{-4} = 0.032 \text{ Вб} \quad (3.70)$$

Індукція в нижній частині зубця:

$$B_{Z3} = B_{Z1} \cdot \frac{b_{Z11} \cdot \Phi_{K3} \cdot \kappa_{\Phi Я}}{b_{Z1} \cdot \Phi_{III}} = 0.89 \cdot \frac{0.085 \cdot 0.032 \cdot 1.089}{0.059 \cdot 0.032} = 1.421 \text{ Тл} \quad (3.71)$$

$$\text{де } \kappa_{\Phi Я} = 1 + \beta_{d0} \cdot (\kappa_H - 1) = 1 + 0.29 \cdot (1.307 - 1) = 1.089;$$

$$\kappa_H = \kappa_e + \kappa_i \cdot (\beta_{d11} - \beta_{d00}) = 1.1 + 0.18 \cdot (1.706 - 0.558) = 1.307;$$

$$\kappa_i = 0.18 [47];$$

$$\beta_{d11} = \frac{\beta_{d1}}{\beta_1} = \frac{0.58}{0.34} = 1.7$$

$$\beta_{d00} = \frac{\beta_{d0}}{\beta_0} = \frac{0.29}{0.52} = 0.558$$

$\beta_{d1} = 0.58, \beta_1 = 0.54, \beta_0 = 0.52, \beta_{d0} = 0.29$ – коефіцієнт магнітного поля для зосередженої обмотки за [47].

Магнітне напруження в нижній частині зубця:

$$F_{\Pi 3} = A_{Z3} \cdot L_{Z3} = 243 \cdot 0.025 = 6.075 \text{ А} \quad (3.72)$$

де $A_{Z3} = 243 \text{ А/м}$ – при індукції 1.2 Тл для сталі 10895 [46].

Магнітна напруженість на ділянці 5-5':

$$F_{55'} = F_{44'} + F_{K3} + F_{\Pi 3} = 5550 + 72.25 + 6.075 = 5629 \text{ А} \quad (3.73)$$

Магнітний потік розсіяння на ділянці 5-5':

$$\Phi_{\sigma 2} = \frac{F_{55'}}{R_{\sigma 2}} = \frac{5629}{1.112 \cdot 10^6} = 5.063 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} \quad (3.74)$$

Магнітний потік на ділянці 5-6:

$$\Phi_{K2} = \Phi_{K3} + \Phi_{\sigma 2} = 0.032 + 5.063 \cdot 10^{-3} = 0.037 \text{ Вб} \quad (3.75)$$

Магнітний опір на ділянці 6-6':

$$R_{\sigma 1} = \frac{b_0}{\mu_0 \cdot L_{\sigma 1} \cdot L_1} = \frac{0.114}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.07 \cdot 0.48} = 2.7 \cdot 10^6 \Omega \quad (3.76)$$

де $L_{\sigma 1} = 0.07 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітна напруженість наконечника на ділянці 5-6:

$$F_{K2} = A_{K2} \cdot L_{K3} = 2890 \cdot 0.05 = 144.5 \text{ A} \quad (3.77)$$

де $A_{K2}=2890 \text{ А/м}$ – при індукції 1.6 Тл [46].

Індукція в ярмі якоря:

$$B_{\text{ц2}} = \frac{\Phi_{K2}}{L_i \cdot L_1} = \frac{0.037}{0.128 \cdot 0.48} = 0.611 \text{ Тл} \quad (3.78)$$

Магнітна напруженість в зубці:

$$F_{Z2} = A_{Z2} \cdot L_{Z2} = 91 \cdot 0.059 = 5.369 \text{ A} \quad (3.79)$$

де $A_{Z2}=91 \text{ А/м}$ – при індукції 0.65 Тл [46];

$L_{Z2}=0.059 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітна напруженість на ділянці 6-6':

$$F_{66'} = F_{55'} + F_{K2} + F_{Z2} = 5629 + 144.5 + 5.369 = 5778 \text{ A} \quad (3.80)$$

Магнітний потік розсіяння на ділянці 6-6':

$$\Phi_{\sigma 1} = \frac{F_{66'}}{R_{\sigma 1}} = \frac{5778}{2.7 \cdot 10^6} = 2.14 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} \quad (3.81)$$

Магнітний потік на ділянці 7-6:

$$\Phi_{K1} = \Phi_{\sigma 1} + \Phi_{K2} = 2.14 \cdot 10^{-3} \cdot 0.037 = 0.04 \text{ Вб} \quad (3.82)$$

Магнітна напруженість на ділянці 7-6:

$$F_{K1} = A_{K1} \cdot L_{K1} = 2890 \cdot 0.06 = 173.4 \text{ A} \quad (3.83)$$

де $A_{K1}=2890 \text{ А/м}$ – при індукції 1.6 Тл [46];

$L_{K1}=0.06 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітна напруженість на ділянці 7-7':

$$F_{77'} = F_{66'} + 2 \cdot F_{K1} = 5778 + 2 \cdot 173.4 = 6125 \text{ A} \quad (3.84)$$

Магнітна напруженість:

$$F_0 = A_0 \cdot L_0 = 2890 \cdot 0.2 = 578 \text{ A} \quad (3.85)$$

де $A_0=2890 \text{ А/м}$ – при індукції 1.6 Тл [46];

$L_0=0.2 \text{ м}$ – з рисунку 3.4.

Магнітний потік розсіяння на ділянці 1-2:

$$\Phi_{\sigma 12} = F_{77'} \cdot G_{\sigma 23} = 6125 \cdot 1.467 \cdot 10^{-7} = 8.986 \cdot 10^{-4} \text{ Вб} \quad (3.86)$$

$$\begin{aligned} \text{де } G_{\sigma 23} &= \mu_0 \cdot L_1 \cdot \left(\frac{1.52 \cdot b_{CKI}}{b_K + 2 \cdot h_0 + 1.52 \cdot b_{CKI}} + \frac{0.76 \cdot b_{CKI}}{3 \cdot b_K + (h_0 + 1.52 \cdot b_{CKI})} \right) = \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.48 \cdot \left(\frac{1.52 \cdot 0.032}{0.11 + 2 \cdot 0.051 + 1.52 \cdot 0.032} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{0.76 \cdot 0.032}{3 \cdot 0.11 + (0.051 + 1.52 \cdot 0.032)} \right) = 1.476 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}; \end{aligned}$$

$b_{CKI} = 0.051 \text{ м}$ – з з рисунку 3.4.

$b_K = 0.11 \text{ м}$ – з з рисунку 3.4.

$h_0 = 0.051 \text{ м}$ – з з рисунку 3.4.

Основний магнітний потік:

$$\Phi_0 = \Phi_{K1} + \Phi_{\sigma 12} = 0.04 + 8.986 \cdot 10^{-4} = 0.041 \text{ Вб} \quad (3.87)$$

Коефіцієнт розсіяння магнітного потоку збудження:

$$k_{PB} = \frac{\Phi_0}{\Phi_{ПК}} = \frac{0.041}{0.032} = 1.268 \quad (3.88)$$

Сумарна МРС обмотки збудження:

$$\Sigma F = F_{77'} + F_0 = 6125 + 578 = 6703 \text{ А} \quad (3.89)$$

Індуктивний опір реакції якоря:

$$\begin{aligned} X_{ad} &= \frac{4 \cdot m \cdot k_0^2 \cdot \mu_0 \cdot L_i \cdot \tau \cdot \beta_{d1} \cdot f \cdot w_{\text{я}}^2}{\pi \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot p \cdot k_{\Delta}} = \\ &= \frac{4 \cdot 3 \cdot 0.866^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.48 \cdot 0.16 \cdot 0.58 \cdot 100 \cdot 69^2}{\pi \cdot 1.1 \cdot 0.005 \cdot 3 \cdot 1.183} = 1.034 \Omega \end{aligned} \quad (3.90)$$

$$\text{де } k_{\Delta} = 1 + \frac{L_i \cdot \beta_{do}}{4 \cdot b_{ПК}} = 1 + \frac{0.48 \cdot 0.29}{4 \cdot 0.051} = 1.183$$

Індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі:

$$X_{aq} = X_{ad} \cdot \frac{\beta_{q1}}{\beta_{d1}} = 1.034 \cdot \frac{0.6}{0.58} = 1.069 \Omega \quad (3.91)$$

де $\beta_{q1} = 0.6$ – коефіцієнт магнітного потоку за [47].

Повні реактивності опорів якоря:

$$X_d = X_{ad} + X_s = 1.034 + 0.269 = 1.303 \, \Omega \quad (3.92)$$

$$X_q = X_{aq} + X_s = 1.069 + 0.269 = 1.339 \, \Omega \quad (3.93)$$

Відносні значення опорів обмотки якоря:

$$r'_j = R_j \cdot \frac{I_j}{U_j} = 0.044 \cdot \frac{57.74}{104} = 0.024 \text{ в.о.} \quad (3.94)$$

$$X'_q = X_q \cdot \frac{I_j}{U_j} = 1.339 \cdot \frac{57.74}{104} = 0.744 \text{ в.о.} \quad (3.95)$$

$$X'_d = X_d \cdot \frac{I_j}{U_j} = 1.303 \cdot \frac{57.74}{104} = 0.724 \text{ в.о.} \quad (3.96)$$

МРС реакції якоря по поздовжній осі:

$$F_{ad} = F_j \cdot \frac{\beta_{d1}}{\beta_1} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\cos \varphi + r'_j}{\sin \varphi + X'_q}}} = 1553 \cdot 0.34 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{0.85 + 0.024}{0.527 + 0.744}}} = 2039 \text{ А} \quad (3.97)$$

МРС обмотки збудження:

$$F_3 = \Sigma F + F_{ad} = 6703 + 2039 = 8500 \text{ А} \quad (3.98)$$

3.2.7 Розрахунок геометричних і обмоткових даних обмотки збудження

Перетин вікна обмотки збудження:

$$S_0 = \frac{1.2 \cdot F_3}{j_3 \cdot \kappa_{33}} = \frac{1.2 \cdot 8742}{2.85 \cdot 0.6} = 6128 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2 \quad (3.99)$$

Де $j_3 = 2.75 \text{ А / мм}^2$ – густина струму обмотки збудження за рекомендаціями [38].

$\kappa_{33} = 0.6$ – коефіцієнт заповнення міддю вікна для обмотки збудження [47].

Висота вікна під обмоткою збудження:

$$h_0 = \frac{S_0}{b_0} = \frac{6128}{120} = 0.051 \text{ мм} \quad (3.100)$$

де $b_0 = 120 \text{ мм}$ – з рисунку 3.4.

Визначаємо висоту ярма модуля:

$$b_{\text{я}} = \frac{\Phi_0}{B_0 \cdot L} = \frac{0.041}{1.6 \cdot 0.96} = 0.03 \text{ м} \quad (3.101)$$

де $B_0 = 1.6 \text{ Тл}$ – індукція в ярмі модуля [44].

Кількість витків обмотки збудження:

$$w_{\text{я}} = \frac{U_3}{\rho \cdot (1 + \alpha_{\tau} \cdot (t_0 - 20^{\circ}\text{C})) \cdot j_3 \cdot L_{\text{срз}}} =$$

$$= \frac{24}{0.0171 \cdot (1 + 1.604 \cdot 10^{-5} \cdot (120 - 20^{\circ}\text{C})) \cdot 2.85 \cdot 0.822} = 432 \quad (3.102)$$

де $L_{\text{срз}} = L - \Delta_{\text{СК}} + 2 \cdot b_{\text{я}} + 2 \cdot h_0 = 0.96 - 0.3 + 2 \cdot 0.03 + 2 \cdot 0.051 = 0.822 \text{ м}$ – середня довжина витка обмотки збудження.

$\Delta_{\text{СК}} = 0.3 \text{ м}$ – подвійна довжина зрізу по обмотці збудження [44].

Струм обмотки збудження:

$$I_3 = \frac{1.2 \cdot F_3}{w_3} = \frac{1.2 \cdot 850}{432} = 23.61 \text{ А} \quad (3.103)$$

Уточнюємо густину струму в обмотці збудження:

$$g_3 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot \kappa_{33}}{w_3} = \frac{0.051 \cdot 0.12 \cdot 0.6}{432} = 8.075 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (3.104)$$

$$j_3 = \frac{I_3}{g_3} = \frac{23.61}{8.075 \cdot 10^{-6}} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ А / м}^2 \quad (3.105)$$

3.3 Комп'ютерне моделювання модуля ЛІД

На основі геометричних та обмоткових даних, розрахованих в підрозділі 3.2, розроблено комп'ютерну модель в програмному середовищі ANSYS Discovery AIM Student. Низькочастотні електромагнітні розрахунки в даному середовищі виконуються в пакеті ANSYS Maxwell – високоефективному інтерактивному програмному пакеті, який використовує аналіз кінцевих елементів (FEA) для вирішення електричних чи магнітних задач. Maxwell

розв'язує задачі електромагнітного поля, вирішуючи рівняння Максвелла у скінченній області простору. Відповідний набір рівнянь використовуються на основі обраної задачі: електростатична (Electrostatic), магнітостатична (Magnetostatic), визначення вихрових струмів (Eddy Current) і магнітного перехідного процесу (Magnetic Transient).

При створенні моделі було використано геометрію магнітопроводу та параметри котушок за визначеними у підпункті 3.2 значеннями. Вирішення часозалежної задачі проводилось в режимі магнітного перехідного процесу з врахуванням значення вихрових струмів у ВЕ. З метою оптимізації розрахунку область моделювання обмежена, тобто розрахункова модель поміщена у вакуумний паралелепіпед, розміри якого складають 1.5 кратне значення лінійних розмірів моделі.

Результати електромагнітного розрахунку представлені для режиму холостого ходу (рис.3.5), короткого замикання (рис. 3.6) та руху з номінальною швидкістю (рис. 3.7). Значення струмів і частот у всіх випадках є номінальними. Для спрощення розрахунку приймаємо, що індукторний модуль є нерухомим відносно системи координат, а рух здійснює вторинний елемент.

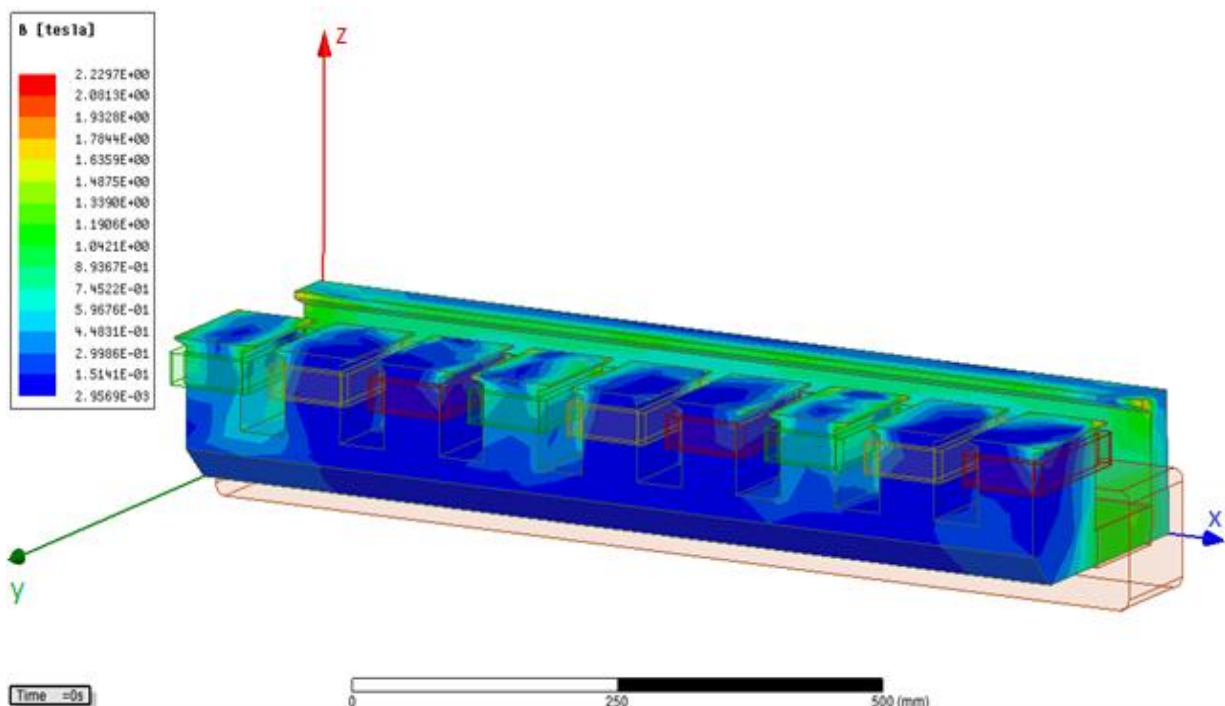


Рис. 3.5 Розподіл магнітної індукції по поверхні магнітопроводу в режимі ХХ

В даному випадку під режимом холостого ходу мається на увазі режим при якому вторинний елемент відсутній в зоні дії індукторного модуля. Через відсутність частини магнітопроводу (вторинного елемента) намагнічується область під обмоткою збудження, зубці якоря намагнічуються лише на краях і спостерігається насичення лише на краях. В реальних умовах експлуатації даний режим не використовується, оскільки індукторний модуль і вторинний елемент знаходяться поруч.

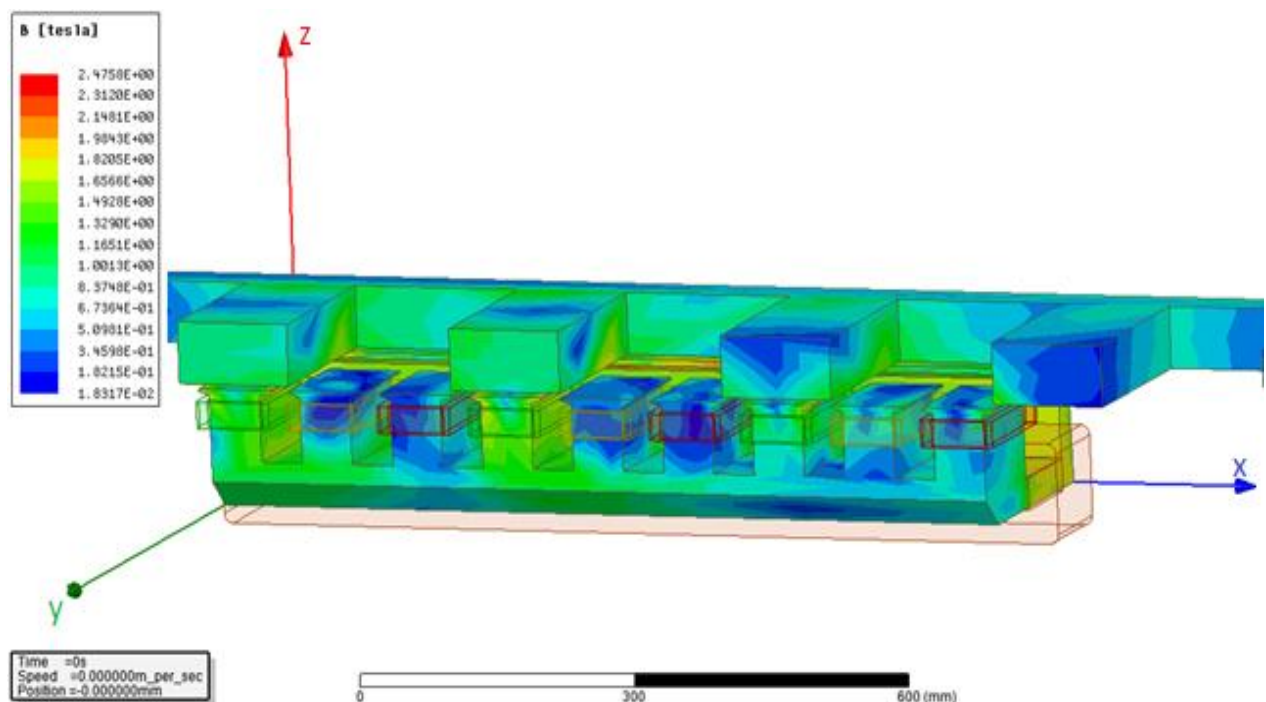


Рис. 3.6 Розподіл магнітної індукції по поверхні магнітопроводу в режимі КЗ

Під режимом короткого замикання мається на увазі режим при якому індукторний модуль та вторинний елемент нерухомі відносно один одного. Даний режим роботи не є штатним в експлуатації, але є можливим. Максимальне значення магнітної індукції досягає 2.47 Тл, а в цілому відповідає нормальним значенням. Це свідчить про можливість тривалої роботи, що є характерним для синхронних електричних машин.

Аналіз результатів моделювання в номінальному режимі показує, що значення магнітної індукції в цілому збігаються зі значеннями аналітичного

розрахунку. Це дає можливість говорити про адекватність моделі і можливість проведення подальших розрахунків.

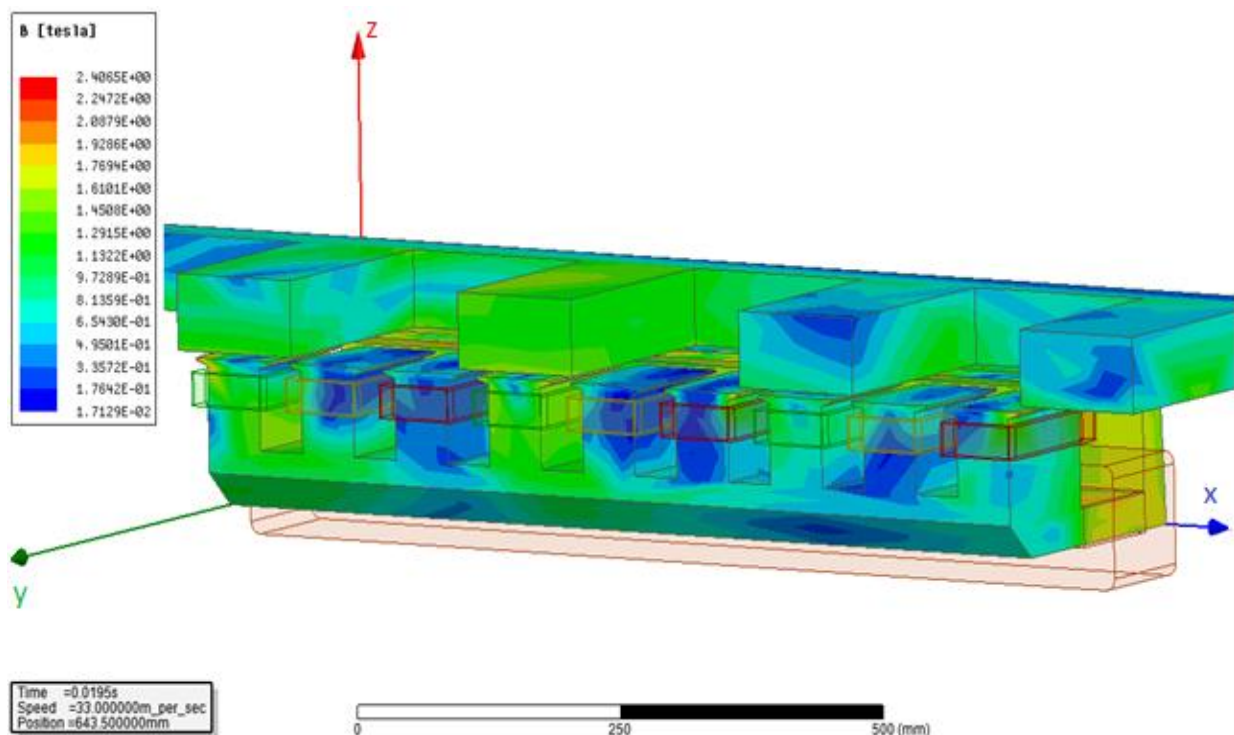


Рис. 3.7 Розподіл магнітної індукції по поверхні магнітопроводу в номінальному режимі

3.4 Розрахунок зусиль магнітного тяжіння і механічних зусиль, що діють на вторинний елемент

За допомогою моделі розробленою в підрозділі 3.3 визначимо залежності сил, що діють на вторинний елемент в номінальному режимі вздовж осі x (тягова сила) та осі z (сила магнітного тяжіння) (рис. 3.8). Силою вздовж осі y нехтуємо, оскільки модулі на рухомому складі будуть розташовані симетрично і ці сили будуть взаємно скомпенсовані.

За результатами комп'ютерного моделювання отримуємо відповідні графіки і середнє значення сили тяги за один період часу в номінальному режимі – 539 Н та середнє значення сили магнітного тяжіння 18 772 Н, що в цілому відповідає рекомендаціям [44].

Аналогічно визначаємо залежності сил, що діють на вторинний елемент в режимі холостого ходу, руху з синхронною швидкістю та руху з

номінальною швидкістю при різних значеннях частоти. Отримані результати зведені та представлені на рисунку 3.9 та рисунку 3.10.

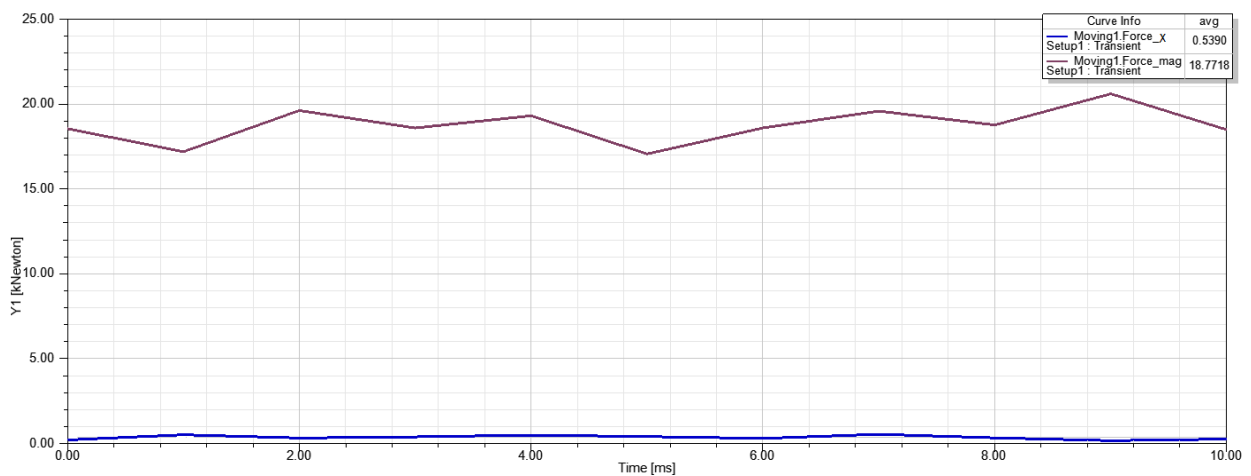


Рис. 3.8 Графік сил, що діють на ВЕ у номінальному режимі за один період

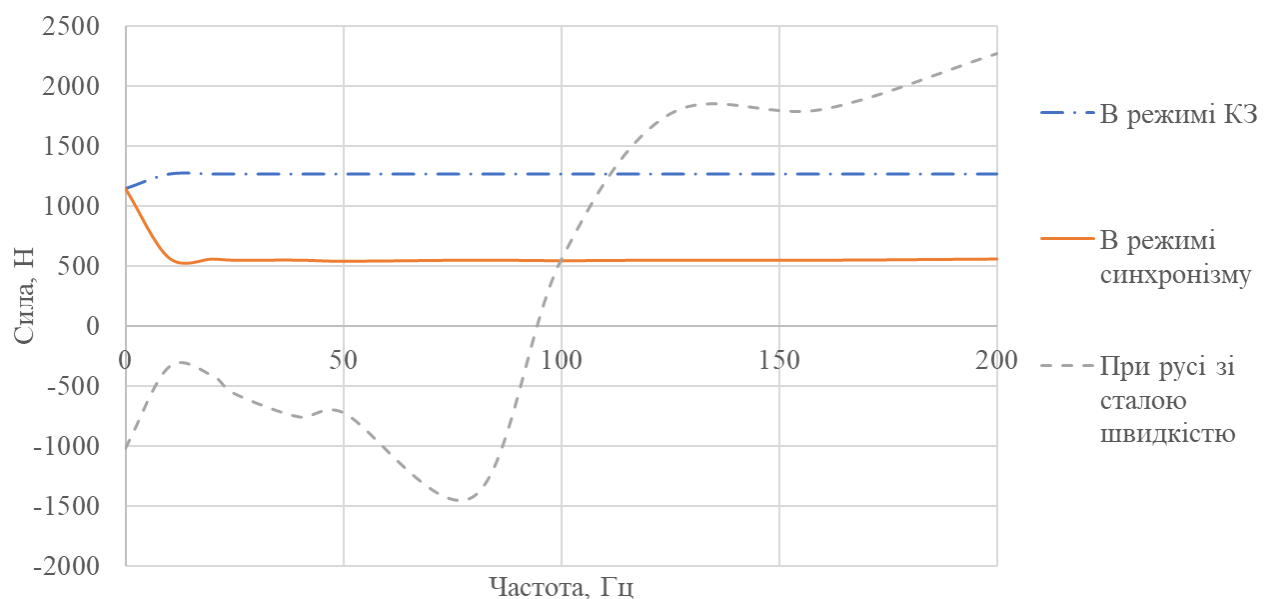


Рис. 3.9 Графік залежності тягової сили від частоти

У режимі синхронізму та у режимі короткого замикання майже одразу сила тяги досягає усталеного значення і є стабільною у всьому діапазоні частот. При русі зі сталою швидкістю (у даному випадку з номінальною) – сила діє в напрямку гальмування при частотах нижче відповідній для даної швидкості, та у напрямку розгону при збільшенні частоти. При чому сила тяги досить швидко перевищує значення для режиму КЗ і досягає три-чотири

кратного перевищення номінального значення, що свідчить про хороші динамічні властивості модуля.

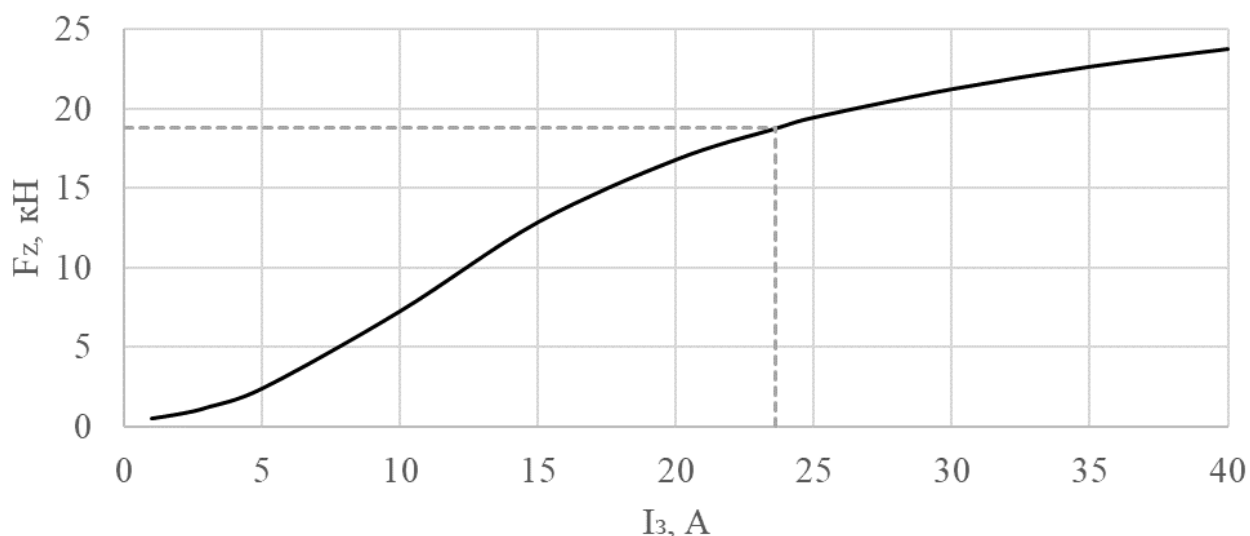


Рис. 3.10 Графік залежності підйомної сили від струму збудження

Підйомна сила керується обмоткою збудження. Крива залежності цієї сили від струму збудження не є лінійною, що зумовлюється магнітним насиченням матеріалу магнітопроводу.

3.5 Розрахунок маси модуля та ККД

За допомогою функції визначення маси деталей програмного забезпечення отримуємо значення маси кожного елемента модуля. Результати наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Маса модуля

Деталь	Маса, кг	Кількість	Загальна маса, кг
Ярмо якоря	99.360	1	99.360
Зубець якоря	4.404	9	39.636
Всього сталі	-	-	198.996
Обмотка якоря	1.147	9	10.323
Обмотка збудження	67.886	1	67.886
Всього міді	-	-	78.209
Модуль	-	-	217.205

Електричні втрати в обмотці якоря:

$$\Delta P_{\text{я}} = m \cdot I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}} = 3 \cdot 57.74^2 \cdot 0.044 = 436.69 \text{ Вт} \quad (3.106)$$

Електричні втрати в обмотці збудження:

$$\Delta P_3 = U_3 \cdot I_3 = 24 \cdot 23.61 = 566.67 \text{ Вт} \quad (3.107)$$

Електричні втрати в сталі:

$$\Delta P_{\text{ст}} = P_z \cdot G_z + P_j \cdot G_j = 39.636 \cdot 4.8 + 99.36 \cdot 5.2 = 706.93 \text{ Вт} \quad (3.108)$$

де $G_z=4.8$ Вт/кг – питомі електричні втрати для сталі 3413 при частоті 100 Гц товщиною 0.35 мм за рекомендаціями [38];

$G_j=5.2$ Вт/кг – питомі електричні втрати для сталі 10895 при частоті 100 Гц за рекомендаціями [38];

$P_z=39.636$ кг – маса ярма якоря за таблицею 3.3;

$P_j=99.36$ кг – маса зубців якоря за таблицею 3.3.

Сумарні втрати:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P &= \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_3 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{д}} = \\ &= 436.69 + 566.67 + 706.93 + 900 = 2.61 \text{ кВт} \end{aligned} \quad (3.109)$$

де $\Delta P_{\text{д}} = 0.05 \cdot S = 900 \text{ Вт}$ – додаткові втрати за рекомендаціями [6].

Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{S} = 1 - \frac{2.61}{18} = 0.855 \quad (3.110)$$

Узагальнимо параметри модуля в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 Параметри модуля

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Номінальна потужність	S	18	кВА
2	Номінальна швидкість	V_H	33	м/с
3	Номінальна лінійна напруга	$U_{\text{ЛН}}$	180	В
4	Напруга обмотки збудження	U_3	24	В
5	Номінальний повітряний проміжок	δ	5	мм
6	ККД	η_H	0.855	
7	Кількість фаз	m	3	
8	Номінальна частота	f	100	Гц
9	Номінальний cosφ	cosφ	0.85	
10	Маса модуля	G_m	217.2	кг
11	Довжина модуля	L	1	м

12	Ширина модуля	B	0.284	м
13	Висота модуля	H	0.16	м
14	Сила магнітного тяжіння в номінальному режимі	F_z	18772	Н
15	Сила тяги в номінальному режимі	F_x	539	Н
16	Товщина вторинного елемента	Δ_2	63	мм

3.6 Опис конструкції модуля двигуна та схеми підключення

За результатами синтезу (підрозділ 2.5) та уточнення геометричних розмірів і розрахункових параметрів (підрозділи 3.2-3.3) здійснено розробку проектного варіанта модуля лінійного індукторного двигуна (рис. 3.11). Він складається з якоря, що включає в себе шихтований магнітопровід, який складається з зубців 3 та спинки якоря 2. Магнітопровід виготовляється з електротехнічної сталі 3413 товщиною 0.5 мм. Листи магнітопроводу покриваються електроізоляційним лаком з обох сторін. В пазах магнітопроводу розміщуються котушки зосередженої обмотки якоря 5.

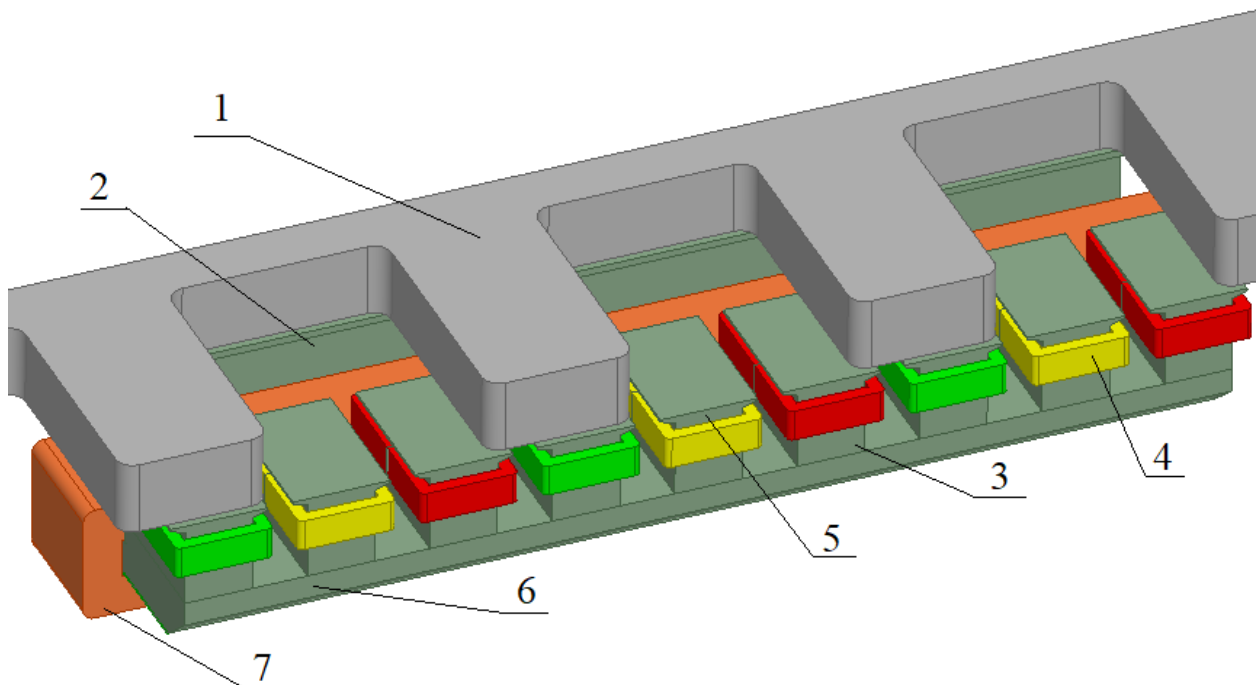


Рис. 3.11 3D – модель проектного варіанта тягово-підйомного ЛІД модульного виконання

Шихтований магнітопровід з обмоткою являється активним полюсом. Пасивний полюс 2 і ярмо 6 виконані зі сталі 10895 з покращеними магнітними властивостями. Котушки обмотки збудження 7 намотані на якорі. У зв'язку з тим, що котушки намотані на ярмі 6, а не навколо ярма 3 стало можливим максимально наблизити ОЗ до повітряного проміжку, що зменшує розсіяння магнітного потоку в ярмі первинної частини, а з іншого боку зменшує загальну висоту пасивного і активного полюсів, що в свою чергу зменшує масу первинної частини. Крім того така намотка дозволяє зменшити середню лінію витка. Це дозволяє зменшити потужність споживану обмоткою збудження. Зубці якоря являються знімними і кріпляться до ярма якоря за допомогою болтів. Стяжні шпильки, шихтовані призми і стяжні болти ізолюють від магнітопроводу за допомогою ізоляційних втулок і прокладок. При цьому зубець і ярм перед стяжкою в місцях дотику промащуються спеціальною феромагнітною змазкою.

Вторинний елемент 1 виконується зі сталі марки Ст.3 товщиною 63 мм. Така конструкція дозволяє максимально спростити його виготовлення (використання плазмового різання), а також майже виключити відходи.

Структурна схема підключення ЛІД для живлення від мережі показана на рисунку 3.12.

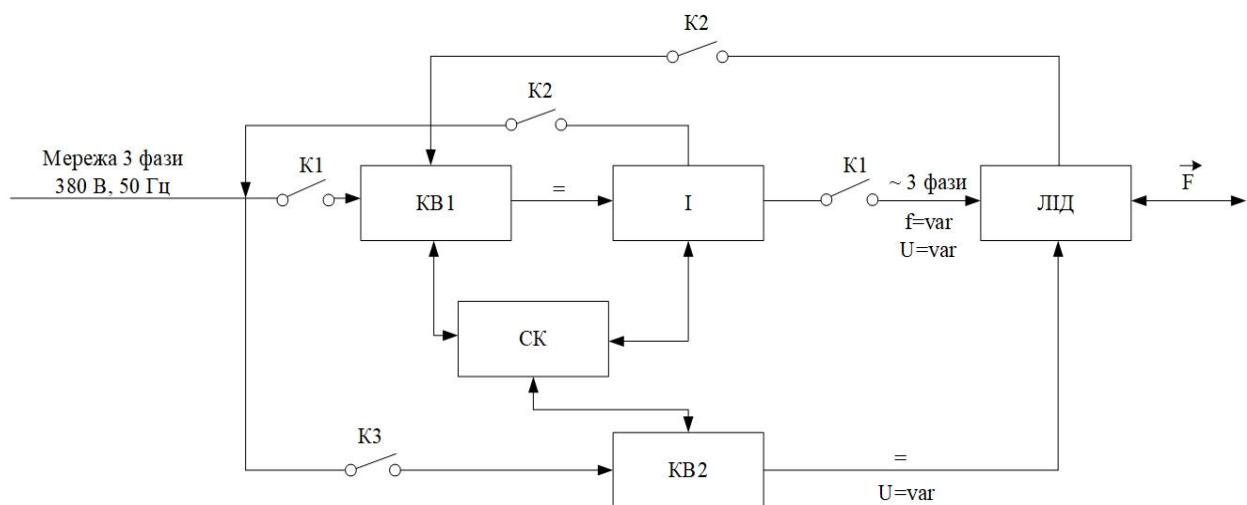


Рис. 3.12 Структурна схема підключення ЛІД

В режимі двигуна трифазна напруга з мережі через замкнуті контакти ключа К1 подається на керований випрямляч КВ1. З випрямляча на інвертор І, який формує трифазну напругу для живлення обмотки якоря. Паралельно через замкнуті контакти К3 подається напруга на керований випрямляч КВ2, який формує напругу живлення обмотки збудження. Обома керованими випрямлячами управляє система керування СК. Використання двох незалежних керованих випрямлячів дозволяє роздільно керувати силою магнітного тяжіння та силою тяги.

Для переходу в генераторний режим контакти К1 розмикають, а К2 замикають. Трифазна напруга, що генерується ЛД, не є стабільною, тому вона подається на КВ1 і інвертор, який вже формує напругу для подачі в мережу.

Також в залежності від умов експлуатації можлива розробка інших систем живлення, наприклад від бортових акумуляторних батарей.

Висновки до розділу 3

У даному розділі спроектовано лінійний індукторний двигун відповідно до обраного варіанту конструкції та поставленого завдання. За результатами аналітичних електромагнітних розрахунків створено модель в програмному середовищі ANSYS Discovery AIM Student.

Проведені на моделі електромагнітні розрахунки в цілому збігаються з аналітичними, тому можна вважати, що створена модель є адекватною. На основі моделі в програмному середовищі проведені розрахунки підйомної та рушійної сили, що діють на вторинний елемент.

Визначено ККД, що становить 85.5%. Це значення є доволі високим та відповідає завданню. В цілому обрана конструкція ЛД є простою, не вимагає складних технологічних операцій при виготовленні та експлуатації. Система живлення може бути забезпечена від мережі або від бортових акумуляторних батарей.

РОЗДІЛ 4. ГРУПОВА СИМЕТРИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО НЕСИМЕТРИЧНИХ МОДУЛІВ ЛІНІЙНИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ

4.1 Огляд систем з груповою симетризацією

Електричні машини і електротехнологічні пристрої на основі трифазних індукторів з біжучим магнітним полем утворюють самостійний генетично визначений, еволюціонуючий клас електромеханічних систем, споріднених за наявністю біжучої хвилі електромагнітного поля в активній зоні індуктора (індукторної системи). Зазначений клас характеризується великою різноманітністю функціональних груп і структурних представників, які широко використовуються в електротехнологіях, в системах тягового і виконавчого електропривода, механізмах ударної дії, індукційних прискорювачах та ін. [48]. Проте в кожній довільній трифазній системі виникає електрична асиметрія через різницю в індуктивних або ємнісних опорах фаз. Такий вид асиметрії часто зустрічається як в динамічних, так і в статичних (трифазні трансформатори, шинопроводи, високовольтні кабельні лінії) системах. Як відомо, наявність електричної асиметрії фазних струмів призводить до збільшення електричних втрат, тому виникає потреба в зрівнюванні фазних параметрів кожної з систем.

Вперше спосіб групової симетризації в тягових лінійних двигунах був реалізований у 1970 році в ОКБ лінійних двигунів в проекті багатоіндукторної системи тягового лінійного асинхронного електроприводу [13].

Плоскі елементарні індуктори з поверхневими розподіленими обмотками, характеризуються поздовжньо-поперечною електромагнітною асиметрією (наявність первинних кінцевих ефектів), наслідком якої є нерівномірний характер розподілу індукції на активній поверхні індуктора і несиметрія фазних струмів. В динамічних режимах асиметрія такої системи буде зростати внаслідок впливу поздовжніх вторинних кінцевих

електромагнітних ефектів, а також нерівномірності розподілу поля вихрових вторинних струмів в межах активних зон елементарних індукторів системи.

Ефект групової симетризації в трьохіндукторній системі досягається послідовним з'єднанням обмоток однойменних фаз елементарних індукторів з виконанням міжіндукторної транспозиції.

$$\begin{aligned}I_A &= I_{A11} = I_{A22} = I_{A33} \\I_B &= I_{B12} = I_{B23} = I_{B31} \\I_C &= I_{C13} = I_{C21} = I_{C32}\end{aligned}\tag{4.1}$$

де I_{A11} , I_{B12} , I_{C13} , ... – струми транспонованих фаз (перший цифровий індекс позначає порядковий номер індуктора, а другий – місце розташування фази за поздовжнім напрямком індуктора.

За умови забезпечення зазначених вимог, у фазах електромеханічної системи будуть протікати інтегральні струми $I_A=I_B=I_C$, симетрія яких забезпечується рівністю сумарних індуктивних опорів, з врахуванням впливу динамічної асиметрії, зумовленої перехідними процесами зумовленими поздовжніми кінцевими ефектами [49].

4.2 Генетична природа кінцевих ефектів

Наявність країв струмонесучої поверхні джерела за відповідним напрямком зумовлює дискретне зниження електромагнітної симетрії джерела поля. Це супроводжується виникненням та посиленням впливу характерних електромагнітних явищ, відомих в теорії електричних машин під назвою первинного поздовжнього та поперечного кінцевих ефектів [50].

Під вторинним поздовжнім кінцевим ефектом розуміють сукупність електромагнітних явищ, зумовлених процесом послідовного входу і виходу частин вторинного елемента через активну зону індуктора.

Відкриття Генетичної класифікації первинних джерел електромагнітного поля [42] дало можливість вперше встановити генетичну

природу і визначити область існування генетично допустимих ЕМ-структур, в яких проявляються як поздовжні, так і поперечні кінцеві електромагнітні ефекти. Вперше було встановлено, що генетично визначені гомологічні ряди ЕМ-структур і наявність, або відсутність кінцевих ефектів визначається принципом симетризації-дисиметризації Кюрі-Шубнікова, якому підпорядковані структури в межах довільного малого періоду генетичної класифікації. Принцип дисиметризації-симетризації є проявом фундаментального принципу збереження симетрії, якому підпорядковуються всі фізичні закони і явища.

Приклади різноманітних систем де використовується групова симетризація електричних струмів наведена в роботі [49] та представлена в таблиці 4.1.

В якості представників обраного класу визначені наступні представники Е-систем різного функціонального призначення:

D_1 – багатоіндукторний асинхронний тяговий лінійний електропривід швидкісних систем електротранспорту (електромеханічна система динамічного типу) [13];

D_2 – багатодвигунний лінійний електропривід рольганів (динамічна електромеханічна система [51];

S_1 – трифазний секціонований шинопровід (статична електромеханічна система) [52];

S_2 – високовольтна трьохпровідна кабельна лінія з транспозицією секціонованих екранів (система статичного типу) [53];

S_3 – трифазний броньований трьохжильний кабель (статична система) [54];

S_4 – трифазний силовий трансформатор з просторовим магнітопроводом (статичний перетворювач електричної енергії) [55].

Таблиця 4.1 – Генетичний аналіз трифазних електротехнічних систем з ефектом групової симетризації фазних струмів

Тип Е-системи	Умови симетризації	Генетичний код	Генетичні оператори перетворень	Структура елементарної групи
D_1	$N_i=m=3$ $I_{A11}=I_{A22}=I_{A33}$ $I_{B12}=I_{B23}=I_{B32}$ $I_{C13}=I_{C21}=I_{C32}$	PL 2.2x	1. Мутація ($L_2 \gg L_1$) 2. Реплікація ($k_r=3$) 3. Кросинговер	$x_A=x_B=x_C$ $I_A=I_B=I_C^*$
D_2	$N_i=m=3$ $I_{A11}=I_{A22}=I_{A33}$ $I_{B12}=I_{B23}=I_{B32}$ $I_{C13}=I_{C21}=I_{C32}$	PL 2.2x	1. Мутація ($L_2 \geq L_1$) 2. Реплікація ($k_r=3$) 3. Кросинговер	$x_A=x_B=x_C$ $I_A=I_B=I_C^{**}$
S_1	$N_{III}=m=3$ $I_{A11}=I_{A22}=I_{A33}$ $I_{B12}=I_{B23}=I_{B32}$ $I_{C13}=I_{C21}=I_{C32}$	PL 2.2x	1. Реплікація ($k_r=3$) 2. Кросинговер	$x_A=x_B=x_C$ $I_A=I_B=I_C$
S_2	$N_e=m=3$ $I_{E11}=I_{E22}=I_{E33}$ $I_{E12}=I_{E23}=I_{E32}$ $I_{E13}=I_{E21}=I_{E32}$	(CL 2.2x x PL 2.2x ₁)	1. Реплікація ($k_r=3$) 2. Кросинговер	$I_{EI}+I_{EII}+I_{EIII}=0$
S_3	$N_{\text{ж}}=m=3$ $\varphi_A=\varphi_B=\varphi_C=120^\circ$	CL ³ 2.2x	1. Реплікація ($k_r=3$)	$x_A=x_B=x_C$ $I_A=I_B=I_C$
S_4	$N_C=m=3$ $\varphi_A=\varphi_B=\varphi_C=120^\circ$	CL 2.0x	1. Реплікація ($k_r=3$)	$x_A=x_B=x_C$ $I_A=I_B=I_C$

* з врахуванням поздовжніх кінцевих електромагнітних ефектів;

** з врахуванням перехідних електромеханічних процесів зумовлених змінним перекриттям активної зони

Генетична природа принципу дисиметризації-симетризації підтверджується структурою універсального генетичного коду ЕМ-об'єктів. Цифровий показник двійкового індексу генетичного коду джерела поля визначає топологічні властивості (наявність чи відсутність країв поверхні) і одночасно характеризує вид електромагнітної симетрії джерел поля за поздовжнім (перша цифра) та поперечним (друга цифра) напрямками. Тобто на генетичному рівні природа первинних кінцевих ефектів, яка визначається топологією і групою електромагнітної симетрії джерела поля, обов'язково присутня в структурі генетичного коду.

Таблиця 4.2 – Структура класифікаційних рядів та їх зв'язок з дисиметризуючими факторами ПДП

Код групи	Код підгрупи	Вид кінцевих електромагнітних ефектів	
		Поздовжній КЕ	Поперечний КЕ
0.0	0.0y	-	-
	0.0x	-	-
0.2-2.0	0.2y	-	+
	2.0x	+	-
2.2	2.2y	+	+
	2.2x	+	+

Отже, кінцеві електромагнітні ефекти є генетичною властивістю ПДП, яка підкоряється принципу дисиметризації-симетризації і є наслідком порушення електромагнітної симетрії джерела поля. Існує детермінований взаємозв'язок між видом електромагнітних КЕ і положенням ПДП в періодичній структурі ГК (табл. 4.2). Для довільного Виду ЕМ-об'єктів справедлива послідовність: «топологічні ознаки ПДП» ↔ «вид електромагнітної симетрії» ↔ «вид кінцевих електромагнітних ефектів» [42].

В таблиці 4.2 символом "-" позначено відсутність, а символом "+" – наявність кінцевого ефекту за відповідним напрямком.

Переважає більшість ПДП, які генетично адаптовані до модульного виконання, належать до групи електромагнітно несиметричних і мають у

своєму генетичному коді складову 2.2 [56]. Як видно з аналізу табл. 4.2, всі індукторні модулі, які будуть синтезовані на електромагнітних хромосомах групи 2.2, належать до групи електромагнітно несиметричних, електромеханічні процеси в яких будуть супроводжуватися як поздовжніми, так і поперечними КЕ.

Сукупність вимог, яким має задовольняти структура довільної Е-системи для досягнення ефекту групової симетризації, незалежно від її структурного типу і функціональної приналежності [49].

1. Генетичні структури таких систем мають бути елементами груп 2.0 або 2.2 періодичної структури генетичної класифікації первинних джерел електромагнітного поля.

2. Несиметричні фазні елементи мають бути геометрично, структурно і параметрично еквівалентними

3. Кількість елементів в структурі елементарної групи має відповідати кількості фаз ($NE=km$); В межах Е-системи їх кількість має бути кратною кількості фаз $k=1,2,3\dots$

4. Орієнтація векторних величин фазних елементів (біжучих полів, струмів) має співпадати з напрямком передачі (перетворення) потоку енергії.

5. Для секціонованих Е-систем статичного і динамічного типу (багатоіндукторної ЕМ-системи, шинопроводи, лінії передач, екрани, тощо), фазні елементи мають мати послідовне електричне з'єднання з послідовною транспозицію елементів однойменних фаз в межах кожної елементарної групи.

6. В не секціонованих статичних системах (трифазні силові кабелі, трифазні трансформатори з просторовими магнітопроводами), для досягнення ефекту симетризації фазних струмів необхідно забезпечити відповідне просторове розташування фазних елементів, яке задовольняє вимогам поворотної симетрії з порядком осі симетрії $n=m$.

4.3 Фізична природа поздовжнього кінцевого ефекту

На безпосередній зв'язок просторової форми індуктора ЕМ з поздовжнім кінцевим ефектом вперше звернув увагу професор Г.І. Штурман [42]. У своїй роботі він охарактеризував кінцевий ефект «органічним пороком», набутим асинхронною машиною в результаті «розгортання» її статора в площину.

При кінцевій довжині сердечників індуктора на його кінцях виникають спотворення нормальної структури біжучого магнітного поля, які досягають також центральної частини зазору між сердечниками [50]. В.А. Вольдек також зазначає, що цей ефект в однаковій мірі характерний як для лінійних індукційних МГД-машин, так і для лінійних і дугових електричних двигунів.

Фізичну суть первинного поздовжнього кінцевого ефекту розглянемо на прикладі лінійного асинхронного двигуна (ЛАД).

Розглядаючи обмотку індуктора (рис. 4.1) бачимо, що в результаті виникнення поздовжнього кінцевого ефекту виникають магнітні потоки, які будуть мати пульсуючий характер у часі, залишаючись нерухомими в просторі. Ці потоки будуть вносити нерівномірність у розподіл магнітного поля по довжині індуктора. Така нерівномірність буде мати місце і в повітряному проміжку, і в ярмі чи магнітопроводі індуктора.

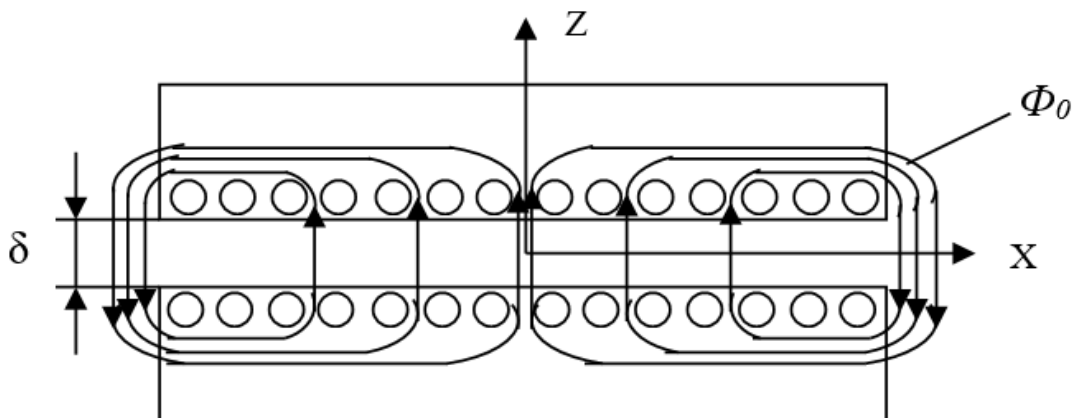


Рис. 4.1 Картина силових ліній магнітного потоку обмотки індуктора

За допомогою одновимірної моделі [57] проаналізовано магнітне поле в повітряному проміжку ЛАД. Отримано вираз для розподілу магнітної індукції:

$$b = B_s \exp[j(\omega t - (\pi / \tau)x)] + B_1 \exp(-x / \alpha_1) \exp j(\omega t - \pi / \tau_e)x) + B_2 \exp(x / \alpha_2) \exp j(\omega t + (\pi / \tau_e)x) \quad (4.2)$$

де перший член – основна рушійна хвиля; другий член – згасаюча хвиля, що рухається в додатному напрямі вісі x ; третій член – згасаюча хвиля, що рухається в протилежному напрямі хвилі. Хвиля індукції B_1 зумовлена розривом осердя зі сторони входу, а B_2 – зі сторони виходу. Тому обидві хвилі можна розглядати як хвилі кінцевого ефекту.

Після цього слід розрахувати ЕРС трифазної системи. Оскільки кожна фаза трифазної обмотки має різне положення на осерді індуктора по відношенню до кінців повітряного проміжку, то і потокозчеплення будуть різнитися по амплітуді і фазі. Відповідно кожна з фаз матиме зовсім відмінну від інших ЕРС, що викликає появу несиметричної трифазної системи ЕРС.

На рис.4.2 в якості прикладу зображена несиметрична трифазна система ЕРС під час впливу кінцевого ефекту.

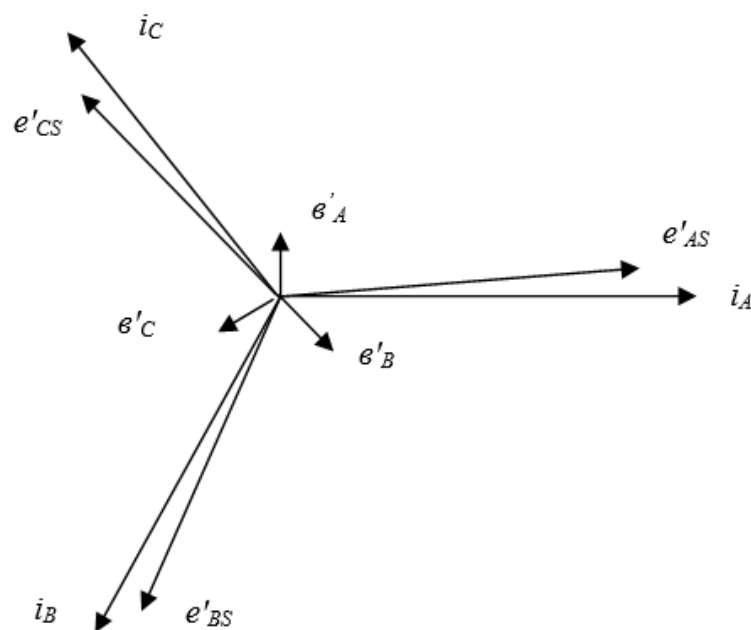


Рис.4.2 Векторна діаграма ЛАД [57]

Припустимо, що ЛАД з чотирма полюсами із ковзанням 0.05 має симетричну систему трифазного струму i_A, i_B, i_C . При відсутності кінцевого ефекту в обмотці індуктора хвилею індукції B_s індукуються ЕРС, які являють симетричну трифазну систему ЕРС $e'_{AS}, e'_{BS}, e'_{CS}$. З урахуванням кінцевого ефекту трифазна система ЕРС e'_A, e'_B і e'_C індукується трьома хвилями індукції B_s, B_1 і B_2 . В порівнянні з $e'_{AS}, e'_{BS}, e'_{CS}$ значення e'_A, e'_B і e'_C значно менші та мають амплітудну і фазову асиметрію. Це свідчить про значний вплив кінцевого ефекту на характеристики двигуна. А сукупність всіх явищ складає фізичну природу первинного поздовжнього кінцевого ефекту.

4.4 Метод групового симетрування електромеханічних модулів

Несиметрична трифазна система ЕРС викликає появу несиметричних трифазних струмів та погіршення характеристик двигуна. Несиметрію ЕРС і струмів в ЛАД усувається наступним чином [57]. Модулі ЛАД з одним спільним вторинним елементом об'єднуються, при цьому фазні обмотки елементарних індукторів з'єднуються послідовно відповідно (рис. 4.3 а), з використанням перехресту (транспозиції) фазних обмоток [48].

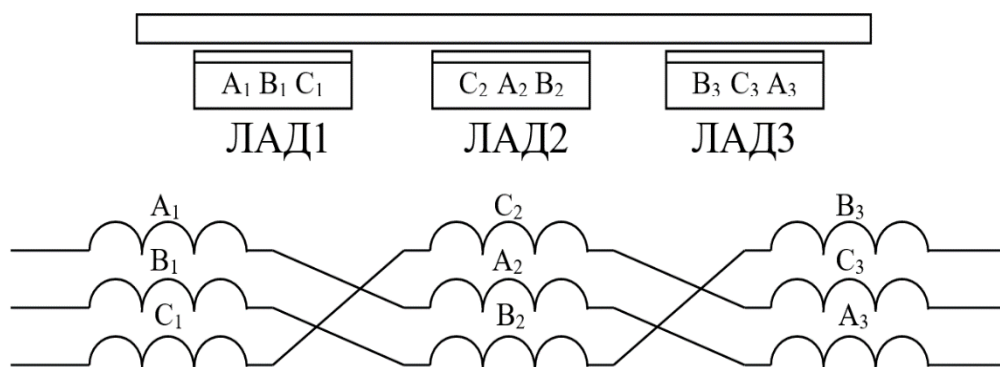


Рис. 4.3 Схема з'єднання трьох ЛАД

Процедури перехресту на рівні електромагнітних хромосом реалізуються через механізм кросинговеру. Кросинговер – загальносистемний генетичний принцип, який відтворює механізм обміну (перехресту) генетичної інформації. Вперше механізми хромосомного

перехресту використала природа. Відкриттям генетичної класифікації і розробкою генетичних принципів синтезу науково доведено, що кросинговер, як і інші генетичні оператори (схрещування, реплікації, інверсії і мутації) входить до фундаментальної групи принципів генетичного структуроутворення ЕМ-структур.

Групова симетризація, за умови збереження родової геометрії хромосоми, узгоджується з універсальним правилом дисиметризації-симетризації Кюрі – Шубнікова. В періодичній структурі ГК зазначене правило є формою прояву принципу збереження симетрії, який визначає ієрархію груп і підгруп первинних джерел електромагнітного поля, а також їх родову симетрію і топологію в межах довільного малого періоду (Роду) [42]. За результатами реплікації і кросинговеру, батьківська електромагнітно несиметрична хромосома ПЛ 2.2у модифікується через ізомерну просторову композицію (лінійний OX – ізомер), у вигляді симетризованої активної поверхні, утвореної послідовністю елементарних модулів.

У даній магістерській дисертації розглядається конструкція ЛІД, що є модульною. При цьому модулі при з'єднанні між собою мають забезпечувати найменші відстані, для зменшення масогабаритних показників. Відстань між модулями пропонується брати в один зубцевий крок. При такій конструкції з'єднання модулів за запропонованою на рис. 4.3 схемою є недоцільним, оскільки зубці вторинного елемента в один і той самий момент часу будуть знаходитись під різними фазами, що буде погіршувати показники двигуна.

Для симетризації ЕРС та струмів в запропонованому ЛІД модулі пропонується з'єднати за наступною схемою (рис. 4.4). При цьому обмотка кожної фази буде знаходитись однаково кількість разів на кожному з країв модуля.

Три обмотки, що належать до однієї фази, з'єднуються послідовно при різному просторовому положенні їх в осердях та незмінному порядку чергуванні фаз в кожному з трьох елементарних двигунів. ЕРС трифазної системи e_A , e_B і e_C мають по три складові:

$$e_A = e'_A + e'_B \exp(j2\pi/3) + e'_C \exp(j4\pi/3) = \sqrt{2}E_1 \quad (4.3)$$

$$e_B = e'_B + e'_C \exp(j2\pi/3) + e'_A \exp(-j4\pi/3) = \sqrt{2}E_1 \exp(-j2\pi/3) \quad (4.4)$$

$$e_C = e'_C + e'_A \exp(j2\pi/3) + e'_B \exp(j4\pi/3) = \sqrt{2}E_1 \exp(-j4\pi/3) \quad (4.5)$$

Як видно, з формул (4.3-4.5) дисиметризуючі фактори кожної ЕРС скомпенсовані.

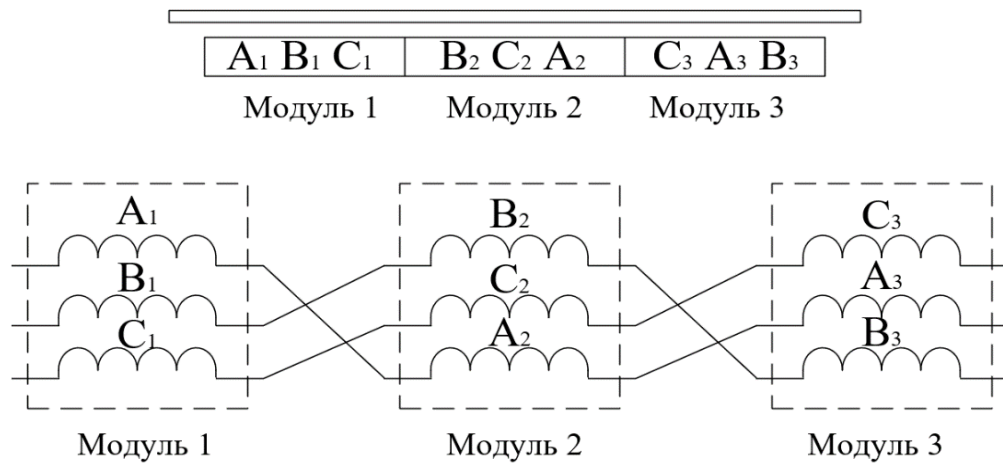


Рис. 4.4 Пропонована схема з'єднань фаз обмоток елементарних модулів ЛІД

Відповідно до схеми на рисунку 4.4 змінюється і вираз формули 4.1:

$$I_A = I_{A11} = I_{A23} = I_{A32}$$

$$I_B = I_{B12} = I_{B21} = I_{B33} \quad (4.6)$$

$$I_C = I_{C13} = I_{C22} = I_{C31}$$

Послідовне з'єднання модулів є доцільним для використання на транспортних засобах, коли є необхідність збільшення потужності. При цьому встановлюються в ряд декілька осердь індуктора. Кількість модулів системи має бути рівна:

$$N = k \cdot m \quad (4.6)$$

де m – кількість фаз; k – кількість секцій.

За умови такого електричного з'єднання фаз обмоток, відповідно з принципом симетризації Шубнікова, три електромагнітно несиметричні елементарні модулі ЛІД, функціонують як один симетричний більшої потужності. При живленні від симетричної трифазної системи напруг в фазних обмотках модульного ЛІД протікає симетричний трифазний струм.

4.5 Комп'ютерне моделювання симетризованого з'єднання модулів

Для оцінки ефективності використання способу групового симетрування в програмному забезпеченні ANSYS AIM Student на основі моделі (пункт 3.3) було створено дві моделі секцій з трьох модулів. В одній порядок підключення фаз не змінювався у модулях, а в другій виконано за схемою рис. 4.4.

На графіках залежності сил, що діють на ВЕ, від часу для несиметризованого (рис. 4.5) та симетризованого (рис. 4.6) варіанту з'єднання модулів видно, що середня сила магнітного підвісу майже не змінилася, а середня сила тяги зросла з 2019 Н до 2441 Н.

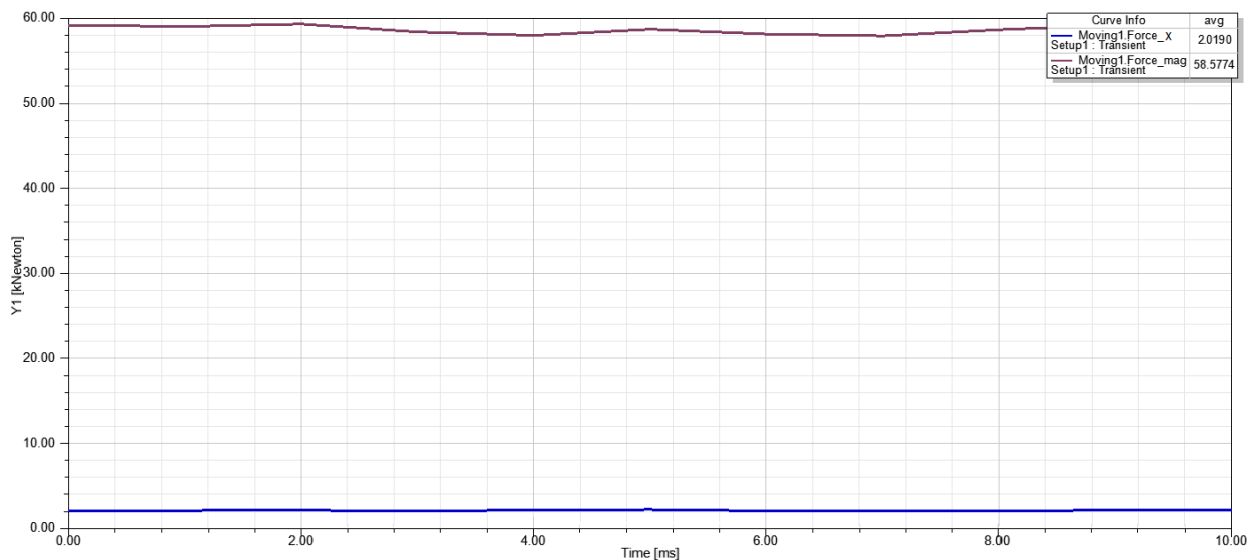


Рис. 4.5 Графік сил, що діють на несиметризовану секцію з 3-х модулів

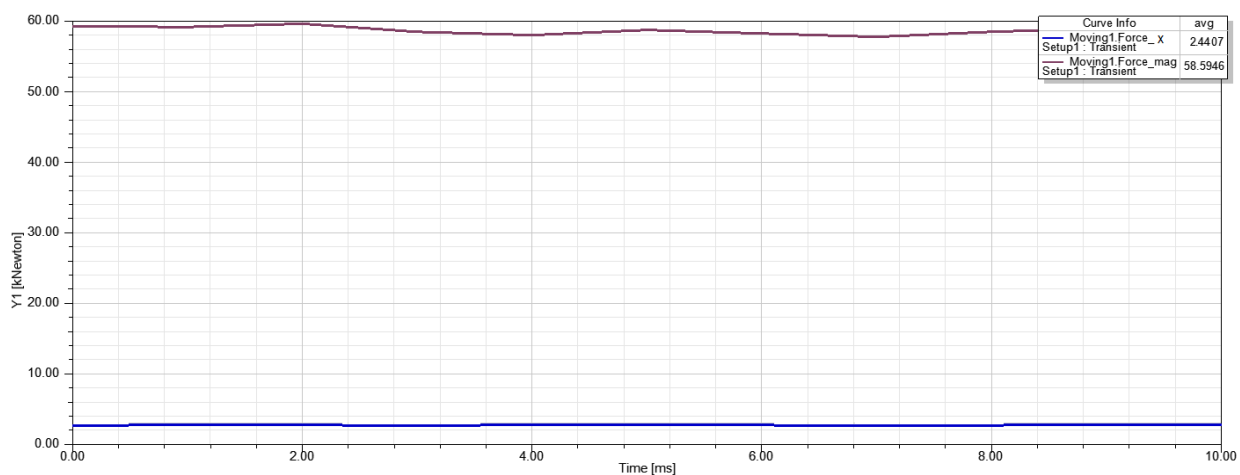


Рис. 4.6 Графік сил, що діють на симетризовану секцію з 3-х модулів

Для оцінки результатів застосування методу групової симетризації введемо коефіцієнт k_C , який для даного випадку буде рівним:

$$k_C = \frac{F_{Tc}}{F_{Tnc}} = \frac{2441}{2019} = 1.21 \quad (4.7)$$

Проведений аналіз показує, що отримане значення коефіцієнту $k_C > 1$, тобто тягова сила, що створюється ЛД зі з'єднанням обмоток за схемою рис. 4.4 є більшою.

Висновки до розділу 4

Елементарний модуль довільного лінійного двигуна, що має генетичний код 2.2, за своєю генетичною інформацією природою наділений спадковими «вадами» у вигляді поздовжнього та поперечного кінцевого ефекту. Інтенсивність прояву поздовжнього кінцевого ефекту зростає зі зменшенням активної довжини модуля і збільшенням швидкості руху.

Для усунення наслідків викликаних поздовжнім кінцевим ефектом запропоновано використання способу групової симетризації фазних струмів шляхом перехресного електричного з'єднання фаз елементарних модулів у секції, за умови що кількість елементарних модулів буде кратною кількості фаз.

За результатами моделювання в програмному середовищі ANSYS AIM Student проведено порівняльний аналіз симетризованого та несиметризованого варіанту секції і встановлено, що у спроектованого варіанту ЛІД сила тяги збільшується на 21%, при інших рівних умовах.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Даний розділ розроблено на основі методичних рекомендацій [58].

5.1 Опис проекту

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувачів
Тяговий модульний індукторний лінійний електродвигун	Високошвидкісний транспорт на магнітному підвісі	Використання різної кількості уніфікованих модулів для охоплення широкого діапазону потужностей. Зміна кількості підключених модулів в залежності від умов експлуатації.
	Міський транспорт (монорельс)	
	Виробничі, складські транспортні системи	

В таблиці 5.1 розглянуто можливі напрямки використання даної ідеї. Оскільки в даній дисертації досліджено тягово-підйомний модуль для високошвидкісного транспорту на магнітному підвісі, то в подальших розрахунках буде розглянуто лише цей напрям.

Тягові індукторні модулі відсутні на ринку і виготовляються лише на індивідуальне замовлення. В якості конкурентів буде розглянуто:

- асинхронний лінійний електропривід індивідуального виконання – конкурент 1;
- колісна система транспортування з електроприводом – конкурент 2;
- лінійний електропривід на постійних магнітах.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Наявність додаткової передачі	-	+	-	-			+
2	Модульне виконання	+	-	-	-			+
3	Універсальність	+	-	+	-			+
4	Простота вторинного елемента	+	+	-	-			+
5	Широке використання	-	-	+	-	+		
6	Зміна споживаної потужності в залежності від умов експлуатації	+	-	+	-			+
7	Опробуваність технології	-	-	+	-	+		
8	Залежність від вартості матеріалів	+	+	+	+		+	

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування конкурентоспроможності.

5.2 Технічний аудит ідеї проекту

Аналізуємо технічну здійсненність проекту.

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Виготовлення магнітопроводу	Штамповка	Наявна	Доступна
2	Виготовлення котушки збудження	Багатовиткова намотка	Наявна	Доступна
3	Виготовлення котушок якоря	Укладка прямокутних котушок	Наявна	Доступна
4	Виготовлення сталевих вторинних елементів	Прокат+механічна обробка	Наявна	Доступна
5	Можливість роздільного керування модулями	Використання інвертора у системі керування	Наявна	Доступна
6	Можливість групового керування модулями	Використання інвертора у системі керування	Наявна	Доступна

Аналізуючи дані наведені у таблиці 5.3 можна зробити висновок, що проект є повністю технологічно здійсненним оскільки використовує лише наявні та широко розповсюджені технології.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначаємо потенційні групи клієнтів.

Таблиця 5.4 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп	Вимоги споживача до товару
1.	Можливість підбору потужності без виконання нової розробки	Проектувальники транспортних систем	Підбор виконується на стадії проектування систем.	Простота конструкції, надійність, підбор уніфікованого товару під свої потреби
2.	Можливість	Проектувальники	Дискретність	Надійність,

	зміни потужності при експлуатації	транспортних систем	системи, яка створює можливість роздільного керування	можливість розділення керування
3.	Простота вторинного елементу	Проектувальники транспортних систем	Стандарти безпеки при експлуатації	Зменшення витрат на заходи убезпечення людей шляхом використання конструкції, що є безпечною

Проаналізувавши таблицю 5.4 робимо висновок, що основними споживачами технології будуть проектувальники транспортних систем.

Складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.5 та 5.6). Фактори в таблиці наведені в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.5 Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Собівартість	Подорожчання матеріалів та робочої сили	Пошук альтернативних джерел поставок. Перерозміщення виробництва
2	Конкуренція	Поява прямого конкурента	Популяризація власного бренду
3	Промисловий шпionаж	Неправомірне запозичення ідеї	Впровадження системи безпеки, судовий процес

Таблиця 5.6 Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підтримка	Забезпечення технічної підтримки	Створення служби відстежування використання товару та організація роботи зі споживачами
2	Обслуговування	Пропозиції щодо обслуговування і модернізації	Створення відділу обслуговування обладнання протягом його періоду експлуатації та пропозиції по модернізації після його завершення
3	Попит	Збільшення попиту	Розширення виробництва

Проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера.

Таблиця 5.7 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портера

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Відсутні	Розробники	Ціна витратних матеріалів	Розмір закупівель, система інформації	Вже опробовані, більш складні технологічно
Висновки	Умови сприятливі	Вихід на ринок можливий. Потенційним конкурентам необхідний час	Залежність від світового рівня цін. Вибір постачальників широкий	Клієнти диктують умови. Від кіл-сті замовлень залежить соб-тість	Замінники вже мають відповідну сертифікацію і опробовані. Але технологічно є більш складними

За результатами аналізу наведеного в таблиці 5.7 проект є конкурентним на ринку.

Таблиця 5.8 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Модульність	Можливість нарощування потужності набираючи необхідну кількість однотипних модулів. Відсутня необхідність
2	Збільшення потреб у транспортуванні	Загальна тенденція до збільшення кількості переміщуваного товару та людей
3	Збільшення швидкості руху	Потреба у збільшенні швидкості переміщення. Світова глобалізація.
4	Економія ресурсів	Менші витрати матеріалів за рахунок відсутності проміжних елементів у системі (редуктора, ременів і т.п.)

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.8) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Тягового модульного індукторного лінійного електродвигуна»

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Модульність	20	+						
2	Збільшення потреб у транспортуванні	15				+			
3	Збільшення швидкості руху	14			+				
4	Економія ресурсів	16			+				

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.10) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Таблиця 5.10 SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Модульність	Слабкі сторони: Відсутність сертифікації
--------------------------------	---

Економія ресурсів	Рішення не апробоване Непоінформованість споживачів
Можливості: Створення системи підтримки споживачів Обслуговування та модернізація в ході експлуатації Збільшення попиту	Загрози: Подорожчання матеріалів Поява прямого конкурента Промисловий шпіонаж

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Залучення прямого інвестора	Висока	До 1 року
2	Кікстартер [59]	Нижче середнього	2-4 роки
3	Конкурси/гранти	Середня	1-2
4	Продаж прав на виготовлення сторонній організації	Вище середнього	До 1 року
5	Поступовий ріст за рахунок власних ресурсів	Середня	5-10 років

За результатами аналізу для впровадження стартап проекту обираємо залучення прямого інвестора.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.12).

Таблиця 5.12 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Великі виробники	Середня	Нижче середнього	Середня	Складна
2	Компанії-розробники транспортних систем на замовлення	Висока	Вище середнього	Висока	Середня
3	Дрібні підприємства/приватні замовники	Висока	Середній	Висока	Середня
Обрано цільові групи: Компанії розробники транспортних систем на замовлення, дрібні підприємства/приватні замовники					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів обираємо цільові групи. Компанія працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу – використовується стратегія диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку формуємо базову стратегію розвитку (табл. 5.13).

Таблиця 5.13 Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Базова стратегія розвитку
1	Залучення прямого інвестора	Товарна спеціалізація	Диференціалізації
2	Поступовий ріст за рахунок власних ресурсів	Сегментна спеціалізація	Диференціалізації

Стратегія диференціації передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або

суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару (у ширшому розумінні – комплексі маркетингу), бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.14).

Таблиця 5.14 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, аби забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Так	І те, і інше	Ні	Заняття конкурентної ніші

При прийнятті стратегії зайняття конкурентної ніші (інші назви – стратегія фахівця або нішера) компанія в якості цільового ринку вибирає один або декілька ринкових сегментів. Головна особливість – малий розмір сегментів/сегменту. Ця конкурентна стратегія являється похідною від такої базової стратегії компанії, як концентрація.

Головне завдання для компаній, що вибирають стратегію нішера або фахівця, – це постійна турбота про підтримку і розвиток своєї конкурентної переваги, формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.

Таблиця 5.15 Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
-------------------------------------	---------------------------	--	---

Надійність, можливість індивідуального підбору	Диференціалізації	Модульність, мінімальна кількість вузлів	Модульність, індивідуальність , цінова лояльність
---	-------------------	--	--

5.5 Розробка маркетингової стратегії стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 5.16 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.16 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Можливість підбору потужності без виконання нової розробки	Модульне виконання	Однотипні уніфіковані модулі, які можна з'єднувати між собою і таким чином отримувати необхідну потужність
2	Можливість зміни потужності при експлуатації	Модульне виконання	Можливість відключати певні модулі при зниженні необхідної потужності
3	Простота вторинного елемента	Металевий лист	Вторинний елемент виконується у вигляді сталевих деталей, яка є надзвичайно простою і не вимагає обслуговування
4	Надійність конструкції	Відсутність додаткових елементів (редуктора, ремінної передачі і т.п.)	Конструкція забезпечує пряму передачу потужності

Розробляємо трирівневу маркетингову модель товару.

Таблиця 5.17 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Модульний електричний двигун для забезпечення лінійного переміщення, що має наступні конкурентні переваги: - можливість модульного нарощування потужності; - економія ресурсів/екологічність; - надійність за рахунок дублювання системи; - можливість відключення «надлишкових» модулів		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ек
	Вартість обслуговування	Нм	Вр
	Потужність	М	Тх
	Економічність	Нм	Тх
	Матеріалоемність	Нм	Вр
	Ремонтопридатність	Нм	Тл
	Складність технології виготовлення	Нм	Тл
	Вплив на довкілля	Нм	Е
	Кількість елементів конструкції	Нм	Е
	Якість: товар виконується згідно з ДСТУ EN 60204-1:2015		
	Пакування: коробки, що легко переміщуються навантажувачами або краном		
Товар із підкріпленням	Проведення ознайомчої кампанії з потенційною аудиторією. Публікації у фахових журналах, реклама.		
	Гарантійне та післягарантійне обслуговування. Модернізація по завершенню терміну експлуатації.		
Товар захищено патентами			

* М/Нм – монотонність/немонотонність

** Вр/Тх/Тл/Е/Ек – вартісні/технічні/технологічні/ергономічні

Визначення рівня цін не проводиться, оскільки цільовою аудиторією є не кінцевий споживач, а розробник. Тому для кожного проекту ціна оговорується окремо.

Система збуту формується за рахунок індивідуального підходу до кожного клієнта. Товар не продається через торговельні мережі та посередників.

Комунікація з потенційними клієнтами проводиться через учать у спеціалізованих виставках, публікація у фахових виданнях.

Висновки до розділу 5

За результатами виконання маркетингового аналізу можливості реалізації стартап-проекту можна зробити наступні узагальнення:

- проект можливий до комерціалізації та впровадження на ринок лінійних електричних двигунів;
- на даному ринку відсутня пряма конкуренція і є можливість монопольного заняття ніші модульних лінійних електродвигунів;
- для реалізації проекту варто зосередитись на залученні прямого інвестора;
- роботу з клієнтами варто проводити напряму;
- проект є перспективним, тому варто переходити до подальших кроків імплементації.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації наведено узагальнені результати досліджень по обґрунтуванню і розробці системного підходу до проектування модульних тягових електричних машин та його реалізації на прикладі лінійного індукторного тягово - підйомного модуля для високошвидкісної транспортної системи на магнітному підвісі. Основні результати досліджень можна узагальнити наступними положеннями:

1. Визначено характерні тенденції в сучасній техніці, що безпосередньо пов'язані зі створенням модульних структур, які забезпечують широкий спектр технічних реалізацій і функціональних можливостей з використанням обмеженої кількості уніфікованих функціональних модулів і допоміжних вузлів.

2. Вперше визначено генетичні принципи структуроутворення електромеханічних структур модульного типу, основу яких становлять генетичний принцип реплікації і просторові ізомерні композиції.

3. З використанням системної моделі (генетичної класифікації первинних джерел електромагнітного поля) визначено макrogenетичну програму, на основі якої визначено домінуючий Вид лінійних індукторних електродвигунів, структури яких максимально адаптовані до модульної реалізації.

4. Вперше розроблено узагальнену генетичну модель структуроутворення модульних ЕМ-об'єктів, яка інваріантна до генетичного Виду ЕМ-системи, рівня її складності і функціональної приналежності.

5. Розроблено уточнену багаторівневу генетичну модель синтезу, з використанням якої синтезована модульна структура тягового лінійного індукторного двигуна модульного виконання.

6. За результатами електромагнітних розрахунків, в програмному середовищі ANSYS AIM Student, здійснено моделювання і аналіз

електромагнітного поля в активному об'ємі тягового модуля, що за своїми параметрами відповідає поставленому завданню.

7. Для зменшення впливу поздовжнього кінцевого ефекту запропоновано метод групової симетризації, на основі якого здійснено симетризацію фазних струмів функціональних електромеханічних модулів, що дозволило підвищити тягову силу на 21%.

8. Розроблено стартап-проект, щодо можливості реалізації запропонованої технічної пропозиції та викладено рекомендації по впровадженню результатів отриманих в даній дисертації на ринок.

9. За результатами досліджень опубліковано 7 наукових статей у фахових виданнях і подано 2 заявки на отримання патентів на винахід і корисну модель.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cell Phone Vibration Motor. Режим доступу: <https://www.vibrationmotors.com/vibration-motor-product-guide/cell-phone-vibration-motor/> Дата звернення: 09.01.2020
2. J. Riznic, 1 - Introduction to steam generators – from Heron of Alexandria to nuclear power plants: Brief history and literature survey, Editor(s): Jovica Riznic, Steam Generators for Nuclear Power Plants, Woodhead Publishing, 2017, Pages 3-33, ISBN 9780081008942, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100894-2.00001-7>.
3. Damian, D. D. et al. In vivo tissue regeneration with robotic implants. Sci. Robot. 3, eaaq0018 (2018)
4. «Прокатайся на самокаті Bolt!» Режим доступу: <https://bolt.eu/uk-ua/scooters/> Дата звернення: 09.01.2020
5. Карамян О.Ю., Чебанов К.А., Соловьева Ж.А. Электромобиль и перспективы его развития // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-4. – С. 693-696;
6. Вентильний двигун для електроприводу коліс тролейбуса. В.І. Ткачук, І.Є. Біляковський, В.І. Жук, Національний університет “Львівська політехніка”, 2014
7. Coradia iLint – the world's 1st hydrogen powered train. Режим доступу: <https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train> Дата звернення: 09.01.2020
8. John Perritano "How the Hyperloop Works" 6 September 2013. Режим доступу: <https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/hyperloop.htm> Дата звернення: 9 January 2020
9. Kevin Bonsor & Nathan Chandler "How Maglev Trains Work" 20 May 2019. Режим доступу: <https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/maglev-train.htm> Дата звернення: 9 January 2020

10. DE643316C Schwebebahn mit raederlosen Fahrzeugen, die an eisernen Fahrschienen mittels magnetischer Felder schwebend entlang gefuehrt werden 1937-04-05 Hermann Kemper DIPL ING
11. Wickens, A.H. (June 1965). The Dynamics of Railway Vehicles on Straight Track: Fundamental Considerations of Lateral Stability. 180. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers. pp. 29–44.
12. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология/ Под ред. В.А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с. – ISBN 978-5-9221-1540-7
13. Шинкаренко В.Ф. Розробки ОКБ лінійних електродвигунів і їх місце в еволюції нових видів електротранспорту. – Зб. наук. праць «Дослідження з історії техніки», вип. 3. – К.: «Політехніка», 2003. – С. 8-31.
14. Советский маглев: будущее, которое не случилось. Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/mailru/blog/410545/> Дата звернення: 10.01.2020
15. Поезда на магнитной подушке – транспорт, способный изменить мир. Режим доступа: <https://itc.ua/articles/poezda-na-magnitnoy-podushke-transport-sposobnyi-izmenit-mir/> Дата звернення: 10.01.2020
16. Jacob A., Monteiro N. A new concept of superelevation in magnetic levitation – prodynamic // Транспортные системы и технологии. - 2018. - Т. 4. - №4. - С. 77-111.
17. US2003006871A1 Inductrack magnet configuration 2003-01-09 UNIV CALIFORNIA [US]
18. В Японии начались испытания поездов-маглевов. Режим доступа: <https://itc.ua/news/v-yaponii-nachalis-ispyitaniya-poezdov-maglevov/> Дата звернення: 10.01.2020
19. "The first HSST maglev commercial train in Japan" Yasuda, Yoshihide; Fujino, Masaaki; Tanaka, Masao; Ishimoto, Syunzo (2004).

20. Progress of Urban Maglev Program in Korea B. C. Shin, W. J. Kim, D. Y. Park, J. G. Beak, H. S. Kang Center for Urban Maglev Program, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea, (2013)
21. Харгадон В. Управление инновациями. Опыт ведущих компаний. – М.: И.Д. Вильямс, 2007
22. Modular Design Playbook. Guidelines for Assessing the Benefits and Risks of Modular Design. 2010. P. 10-12.
23. Ole Fiil Nielsen. Continuous Platform Development – Synchronizing Platform and Product Development: Ph.d.-afhandling. – Lyngby: DTU Management Institut for Planlægning, Innovation og Ledelse, 2010. P. 41
24. Grenander U. Lectures in Pattern Theory. – New York, Heidenberg, Berlin: Springer-Verlag, vol I (1976) Pattern Synthesis, vol II (1978) Pattern Analysis, vol III (1981) Regular Structures.
25. Княгинин В.Н. Модульная революция: распространение модульного дизайна и эпоха модульных платформ: учеб. пособие / под ред. М. С. Липецкой, С. А. Шмелевой. – СПб., 2013. — 80 с.
26. Platforms, Markets and Innovation / Edited by Annabelle Gawer. – Cheltenham, Northampton: Edward Elgar Publishing, Inc., 2009. p. 53.
27. Car manufacturing: Latin leap // The Economist. Jul. 27th. 2000; Camuffo A. Rolling out a «world car»: globalization, outsourcing and modularity in the auto industry // Korean Journal of Political Economy. 2004. vol. 2.
28. Парфенов Е.М. Электромеханические модули точного приборостроения. – М.: Машиностроение, 1984,. – 147 с.
29. Герман-Галкин С., Бормотов А.В. Модульная вентильная машина с коммутацией магнитного потока // Силовая электроника, № 4, 2012. – С. 46-50.
30. Попов М.А. Применение теории подобия для анализа и синтеза электромеханических модулей. Тр. МЭИ, 1983, вып. 600. - С. 92-99.

31. Луценко В.Е., Баль В.Б. Выбор и расчет электромагнитных модулей многокоординатных шаговых двигателей. Тр. МЭИ, 1979, вып. 440. - С. 31-37.
32. Васенин П.К., Медведев Д.А., Осипов Ю.М. Дуговой электромехатронный модуль движения // Доклады ТУСУР, 2008, - №1 (17). - С. 58-62.
33. Прудникова Ю.И. Исследование устойчивости модульного привода ГАП. В кн.: III Всесоюзное совещание по робототехническим системам. Тезисы докладов. Ч.П. Воронеж», 1984. - С. 77 -78.
34. Патент РФ RU 2510121C2 Модульная электрическая машина від 20.03.2014
35. Патент РФ RU2394339C2 модульная универсальная электрическая машина Белашова від 10.07.2010
36. Manual for EMRAX Motors / Generators | Version 5.4 | 5th of March 2020
Режим доступу: https://emrax.com/wp-content/uploads/2020/03/manual_for_emrax_motors_version_5.4.pdf Дата звернення: 10.03.2020
37. V. Shynkarenko, A. Makki, V. Kotliarova and A. Shymanska, "Modular Principle in the Structural organization and Evolution of Electromechanical Objects," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 162-165.
38. Шинкаренко В.Ф. Структурная изомерия и ее моделирование в задачах генетического синтеза электромеханических структур / В.Ф. Шинкаренко, А.А. Августинович, В.В. Лысак, М.А. Вахновецкая // Електротехніка і електромеханіка, 2009, № 1. – С. 33 - 36.
39. Котлярова В. В., Красовський П. О., Поправка Н. В. Рівні структурної організації тягових електричних машин модульного типу / Міжнародний науково-технічний журнал «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», 2018 – с. 283-288

40. Шинкаренко В.Ф. Генетические программы структурной эволюции антропогенных систем. (Междисциплинарный аспект) // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Вип. 13, том 4. Мелітополь, 2013. – С. 11 - 20.
41. Словник із структурної і генетичної електромеханіки / В. Ф. Шинкаренко, А.А. Шиманська. – К.: НТУУ «КП», 2015. – 112 с.
42. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем / В.Ф. Шинкаренко. – К.: Наукова думка, 2002. – 288с.
43. Каазик Ю.Я. Математический словарь. – Таллин: ВАЛГУС, 1985. – 296 с.
44. Разработка линейного привода транспортных систем. Отчет ОНИР ОКБ-ЛЭД. Киев, 1988. №госрегистрации 01.86.0111.365.
45. ПСЛДТ ТУ 16.K71-129-91, ТУ У 31.3-00214534-031-2004. Каталог продукции Южкабель Режим доступа <http://www.yuzhcable.info/datasheet.php?MRR=350211> Дата звернення: 20.02.2020
46. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под. ред. И. П. Копылова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство. Юрайт, 2011.
47. Разработка электропривода транспортных систем. Промежуточный отчет ОКБ –ПЭД Киев 1987 №Гос. Регистрации 02880005348
48. Бобровнік А.І., Августинівч А.А., Пилип М.М. Синтез і інноваційний аналіз гомологічних рядів трифазних індукторів біжучого магнітного поля з штучною симетризацією фазних струмів. // Електротехніка, 2006. – С. 11-12.
49. Шинкаренко В.Ф., Августинівч А.А., Бобровнік А.І. Генетичний аналіз і системне узагальнення способів групової симетризації в трифазних системах з несиметричними елементами.// Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2007, №1. – с. 161-166
50. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272с.

51. Вейнгер М.И., Коняев А.Ю., Резин М.Г. Управление многодвигательными электроприводами рольганов с линейными асинхронными двигателями // Промышленная энергетика, 1981. – №3. – с. 29-31
52. Сотников В.В. Влияние расщепления, бифилирования и транспозиции на внешнее магнитное поле // Электротехника, 1995. – №5. – с.35-39
53. Буслова Н.В., Винославский В.Н., Денисенко Г.И. и др. Электрические сети и системы. – К.: Вища школа, 1986. – 585 с.
54. Электротехнический справочник. Т.3. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 616 с.
55. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 1. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.
56. V. Shynkarenko, A. Makki, A. Shymanska and V. Kotliarova, Genetic Synthesis of Electromechanical Objects of the Modular Type 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 166-169.
57. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. Пер. с англ. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 180с.
58. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
59. Краудфаундингова компанія «Kickstarter». Режим доступу: <https://www.kickstarter.com/> Дата звернення 10.04.2020

ДОДАТОК А. Технічне завдання

Проектований тягово підйомний модуль має задовольняти наступні технічні параметри:

Забезпечення можливості з'єднання модулів в секції;

Роздільне керування силою тяги та магнітного підвісу;

Відсутність обмоток на вторинному елементі;

Синхронний (індукторний) принцип дії;

Номінальна потужність – 18 кВА;

Номінальна швидкість – 33 м/с;

Номінальна лінійна напруга – 180 В;

Напруга обмотки збудження – 24 В;

Величина повітряного зазору – 5 мм;

ККД – 0.85

Кількість фаз – 3

Номінальна частота – 100 Гц

Номінальний $\cos\varphi$ – 0.85

ДОДАТОК Б. Список опублікованих наукових праць

1. Krasovskyi P. Review of magnetic levitation transport systems, Science and Technology of the XXI Century: Proceedings of the XX International Students R&D Conference, 28 November, 2019. – К., 2019. Part I. p. 163-164

2. Шинкаренко В.Ф., Котлярова В.В., Красовський П.О., Місан Н.А. Принципи структуроутворення просторово адаптивних електромеханічних систем зі змінною структурою і геометрією активної зони, Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2020. — № 3 (1357) 2020. — 62-70 с.

3. Красовський П.О., Місан Н. А., Шинкаренко В. Ф. Макрогенетична програма і структурна еволюція електричних машин з поворотним статором. Зб. доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – К.: ФЕА, 2019. с. 245-248

4. Красовський П.О. Нагрів феромагнітних виробів, що виступають вторинними елементами технологічних індукторних систем. Зб. доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – К.: ФЕА, 2019. с. 249-251

5. Котлярова В.В., Поправка Н.В., Красовський П.О. Макрогенетична програма класу тягових електродвигунів модульного виконання. Зб. доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – К.: ФЕА, 2018. С. 279-282

6. Котлярова В.В., Красовський П.О., Поправка Н.В. Рівні структурної організації тягових електричних машин модульного типу. Зб. доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і

студентів «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – К.: ФЕА, 2018. с. 283-288.

7. Красовський П.О., Місан Н.А. Інноваційний синтез модульної електромеханічної системи для роботизованого маніпулятора сталевих труб. Зб. тез XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси «ІРТК-2020», 19 – 20 травня, НАУ (м. Київ).

8. Заявка № а 2019 11367 від 28.11.2019 на винахід «Електромеханічна система маніпулятора сталевих труб» /Шинкаренко В.Ф., Шимчак П., Красовський П.О., Місан Н.А.

9. Заявка № и 2019 11370 від 28.11.2019 на корисну модель «Електромеханічна система маніпулятора сталевих труб» /Шинкаренко В.Ф., Шимчак П., Красовський П.О., Місан Н.А.

ДОДАТОК В. Копія диплому переможця Всеукраїнського конкурсу



