

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК 621.34-52

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
на тему:**

_____ Лінійний електропривод маневрового транспортувального візка _____

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ЕП-41мп

_____ Белік Анастасія Андріївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Теряєв Віталій Іванович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент доц. Гераскін О.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Белік Анастасії Андріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Лінійний електропривод маневрового транспортувального візка»

науковий керівник дисертації Теряєв Віталій Іванович, доц., к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 10.12.2025 р.

3. Об'єкт дослідження Лінійний електропривод

4. Вихідні дані номінальна напруга живлення: 220 В, 50 Гц, 3 фази; номінальне тягове зусилля 2000 Н, номінальна швидкість 5 м/с, ширина реактивної полоси 0,25 м, товщина реактивної полоси 2 мм, матеріал полоси – алюміній, робочий повітряний зазор між індуктором ЛАД і половою 5 мм.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Аналітичний огляд, розробка вимог до лінійного електроприводу, розрахунок параметрів лінійного

двигуна, синтез системи автоматичного керування, дослідження шляхом моделювання, проектування системи керування електропривода, розробка стартап проекту.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1. Загальний вид установки. 2. Схема електрична принципова; 3. Структурна схема; 4. Результати моделювання. 5. Схема з'єднань (підключень) обладнання. 6. Техніко-економічне порівняння характеристик промислових транспортувальних модулів.

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття на тему «Модернізація електроприводу транспортувального візка з інтеграцією в автоматизовану систему управління виробництвом», Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів ФЕА, Київ, 2025.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання 1 червня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Терміни виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд в області транспортних засобів з лінійним електроприводом	01.09.25	
2	Опис технологічного транспортувального візка, розробка вимог до лінійного електроприводу і системи автоматизації	15.09.25	
3	Визначення параметрів та розрахунок лінійного електродвигуна	15.09.25	
4	Вибір силового обладнання для лінійного електроприводу	30.09.25	
5	Розробка структурної схеми, синтез системи автоматичного керування (математична модель електроприводу, розрахунок параметрів складових електроприводу, структурно-параметричний синтез системи)	15.10.25	
6	Дослідження (шляхом моделювання) та аналіз статичних і динамічних характеристик автоматизованого електропривода	01.11.25	
7	Проектування системи керування електропривода	10.11.25	

	(схеми: силова, електричного захисту та автоматизації)		
8	Розробка схеми електричної принципової і підключень (з'єднань) автоматизованого електропривода	15.11.25	
9	Стартап-проект. Економічне обґрунтування технічних рішень	15.11.25	
10	Висновки Список використаних джерел	30.11.25	
11	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини проекту	05.12.25	

Студент

(підпис)

Анастасія БЄЛІК

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Віталій ТЕРЯЄВ

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: «Лінійний електропривод маневрового транспортувального візка»

Київ – 2025 р.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 100 сторінках та вміщує 49 рисунків, 24 таблиці, 3 плакатів А1.

В магістерській дисертації проведено аналітичний огляд в сфері лінійних електроприводів, зокрема розглянуто галузі використання та типові технічні рішення лінійних асинхронних двигунів. Виходячи з поставленої задачі модернізації для дослідження обрано транспортний маневровий візок виробництва КЗПТО, наведено його технічні параметри.

На основі технічного завдання і характеристик транспортувального візка розраховано тягове зусилля двигуна, визначені його технічні параметри. За отриманим даними обрано перетворювач частоти і силове електрообладнання. На основі використання уточненої нелінійної моделі лінійного асинхронного двигуна проведено дослідження системи електроприводу методами математичного моделювання. Виконано техніко-економічний аналіз впровадження розробленого транспортувального візка.

ЛІНІЙНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ТРАНСПОРТУВАЛЬНИЙ ВІЗОК,
АСИНХРОННИЙ, ДВИГУН, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МОДЕЛЮВАННЯ,
АВТОМАТИЗАЦІЯ

					141.4101.001.МД				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лінійний електропривод маневрового транспортувального візка Реферат	Лім.	Лист	Листів	
Розроб.	Белік А.А.							75	
Перевір.	Теряєв В.І.								
Реценз.						НТУУ «КПІ ім Ігоря Сікорського», ФЕА, гр. ЕП- 41мп			
Н. Контр.									
Затв.	Ковбаса С.М.								

ABSTRACT

The master's thesis consists of 100 pages and contains 49 figures, 24 tables, and 3 A1 posters.

The master's thesis provides an analytical review of linear electric drives, in particular, the areas of application and typical technical solutions for linear asynchronous motors. Based on the set modernisation task, a transport manoeuvring trolley manufactured by KZPT was selected for the study, and its technical parameters are given.

Based on the technical specifications and characteristics of the transport trolley, the traction force of the motor was calculated and its technical parameters were determined. Based on the data obtained, a frequency converter and power electrical equipment were selected. Based on the use of a refined nonlinear model of a linear asynchronous motor, a study of the electric drive system was carried out using mathematical modelling methods. A technical and economic analysis of the implementation of the developed transport trolley was performed.

LINEAR ELECTRIC DRIVE, TRANSPORT TROLLEY, ASYNCHRONOUS,
MOTOR, MATHEMATICAL MODEL, MODELLING, AUTOMATION

					141.4101.001.МД							
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Linear electric drive of a shunting transport vehicle Abstract			Лім.	Лист	Листів		
Розроб.	Бєлік А.А.										75	
Перевір.	Теряєв В.І.							НТУУ «КПІ ім Ігоря Сікорського», ФЕА, гр. ЕП-41мп				
Реценз.												
Н. Контр.												
Затв.	Ковбаса С.М.											

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ЛІНІЙНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	12
1.1 Принцип роботи, переваги та недоліки, різновиди лінійних електродвигунів.....	12
1.1.1 Принцип роботи лінійних двигунів	12
1.1.2 Різновиди лінійних електродвигунів	14
1.1.3 Переваги та недоліки застосування лінійного електроприводу	14
1.2 Приклади промислового та транспортного застосування лінійних електродвигунів.....	16
1.2.1 Застосування лінійних двигунів у виробництві та промисловості.....	16
1.3 Основні характеристики, особливості керування та моделювання лінійних двигунів	23
1.4 Опис автономного маневрового транспортувального візка	27
1.4.1 Конструкція	28
1.4.2 Принцип роботи	30
1.4.3 Технічні характеристики	31
1.4.4 Сфери застосування	31
1.4.5 Модернізація наявної моделі	32
1.5 Вимоги до електроприводу та автоматизації маневрового візка	33
Висновки до розділу 1	33
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ЗУСИЛЛЯ ЛАД	35
Висновки по розділу 2	36
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛАД	38
Висновки до розділу 3	52
РОЗДІЛ 4 ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	54
Висновки до розділу 4	56
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	57

	9
Висновок по розділу 5	69
РОЗДІЛ 6 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТУАЛЬНОГО ВІЗКА	70
Висновок до розділу 6	79
РОЗДІЛ 7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	80
7.1 Опис ідеї проекту	80
7.2 Технологічний аудит ідеї проекту	81
7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	82
7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	88
7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	90
Висновок по розділу 7	92
ВИСНОВКИ	94
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97

ВСТУП

Транспортувальне обладнання є невідмінною частиною виробництва, адже саме з його допомогою транспортують вантажі та продукцію від одного виробничого агрегату до іншого, всередині цехів та між цехами. Однак більшість транспортних операцій виконують за допомогою простих ручних та механізованих візків з обертальним електроприводом.

Внаслідок повномасштабного вторгнення українське виробництво та промисловість зазнало суттєвих втрат. Значна частина економіки України складає саме промисловість та імпорту. Провідні компанії були змушені «переїжджати» до більш західних регіонів, внаслідок чого зменшуються обсяги продукції, що вони виготовляють, виробництва стають меншими. Для таких компаній суттєво прискорити виробництво, максимально автоматизувавши його, зменшити кількість людської праці.

Зазвичай, електроприводи транспортувального обладнання, як наприклад транспортувальних маневрових візків в своїй конструкції складаються з обертового двигуна і редуктора. Застосування лінійного електроприводу дозволяє позбутися механічних передач, що перетворюють обертовий рух в поступальний, при цьому зменшуючи витрати на обслуговування і ремонт таких візків, а також їх вартість.

Об'єктом дослідження магістерської дисертації виступає електромеханічна система транспортувального маневрового візка. **Предметом** дослідження являється тяговий лінійний асинхронний електропривод візка.

Метою дослідження є покращення техніко-економічних показників та зменшення втручання оператора в процес транспортування внаслідок модернізації транспортувального візка шляхом застосування лінійного електроприводу, впровадження автономного живлення та розроблення програмного забезпечення для автоматизації даного візка.

Методи дослідження включають огляд джерел по лінійним електроприводам, що включає аналіз їх різновидів, сфер застосування та вимог до проектування; проектування лінійного асинхронного двигуна шляхом математичного обрахунку його параметрів з використанням авторської методики, опис нелінійної математичної моделі лінійного асинхронного двигуна, моделювання системи лінійного асинхронного електроприводу в пакеті Matlab та аналіз отриманих результатів.

Науковою новизною магістерської дисертації являється нове застосування лінійного електроприводу транспортувального модуля та методологія проектування лінійного асинхронного електродвигуна.

Практичне значення роботи полягає у створенні технічної пропозиції по покращенню продукції для провідного в Україні виробника підйнятно-транспортного обладнання.

Апробація роботи: доповідь та стаття Теряєв В.І., Белік А.А. Модернізація електроприводу транспортувального візка з інтеграцією в автоматизовану систему управління виробництвом. *Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів ФЕА*, Київ, 2025. – 6 с.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ЛІНІЙНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

1.1 Принцип роботи, переваги та недоліки, різновиди лінійних електродвигунів

1.1.1 Принцип роботи лінійних двигунів

Лінійними називаються електродвигуни, що перетворюють електричну енергію у механічну енергію поступального руху. На відміну від обертових двигунів, лінійні приводяться в рух за рахунок створення біжучого магнітного поля. Параметри лінійного двигуна змінюються в часі через зміну умов його роботи (швидкість руху, кінцеві ефекти, температура тощо), тож його характеристики керування є більш складними [1].

Як відомо, електродвигуни обертаються завдяки взаємодії двох його основних частин: статора та ротора. Статор складається з циліндричної структури з прорізами, утвореної стосом сталевих пластин. У пазах статора рівномірно розміщені багатофазні обмотки, які створюють обертове синусоїдальне магнітне поле зі швидкістю, що залежить від частоти мережі та кількості полюсів. Відносний рух між обертовим магнітним полем та провідниками ротора індукує напругу в роторі, створюючи струми, що протікають через провідники, які також генерують власне магнітне поле. Взаємодія цих двох магнітних полів створює електромагнітний момент, який тягне ротор у тому ж напрямку, що і магнітне поле [2].

Зважаючи на це, принцип роботи лінійного асинхронного двигуна (ЛАД) можна пояснити, якщо «розгорнути» циліндричну конструкцію статора і ротора (рис. 1.1) [3]. Статор асинхронного двигуна стає первинним елементом ЛАД, тобто індуктором, а ротор – вторинним елементом – наприклад, реактивною полозою. В

результаті магнітні поля взаємодіятимуть лінійно, створюючи поступальний рух, а не обертовий [2].

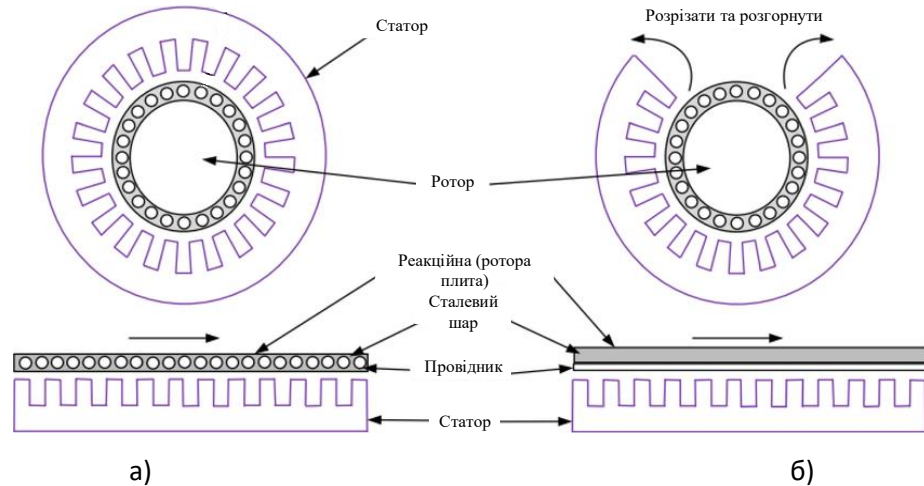


Рисунок 1.1 – Принцип побудови ЛАД шляхом розгортання асинхронного двигуна

Сталевий сердечник статора виконується шихтованим, а в його пази вкладається трифазна обмотка. Вторинний елемент може бути виконаний з короткозамкненою обмоткою (рис. 1.1, а) або виконуватись у вигляді суцільної струмопровідної пластини, закріпленої на зворотному магнітопроводі (рис. 1.1., б).

Розгорнутий в площину статор є первинним елементом, а розгорнутий ротор – вторинним елементом двигуна (рис. 1.2). Рухомими можуть бути як статор, так і ротор ЛАД [4].

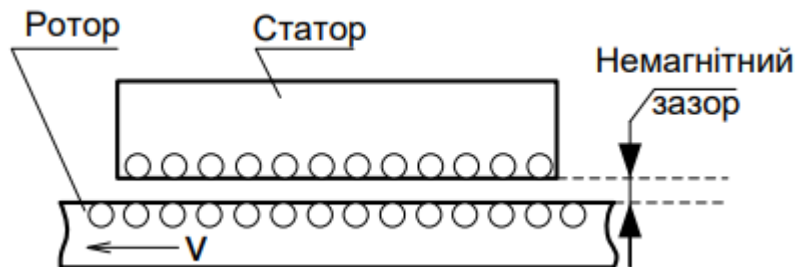


Рисунок 1.2 – Будова одноіндукторного ЛАД

1.1.2 Різновиди лінійних електродвигунів

Класифікація лінійних електродвигунів представлена на рис. 1.3 [5]. Всі наведені класи лінійних двигунів різняться своїм конструктивним виконанням, однак їхній принцип дії – це перетворення електричної енергії в механічну енергію поступального руху. Найбільш просту конструкцію мають лінійні асинхронні двигуни, що обумовило їх широке розповсюдження.

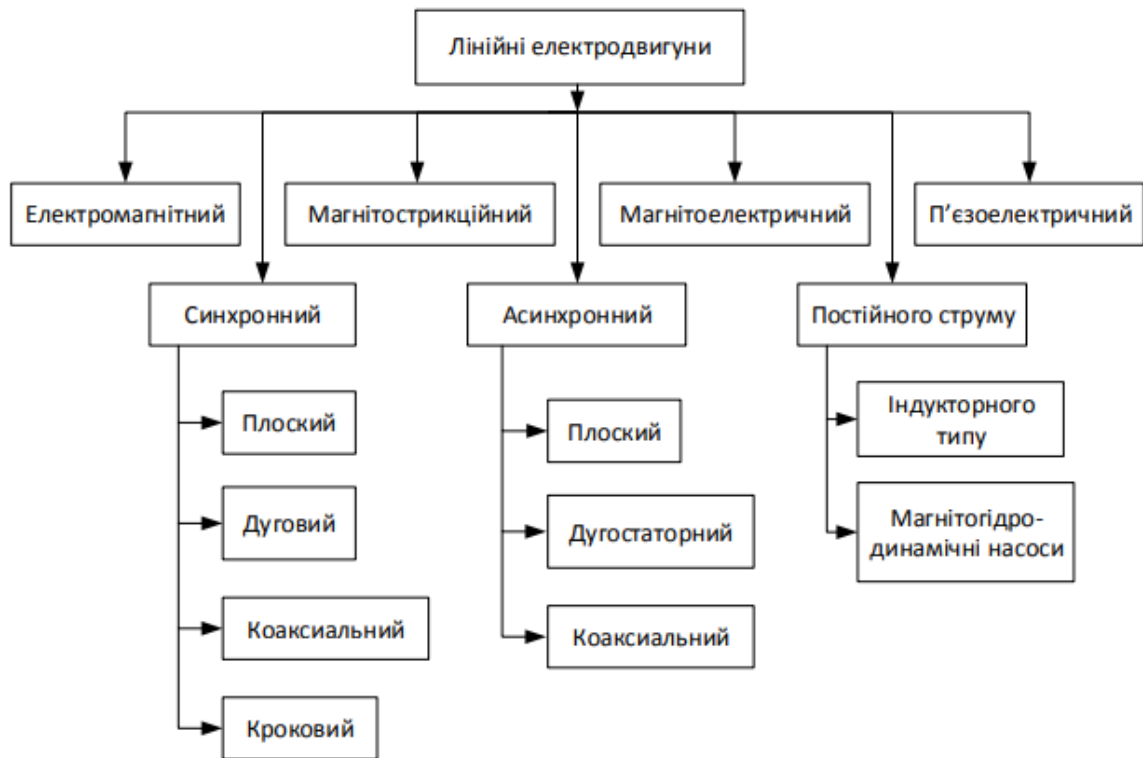


Рисунок 1.3 – Загальна класифікація лінійних двигунів

1.1.3 Переваги та недоліки застосування лінійного електроприводу

Лінійні електродвигуни мають ряд переваг в порівнянні з обертовими двигунами. Перш за все, це можливість відмовитись від використання додаткових механічних передач за рахунок створення двигуном безпосередньо поступального руху. Така конструкція спрощує сам електропривод і забезпечує пряму передачу енергії до виконавчого органу. Усувається потреба використання проміжних

елементів, що зменшує витрати спричинені механічним тертям. Крім того, відсутність контакту з рухомим елементом дає змогу реалізувати безконтактну передачу зусиль, що може бути важливим у спеціалізованих галузях, де недопустимий знос або забруднення [6].

Наступною перевагою є те, що лінійні електроприводи мають властивість покращувати експлуатаційні характеристики машин. За рахунок зменшення рухомих частин, і загалом зниження загального рівня механічного зношування, використання лінійних двигунів потенційно підвищує надійність обладнання. Спрощення конструкції дозволяє також зменшити габарити та масу всього агрегату, що позитивно впливає на мобільність та універсальність установки. Так як така конструкція потребує меншої кількості елементів, то вартість електротехнічної частини також стає меншою.

Однак, разом із перевагами лінійні електродвигуни мають і суттєві недоліки, які обмежують сферу їх ефективного застосування. Однією з головних технічних проблем є конструктивна розімкненість магнітопроводу, що зумовлює наявність кінцевих ефектів, які знижують енергетичні показники лінійного електроприводу, а також наявність значного повітряного робочого зазору, що на порядок перевищує зазор обертальних машин співставної потужності. Цей зазор складно утримувати стабільним у процесі руху, а його збільшення безпосередньо впливає на зниження ефективності двигуна. Через це показники коефіцієнта потужності та ККД лінійних двигунів виявляються нижчими у порівнянні з обертальними аналогами, в середньому в 1,5 рази [7].

До технічних проблем можна також віднести крайові ефекти, що виникають через деформацію магнітного поля на кінцях активної частини індуктора і які можуть впливати на гармонічний склад поля, стабільність і точність роботи двигуна [4].

1.2 Приклади промислового та транспортного застосування лінійних електродвигунів

Найбільш перспективними сферами застосування лінійних електродвигунів є ті, де їх використання є не просто доцільним, а часто й незамінним. Це особливо стосується систем, де лінійні електродвигуни є єдиним варіантом для досягнення бажаного руху або конструктивного рішення [4].

Іншою важливою сферою є ті випадки, коли навіть при можливості використання традиційних обертових електродвигунів застосування лінійних електродвигунів може істотно спростити конструкцію або поліпшити її експлуатаційні характеристики. Це призводить не тільки до підвищення надійності, але й до загальної оптимізації, включаючи зменшення ваги, зменшення розмірів та підвищення точності і швидкості. Хоча такі системи можуть бути дещо менш енергоефективними, це можна компенсувати підвищенням ефективності всього технічного процесу.

Крім того, приводні системи з коротким ходом, що вимагають високої швидкості, точності позиціонування та повторюваності без обмежень довжини ходу, займають важливу нішу на ринку [6]. У таких випадках, коли енергоспоживання не є особливо критичним і не є найважливішим фактором в критеріях оцінки, лінійні двигуни є ідеальним вибором. До цієї категорії належать приводні системи для таких застосувань, як прецизійні складальні лінії, медичне обладнання, пакувальна техніка, високовольтні вимикачі та автоматизовані лабораторні системи [7].

1.2.1 Застосування лінійних двигунів у виробництві та промисловості

Серед прикладів використання лінійного електроприводу на транспорті, у промисловості та комунальній сфері можна виділити наступні.

Лінійні транспортні системи. Основною сферою застосування лінійних двигунів є високошвидкісний електричний транспорт (рис. 1.4).

Для правильної роботи цього типу транспортної системи необхідно підтримувати відносно великий повітряний зазор між рухомими частинами та вторинним елементом. Такі транспортні системи використовують сучасні лінійні двигуни з високими енергетичними характеристиками, тобто $\cos\phi$, близьким до одиниці, і високим ККД, що досягає 96% [8]. Використання синхронізованих лінійних двигунів у високошвидкісних транспортних системах поїздів зазвичай поєднується з магнітною підвіскою транспортних засобів та використанням надпровідних магнітів і обмоток збудження. Це дозволяє підвищити комфортабельність руху та економічні показники роботи рухомого складу. У поїздах потужні магніти розміщені під дном транспортного засобу, за кілька сантиметрів від електропровідного полотна. Рух поїзда забезпечується лінійним двигуном. Котушки статора активуються послідовно і створюють магнітне поле. Статор поїзда притягується цим полем, рухаючи весь транспортний засіб. Швидкість поїзда регулюється зміною напруги і частоти струму [8].

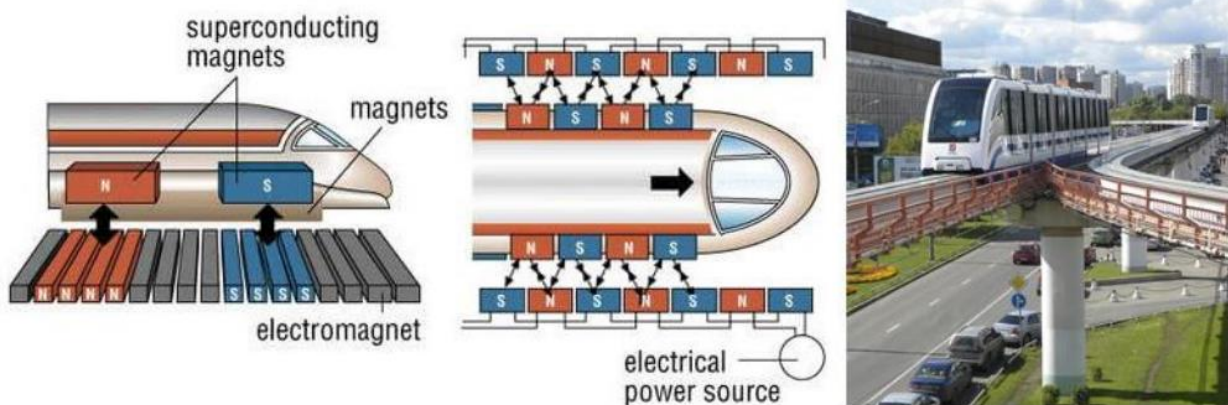


Рисунок 1.4 – Елементи лінійного синхронного двигуна вагону потягу

Транспортні системи з використанням лінійних двигунів знаходять широке застосування в розвинутих країнах Азії і мають чималий потенціал. Такі системи

(LTS) можна розділити на кілька основних груп залежно від їхніх рішень щодо опори, напрямлення та приводу. Серед найважливіших груп виділимо наступні:

1) LTS (Maglev) (рис. 1.5) [9] зазвичай працюють на основі електромагнітної підвіски. Вони поділяються на системи, що використовують регульовані електромагніти. Принцип роботи цих систем такий. Згідно з аксіомою стабільності тіл у різних статичних силових полях, сформульованою в 1842 році Ерншомом, жоден об'єкт, що знаходиться в силовому полі, яке підпорядковується закону оберненої квадратичної залежності (наприклад, магнітне поле), не може перебувати в стані стабільної рівноваги. Тому, щоб досягти стабільності, потік постійних магнітів повинен формуватися паралельними струмами керуючої котушки, які залежать від розміру повітряного зазору. Електромагніти цього типу використовуються в багатьох різних системах підвішування, як для бічної, так і для вертикальної стабілізації. Ефективне функціонування цих систем залежить від оптимізації розподілу магнітного поля в повітряному зазорі за допомогою правильного геометричного проектування та правильного вибору властивостей матеріалу та джерела живлення.



Рисунок 1.5 – Вид на китайську високошвидкісну транспортну систему на магнітній підвісці зі швидкістю 600 км/год у КНР, Циндао

Перші комерційні маглеви були запущені у Бірмінгемі та Берліні у 1984 році, а також у Шанхаї (Transrapid). Подальший розвиток отримали системи з використанням діаманетиків і надпровідників, які забезпечують підвищену стійкість. Прикладом є маглеви Міядзакі та Яманаші.

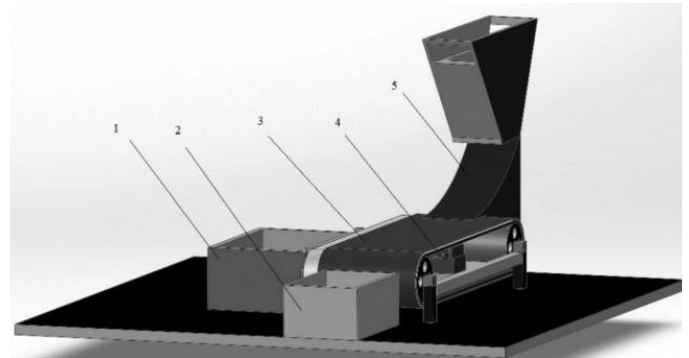
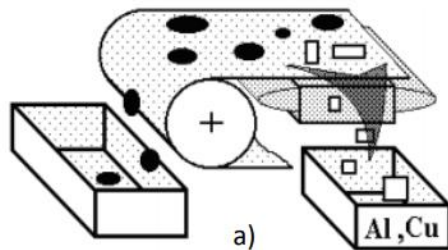
Електродинамічні підвіски мають природну стабільність завдяки реактивним силам, але їх ефективність низька на малих швидкостях, тому поїзди потребують допоміжних коліс при старті. У 2015 році поїзд SC-Maglev, що експлуатується Центральною залізничною компанією Японії (JR Central), побив світовий рекорд швидкості поїзда, розвинувши швидкість 603 км/год (374 милі/год); у січні 2021 року компанія CRRC у Ченду представила нову китайську систему Maglev, розраховану на швидкість до 620 км/год [10].

2) Нелевітовані LTS використовують традиційні колеса й залишаються найбільш поширеним рішенням. Вони можуть працювати на базі двигунів постійного струму, синхронних або асинхронних машин, у тому числі з надпровідними обмотками [10].

3) LTS з ЛАД. Лінійні асинхронні машини були розглянуті як найбільш перспективне рішення для LTS. Наприкінці 1940-х років британський інженер-електрик Ерік Лейтвейт, професор Імперського коледжу Лондона, розробив перший повнорозмірний робочий прототип лінійного індукційного двигуна. Саме LIM став основою першої у світі комерційної маглев-системи в Бірмінгемі, яка була відкрита в 1984 році, також приводилася в рух лінійним індукційним двигуном. Водночас ці системи мають низку обмежень, які потребують подальшого дослідження [10].

Металургія та видобувна промисловість. Одним із прикладів використання ЛЕД у металургійних процесах є сепаратори на основі лінійних асинхронних трифазних двигунів (рис. 1.6). Їх принцип роботи ґрунтується на створенні біжучого електромагнітного поля трифазним струмом, що живить розподілену обмотку. Важливою особливістю такої системи є відсутність рухомих механічних частин, що підвищує надійність та знижує витрати на обслуговування. Тобто основним

виконавчим вузлом виступає трифазний лінійний асинхронний двигун, який забезпечує ефективне розділення електропровідних і немагнітних матеріалів на конвеєрній лінії [11].



б)

Рисунок 1.6 – Електродинамічний сепаратор на основі лінійного двигуна: а – принцип роботи; б – загальний вид: 1 - контейнер для лому електропровідних немагнітних матеріалів; 2 - контейнер для інших відходів виробництва, що сепарується; 3 - конвеєр та конвеєрна стрічка; 4 - лінійний асинхронний трифазний двигун; 5 - лінія для подачі лому

Машини для будівництва. Лінійні двигуни знайшли широке застосування у машинах ударної дії, наприклад, палезабивних молотах (рис. 1.7), які застосовуються на дорожніх роботах і у будівництві.

Конструктивно статор двигуна встановлений на плечі молота і рухається вздовж напрямних рейок, а ударний елемент є вторинним компонентом. Для підйому ударного елемента молота двигун підключений таким чином, що магнітне поле спрямовано вгору. Коли ударний елемент наближається до верхнього положення, двигун зупиняється, і ударний елемент під дією сили тяжіння падає на опорну колону. Деякі модифіковані версії дозволяють використовувати зворотний режим роботи для збільшення енергії удару. Залежно від глибини забивання паль, статор двигуна переміщується вниз за допомогою лебідки. Електричний молот

простий у виготовленні, не вимагає високої точності у виробництві компонентів, не залежить від змін температури і може працювати майже миттєво [8].



Рисунок 1.7 – Використання лінійного двигуна для машин ударного типу

Військова техніка та авіаційне обладнання. Лінійний асинхронний електропривод виявилися досить вигідними у сфері авіаційної та військової техніки. Потенційні застосування лінійних електродвигунів та лінійних актуаторів в авіаційній техніці включають:

- електромагнітні пускові установки;
- керування фюзеляжем та крилами літака;
- управління польотом;
- управління паливом;
- авіаційне обладнання та система контролю навколишнього середовища.

Особливої уваги заслуговує електромагнітна система запуску літаків (EMALS), яка базується на використанні лінійних асинхронних або синхронних двигунів. Енергія накопичується у маховикових системах і вивільняється короткочасними імпульсами для розгону літальних апаратів з палуби авіаносців. На відміну від традиційних парових катапульти, дана технологія забезпечує вищу ефективність, надійність та зниження експлуатаційних витрат. Додатково ЛЕД можуть використовуватися як приводи авіаційних дверей (рис. 1.7),

де потрібна швидкодія, компактність та висока надійність у надзвичайних ситуаціях [12].

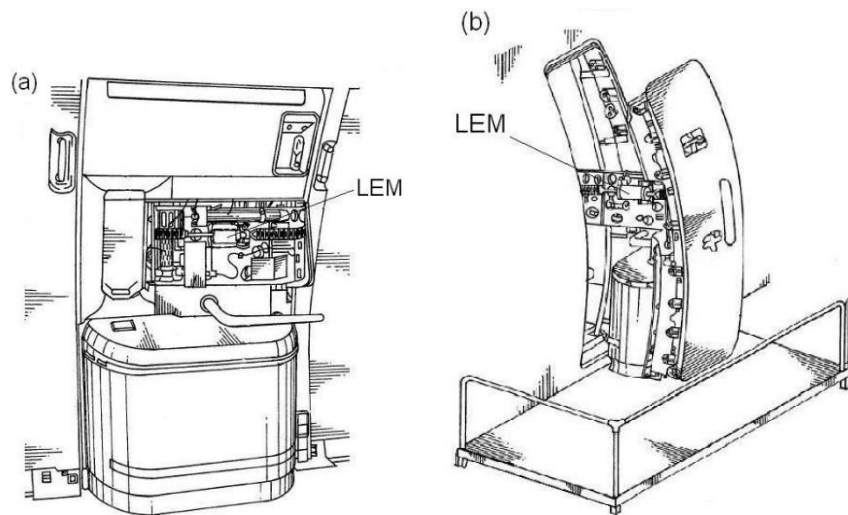


Рисунок 1.8 – Двері комерційного літака: а - вигляд зсередини; б - зовнішній вигляд

Верстатобудування. У сучасній машинобудівній промисловості лінійні електроприводи все частіше використовуються в системах подачі верстатів (рис. 1.8) [13]. Традиційні системи, в яких використовуються обертові двигуни з механічними передавальними з'єднаннями, мають ряд обмежень, включаючи складне технічне обслуговування, втрати енергії в проміжній передачі, люфт і пружність в кінематичному контурі, обмеження в діапазоні роботи і низьку продуктивність на низьких швидкостях.

Лінійний електропривод дозволяє забезпечити прямий рух робочого органу верстату, за рахунок усунення проміжних механічних ланок, чого не можна створити з використанням обертового двигуна. Це підвищує точність обробки, продуктивність та розширює можливості сучасних верстатів у рамках концепції інтелектуального виробництва.

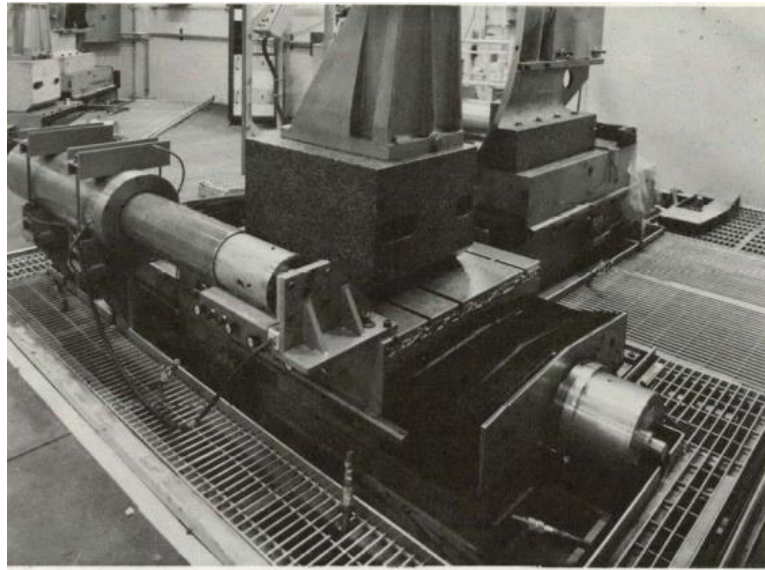


Рисунок 1.9 – Виробничий верстат, обладнаний лінійним двигуном

Таким чином, незважаючи на те, що лінійні електродвигуни мають певні обмеження, вони використовуються в багатьох галузях завдяки своїм особливим перевагам, які важко або неможливо досягти за допомогою інших типів електродвигунів. Їх використання виправдане в тих випадках, коли простота конструкції, надійність, швидкість або конкретні умови використання є важливішими за енергоефективність [14].

1.3 Основні характеристики, особливості керування та моделювання лінійних двигунів

У порівнянні з обертовими двигунами, лінійні двигуни мають такі основні характеристики [15]:

- простота конструкції. Лінійні двигуни не потребують додаткових пристроїв для перетворення обертального руху в лінійний, що спрощує конструкцію двигуна та значно зменшує його вагу та об'єм.

- точність позиціонування. У системах, що вимагають лінійного руху, лінійні двигуни можуть приводитися в рух безпосередньо, без редукторів, що виключає помилки позиціонування, викликані затримками, пружностями і динамічною

точністю проміжних з'єднань. Використання цифрових датчиків і мікрокомп'ютерів дозволяє значно підвищити точність позиціонування всієї системи.

- швидка реакція, висока чутливість і відсутність механічного тертя. Індуктор лінійного двигуна з немагнітною реактивною половою, підтриманий магнітною левітацією. Це забезпечує необхідний повітряний зазор між ротором і статором без механічного контакту, усуваючи тертя і значно покращуючи продуктивність системи.

- безпечна і надійна робота, тривалий термін служби. Лінійні двигуни можуть передавати потужність без контакту і мають мінімальні механічні втрати через тертя, що мінімізує відмови і не вимагає технічного обслуговування.

Керування лінійними двигунами здійснюється за допомогою електронної системи регулювання, яка регулює струм, напругу та магнітне поле. Датчики контролюють швидкість і положення, забезпечуючи точне керування рухом [16].

Для лінійних асинхронних двигунів, як і для їхніх обертових аналогів з короткозамкненим ротором, частотне регулювання швидкості залишається практично єдиним ефективним варіантом для забезпечення плавного керування. Однак конструктивні особливості ЛАД посилюють проблеми, що зазвичай виникають при класичному регулюванні частоти. Це пов'язано з тим, що, порівняно з традиційними двигунами, ці двигуни мають менш жорсткі механічні характеристики, що значно впливає на якість регулювання. Однією з головних причин є структурна відмінність [17]: у ЛАД немагнітний зазор значно збільшується, спостерігається інтенсивніше розсіювання магнітного потоку, ефективний опір обмоток статора становить більшу частину загального опору, а також на роботу суттєво впливають кінцеві ефекти. Тому при застосуванні класичного закону скалярного регулювання (який вимагає, щоб співвідношення між напругою і частотою залишалось стабільним) жорсткість і критичне зусилля механічних характеристик різко знижуються. Ці явища особливо виражені на низьких швидкостях, ніж у традиційних асинхронних двигунах [17].

Методи удосконалення частотного керування лінійними асинхронними двигунами можуть бути реалізовані шляхом застосування різних способів компенсації впливу параметрів індуктора та специфічних ефектів, притаманних даному типу машин. Серед найбільш поширених та ефективних підходів можна виокремити наступні [4]:

IR-компенсація. Цей метод передбачає компенсацію впливу активного опору індуктора, що забезпечує стабілізацію електрорушійної сили (ЕРС) [6]. У результаті підвищується жорсткість механічних характеристик та критичний момент ЛАД при скалярному керуванні. Простота реалізації робить IR-компенсацію одним із найбільш застосовуваних методів у практиці електроприводів. На рис. 1.9 показано сімейство механічних характеристик у рушійному режимі. Там же штриховими лініями показано характеристики, що відповідають керуванню за законом $U_1/f_1 = \text{const}$.

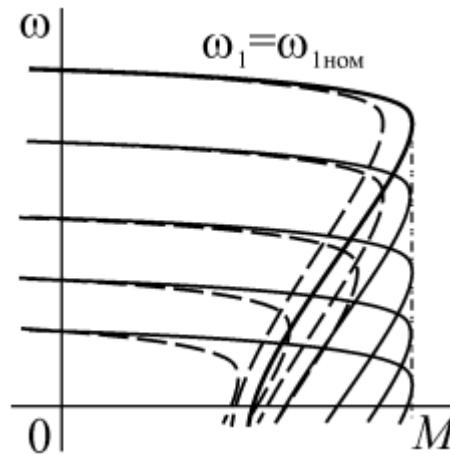


Рисунок 1.10 – Механічні характеристики ЛАД при частотному керуванні з IR-компенсацією

IZ-компенсація. Сутність даного підходу полягає у компенсації впливу повного опору індуктора шляхом збільшення вхідної напруги двигуна залежно від навантаження. Така стратегія дозволяє досягти високої перевантажувальної

здатності та низького статизму в діапазоні регулювання, який є співставним з режимом ІR-компенсації (приблизно 10:1) (рис. 1.10). Принциповою особливістю ІZ-компенсації є відсутність насичення магнітопроводу за будь-яких робочих частот і навантажень, оскільки напруга кола намагнічування підтримується сталою, на рівні напруги холостого ходу [7]. Для подальшого підвищення жорсткості характеристик та розширення діапазону регулювання використовуються зворотні зв'язки за струмом та швидкістю.

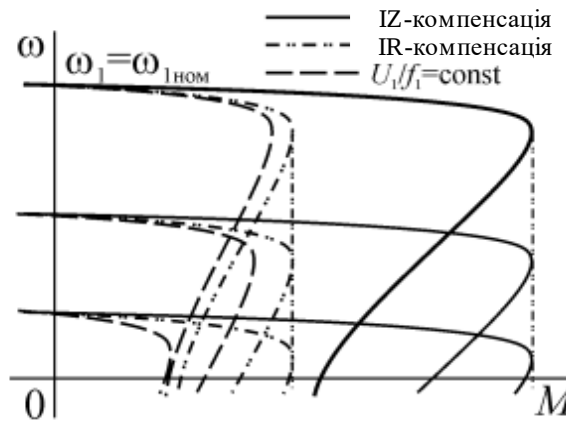


Рисунок 1.11 – Механічні характеристики АД при різних законах керування

Компенсація ковзання. Даний метод спрямований на усунення похибки робочого ковзання та одночасну компенсацію впливу кінцевих ефектів і активного опору індуктора. Реалізація методу передбачає введення у рівняння динаміки та схему заміщення ЛАД функції $f(Q)$, яка враховує дію кінцевих ефектів на основі моделі Данкана. Однак практична реалізація компенсації ковзання ускладнюється необхідністю застосування додаткових датчиків [7].

Аналіз зазначених методів показує, що безпосереднє застосування цих методів до класичних асинхронних двигунів та двигунів ЛАД не завжди є відмінним, оскільки вони не враховують конструктивні та електромагнітні особливості двигунів ЛАД. У загальних промислових системах електроприводу найбільш доцільним варіантом вважається використання скалярних модифікацій

методів IR- та IZ-компенсації. Перший метод характеризується простотою технічного застосування, а другий забезпечує можливість стабілізації магнітного потоку [17].

Серед розглянутих недоліків було згадано наявність краєвих ефектів в ЛАД. Ця особливість також має бути врахована при моделюванні. Краєві або кінцеві ефекти, виникають через розімкненість магнітопроводу індуктора. Також в ЛАД існують ефекти «входу-виходу» контурів струму вторинного елемента із пасивної зони в активну [6]. Наявність кінцевих ефектів призводить до зміни форми потоку і індукції в повітряному зазорі по всій активній довжині індуктора, в результаті чого виникають додаткові ЕРС в котушках обмотки; останнє викликає несиметричність фазних струмів, наявність гармонік МРС і небажані втрати. За загальноприйнятою методологією, запропонованою Данканом, кінцеві ефекти ЛАД можуть бути враховані спеціальною функцією, яка залежить від швидкості руху і параметрів індуктора [4].

Наявність великого робочого повітряного зазору в ЛАД викликає збільшення потоків розсіювання, а також послаблює робочий магнітний потік, що призводить до необхідності збільшення струму статора та струму намагнічування і, як результат, насичення магнітопроводу індуктора [18]. Математична модель ЛАД, призначена для уточненого дослідження його статичних і динамічних характеристик, повинна враховувати вплив насичення магнітопроводу індуктора [19].

Отже, при побудові адекватної математичної моделі ЛАД необхідно враховувати всі перелічені відмінності, нелінійність характеристики намагнічування та насичення індуктора [20].

1.4 Опис автономного маневрового транспортувального візка

Маневровий цеховий візок (рис. 1.11) – спеціалізований транспортний засіб, призначений для переміщення важких вантажів та обладнання з одного місця в інше на підприємстві. Його можна використовувати як у приміщенні, так і на відкритому

повітрі. Цей тип транспортного засобу забезпечує гнучкість та безпеку при переміщенні матеріалів [21]. В якості прототипу для модернізації вибираємо маневровий візок виробництва Київського заводу підймально – транспортного обладнання (КЗПТО) (рис. 1.11).



Рисунок 1.12 – Маневровий візок виробництва КЗПТО

1.4.1 Конструкція

Конструктивно маневровий візок складається з металевої рами, настилу, приводу пересування та електроустаткування. Рама візка є зварною конструкцією виконаною з листового металу, виготовлена зі сталі S235 або S355.

У комплектацію цехового транспортувального візка входять [21]:

- одноребордні або дворебордні колісні блоки та осьові коробки забезпечують стабільну та плавну роботу на напрямних рейках. Тип конструкції коліс визначається на основі умов використання. Одноребордні колеса використовуються в стандартних рейкових системах, тоді як дворебордні колеса підвищують бічну стійкість та зменшують ризик сходження з рейок. Для роботи на рівних поверхнях використовуються сталеві колеса з гумовим покриттям без реборд;
- мотор-редуктори приводу пересування, наприклад, виробництва PodemCrane (Болгарія) або SEW-Eurodrive (Німеччина);
- електрообладнання Schneider Electric (Франція);

- струмопідвід тролейний закритого типу або кабельний (з можливістю установки кабельного барабана);
- частотний привод пересування Schneider Electric типу Altivar, що дозволяє регулювати параметри швидкості, забезпечувати плавний пуск і зниження динамічного навантаження для приводної системи.

На рис. 1.13 зображена кінематична схема приводу коліс візка.

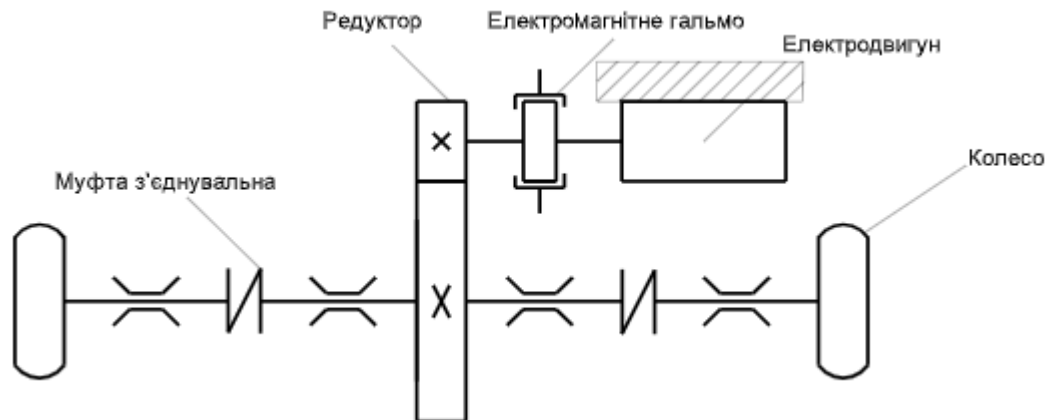


Рисунок 1.13 – Кінематична схема приводу коліс візка

У базових модифікаціях керування здійснюється за допомогою підвісного пульта, що надає оператору можливість контролювати швидкість і напрям руху. У сучасніших виконаннях впроваджується дистанційне керування, яке підвищує ергономічність процесу, оперативність та рівень безпеки під час роботи.

Для забезпечення безпечної експлуатації маневровий візок оснащений наступними елементами:

- аварійними кнопками зупину на кожному куті – для екстреної зупинки у разі небезпеки;
- двома датчиками перешкод (по одному на кожен напрямок руху) з кутом охоплення 180° . При наближенні до перешкоди в будь-якому режимі візок автоматично знижує швидкість на мінімальну та активує попереджувальний сигнал. Якщо перешкода не зникає, відбувається повна зупинка;

- LED-індикацією та звуковими сигналами, що відображають стан увімкнення живлення, активність руху та рівень заряду акумулятора.

1.4.2 Принцип роботи

Мобільний візок працює за принципом напівавтоматичного або ручного переміщення вантажів у цехах, складах і логістичних центрах. Робота візка базується на системі приводу, що забезпечує рух, і механізмах управління, що дозволяють контролювати швидкість, напрямок і стабільність руху.

У напівавтоматичному режимі управління здійснюється за допомогою пульта дистанційного керування: оператор вибирає напрямок руху, і візок автоматично слідує за маршрутом, позначеним на магнітній стрічці або рейці, для точного позиціонування. З цього режиму також можна вийти вручну: при натисканні кнопки повороту на пульті дистанційного керування візок виходить з магнітної стрічки і переходить в ручний режим керування, що дозволяє оператору керувати візком в зонах без магнітної системи позиціонування. Автоматичний режим: в автоматичному режимі управління здійснюється з пульта управління, розташованого на самому візку. Оператор вибирає одну з 6 фіксованих точок (прольотів), після чого візок автоматично рухається до вибраного місця і зупиняється.

Основним елементом, що забезпечує рух візка, є мотор-редуктор, який передає обертальний момент на колісні блоки, змушуючи візок рухатися вперед або назад.

Електрична енергія може подаватися до приводу через тролейні лінії або з автономного джерела енергії. У разі тролейних ліній енергія передається через контактні струмоznімачі, які забезпечують безперебійне живлення. Мобільні версії використовують акумуляторні батареї – літій-іонні або свинцеві –, які забезпечують тривалу автономну роботу без підключення до зовнішньої мережі.

Гальмівна система є невід'ємною частиною конструкції маневрового візка і може бути електромагнітною, механічною або гідравлічною. Електромагнітні гальма автоматично активуються, коли привід зупиняється, фіксуючи платформу в стабільному положенні і запобігаючи спонтанному руху.

Функціонування маневреного візка забезпечується комплексною взаємодією приводної системи, модулів управління, сенсорів управління та живлення. Завдяки цій інтегрованій структурі він здатний виконувати широкий спектр транспортних і технологічних завдань, підвищуючи рівень автоматизації, ефективності та безпеки виробничих процесів.

1.4.3 Технічні характеристики

Вантажопідйомність цехового маневрового візка може сягати 100 т, що дозволяє використовувати його для транспортування великогабаритних та масивних вантажів у виробничих і складських приміщеннях. Довжина шляху до 100,0 м, швидкість руху вантажного візка 10,0-40,0 м/хв.

Експлуатаційні можливості візка дозволяють його використання у широкому діапазоні кліматичних умов — при температурах від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$. Конструкція та приводна система адаптовані до роботи у різних режимах навантаження — від легкого А1–А3 (1АМ за класифікацією FEM) до надважкого А8 (4т за FEM). Такий діапазон забезпечує надійну роботу обладнання в умовах змінного виробничого циклу, включно з інтенсивними та тривалими режимами експлуатації.

1.4.4 Сфери застосування

Маневрені транспортні візки КЗПТО [22] мають широкий спектр застосування на різних промислових підприємствах, включаючи машинобудівні компанії, хімічну промисловість, гірничо-збагачувальні комплекси, переробні комбінати, металургійні цехи та ливарні, виробництво металевих конструкцій та

склади готової продукції, для транспортування важких і негабаритних вантажів. Завдяки своїй великій вантажопідйомності та стійкості до екстремальних умов експлуатації, ці візки можуть працювати в гарячих цехах, де температура повітря досягає критичних значень, у вибухонебезпечних середовищах, де необхідно дотримуватися суворих стандартів безпеки.

Використання маневрених візків дозволяє оптимізувати виробничі процеси, підвищити продуктивність і гарантувати безпеку при транспортуванні вантажів у складних умовах експлуатації.

1.4.5 Модернізація наявної моделі

Модернізація існуючої моделі маневрового візка полягає в заміні обертового тягового електроприводу на лінійний асинхронний двигун, який має простішу конструкцію і простіший алгоритм керування. Запропонована конструкція візка з використанням лінійного асинхронного електроприводу зображена на рис.1.14.

Для забезпечення автономності візка пропонується використання живлення від акумуляторної батареї. Це рішення гарантує мобільність та універсальність використання у різних виробничих умовах.

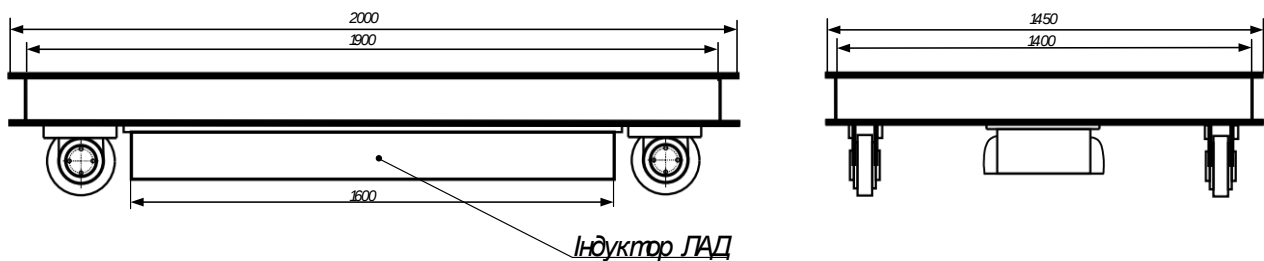


Рисунок 1.14 – Транспортний візок з лінійним двигуном

1.5 Вимоги до електроприводу та автоматизації маневрового візка

У даному проєкті розробляється маневровий транспортний візок, призначений для переміщення вантажів із максимальною вантажопідйомністю 2000 кг та максимальною швидкістю руху 5 м/с. Живлення електропривода здійснюється від акумуляторної батареї з номінальною напругою 540 В та ємністю 100 кВт·год, що забезпечує тривалу автономну роботу без необхідності частого підзаряджання.

Головна вимога до системи електроприводу – забезпечення достатньої потужності електродвигуна для запобігання перегріву під час інтенсивної роботи та гарантування стабільного руху навіть під великим навантаженням.

Система безпеки транспортного візка включає комплекс технічних пристроїв, спрямованих на запобігання аварійним ситуаціям. Особливе значення має кнопка аварійної зупинки, яка при активації негайно зупиняє всі електромеханічні системи, забезпечуючи повну зупинку руху.

Для запобігання зіткненням з перешкодами використовується система датчиків наближення, яка постійно контролює навколишній простір. Якщо на небезпечній відстані виявлено об'єкт, відбувається автоматичне гальмування, а також активуються світлові та звукові сигнали, що попереджають про можливу небезпеку.

Додаткову функцію безпеки забезпечують кінцеві вимикачі, які визначають кінцеві положення руху візка. Вони виконують механічну та електричну обмежувальну функцію, запобігаючи виходу транспортного засобу з робочої зони та перевантаженню системи приводу.

Висновки до розділу 1

1. В даному розділі були розглянуті різновиди лінійних електроприводів, детально описано конструкцію лінійного асинхронного двигуна, його області

застосування тощо. Наведено основні характеристики ЛАД в порівнянні з роторними двигунами, а також визначено особливості керування ними та моделювання даних систем.

2. Наведено опис існуючого транспортувального візка з обертовим електродвигуном від виробника КЗПТО, його технічні характеристики та сфери застосування. Сформовані вимоги щодо безпеки використання даного пристрою і вимоги до приводу.

3. На основі наявної моделі візка було створено прототип транспортувального візка із модернізованою системою електроприводу, а саме замінено обертовий двигун на лінійний, а також живлення від мережі замінено автономним.

РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ЗУСИЛЛЯ ЛАД

Вихідні дані для проектування тягового лінійного електроприводу маневрового транспортувального візка (див. також п. 1.4) наступні:

- максимальна маса вантажу – 2000 кг;
- маса транспортувального візка – 1800 кг.

Розрахунок зусилля опору руху транспортувального візка з лінійним електроприводом здійснюється подібно до розрахунку моменту опору механізмів переміщення візка мостового крану і визначається за формулою, відповідно до [23].

$$F_c = F_{c.mp} + F_y \quad (2.1)$$

Сила опору тертя знаходиться як

$$F_{c.mp} = \frac{k_p (G_m + G_g) \left(f_k + \mu_c \frac{d_u}{2} \right)}{D_k / 2}, \quad (2.2)$$

де k_p - коефіцієнт додаткового опору тертя реборд об головки рейок;

G_m, G_g – вага механізму та вантажу відповідно;

$$G_m = m_m \cdot g = 1800 \cdot 9,8 = 17640 \text{ Н};$$

$$G_g = m_g \cdot g = 2000 \cdot 9,8 = 19600 \text{ Н};$$

f_k – плече реактивної сили або коефіцієнт тертя кочення;

μ_c – коефіцієнт тертя ковзання;

d_u – діаметр цапфи (ділянки вала, що спирається на підшипник) колеса (задаємося значенням 45 мм);

D_k – діаметр колеса (задаємося значенням 0,15 м).

В мостових кранах з колесами без реборд опір руху від сил тертя визначається за формулою (2.2), вважаючи $k_p = 1$.

Для кранових механізмів переміщення значення коефіцієнтів μ_c, f_k змінюються в такому діапазоні: $\mu_c = 0,02 \text{ — } 0,1$; $f_k = 0,0003 \text{ — } 0,0012$ м.

Таким чином, сила опору тертя знайдеться як

$$F_{c.тр} = \frac{1 \cdot (17640 + 19600) \left(0,0012 + 0,092 \frac{45 \cdot 10^{-3}}{2} \right)}{0,15 / 2} = 1623,66 \text{ Н.} \quad (2.3)$$

Опір, викликаний наявністю нахилу шляху розраховується за формулою

$$F_y = (G_m + G_g) \sin \alpha, \quad (2.4)$$

де α – кут нахилу шляху.

Проте, так як кут α зазвичай дуже малий то формула (2.4) набуває вигляду

$$F_y = (G_m + G_g) i, \quad (2.5)$$

де $i = 0,001 - 0,05$.

Таким чином

$$F_y = (17640 + 19600) \cdot 0,01 = 372,4 \text{ Н.} \quad (2.6)$$

Відповідно до цього, зусилля опору транспортувального візка з лінійним електроприводом буде складати

$$F_c = 1623,66 + 372,4 = 1996 \text{ Н.} \quad (2.7)$$

Висновки по розділу 2

1. На основі вихідних даних виконано розрахунок сил опору руху транспортувального візка з лінійним електроприводом з урахуванням тертя кочення, додаткових опорів та можливого нахилу шляху.

2. Встановлено, що величина опору руху визначається переважно силами взаємодії коліс з поверхнею кочення та геометричними параметрами несучих елементів, що дає можливість визначити базове тягове зусилля привода.

3. Отримані результати слугують основою для подальшого визначення необхідної потужності лінійного двигуна та дозволяють перейти до розрахунку характеристик, потрібних для забезпечення заданих параметрів руху транспортувального візка.

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛАД

Виконаємо розрахунок параметрів безконтактного технологічного транспортувального візка основі ЛАД. На рис. 3.1 – 3.2 наведено креслення і схему обмотки ЛАД. Вихідними даними для розрахунку є:

- 1) номінальна напруга живлення та частота – 220 В, 50 Гц, 3 фази;
- 2) номінальне тягове зусилля ЛАД – 2000 Н;
- 3) номінальна швидкість – 5 м/с;
- 4) ширина реактивної полоси $b=0,25$ м;
- 5) товщина реактивної полоси $h=2$ мм;
- 6) матеріал полоси – алюміній;
- 7) робочий повітряний зазор між індуктором ЛАД і полоєю – $\Delta=5$ мм

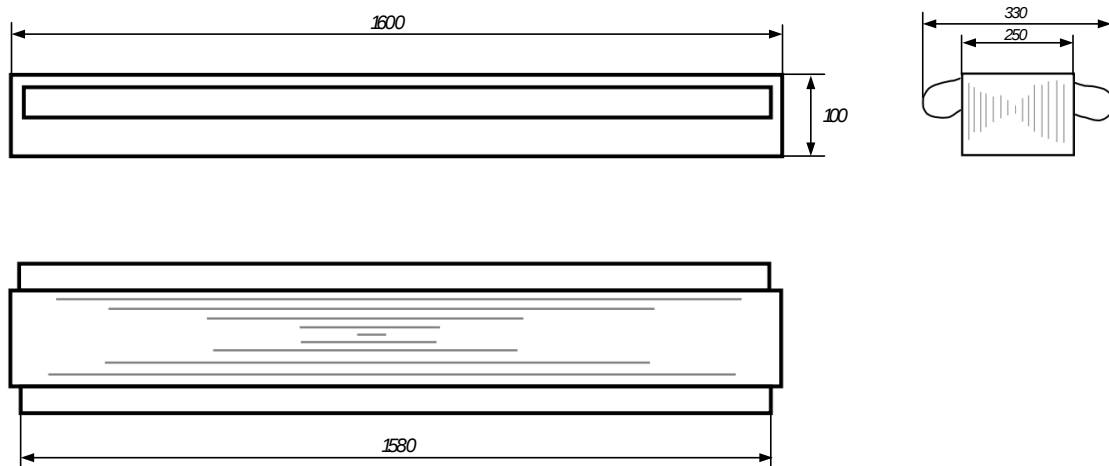


Рисунок 3.1 – Креслення лінійного асинхронного двигуна

Ширина магнітопроводу ЛАД залежить від ширини полоси і дорівнює [24]

$$b_1 = b = 0,25 \text{ м.} \quad (3.1)$$

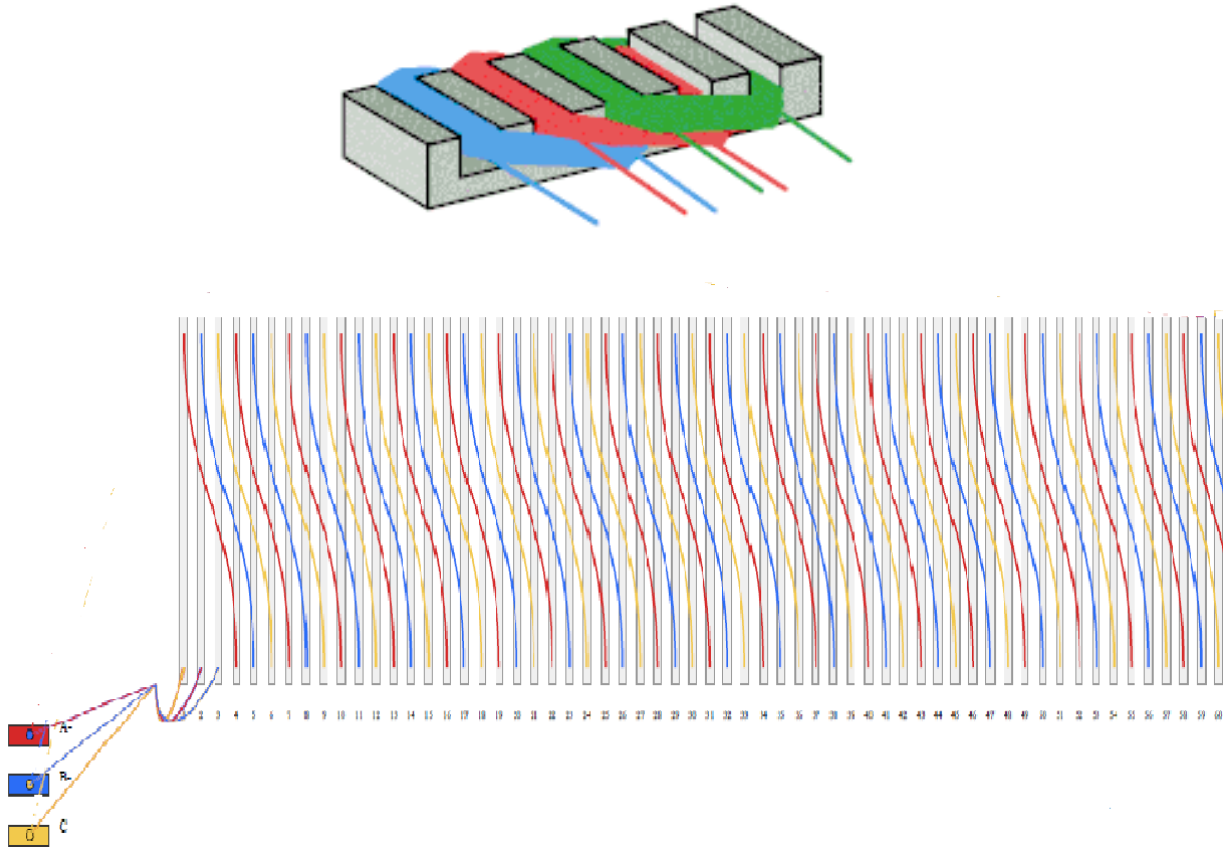


Рисунок 3.2 – Схема обмотки лінійного асинхронного двигуна

Визначимо площу поперечного перерізу полоси:

$$S_1 = 2 \cdot 25 = 50 \text{ мм}^2 \quad (3.2)$$

Синхронна швидкість двигуна визначається як

$$V_c = \frac{V_H}{1 - s_H} = \frac{5}{1 - 0.25} = 6.7 \text{ м/с} \quad (3.3)$$

де $s_H = 0.25$ – номінальне ковзання.

Знаходимо величину полюсного поділку безконтактного виконавчого органу як [25]

$$\tau = \frac{V_c}{2 \cdot f_H} = \frac{6.7}{2 \cdot 50} = 0,067 \text{ м} \quad (3.4)$$

Орієнтовно приймаємо питому силу тяги ЛАД $F_{\Pi}=0.5 \text{ Н/см}^2$ [4] і визначаємо активну площу індуктора:

$$S_{акт} = \frac{F_H}{F_{\Pi}} = \frac{2000}{0.5} = 4000 \text{ см}^2 = 0.4 \text{ м}^2 \quad (3.5)$$

Орієнтовна довжина магнітопроводу індуктора визначається за формулою

$$l_1 = \frac{S_{акт}}{b_1} = \frac{4000}{25} = 160 \text{ см} = 1.6 \text{ м} \quad (3.6)$$

За τ і b_1 визначимо площу одного полюса [26]

$$S_{\tau} = \tau \cdot b_1 = 0.067 \cdot 0.25 = 0.0167 \text{ м}^2 \quad (3.7)$$

Попередньо знайдемо число полюсів індуктора

$$2p = \frac{S_a}{S_{\tau}} = \frac{0.4}{0.0167} = 24 \quad (3.8)$$

Знайдемо число пазів індуктора на полюс і фазу

$$q_1 = \frac{\tau}{m \cdot t_1} = \frac{0.067}{3 \cdot 0.022} = 1 \quad (3.9)$$

$$t_1 = \frac{\tau}{k} = \frac{0.067}{3} = 0.022 \text{ м} \quad (3.10)$$

де t_1 – крок пазів;

$$k = 3, 6, 9, 12, 15, \dots$$

Знайдемо розрахункове число пазів у магнітопроводі індуктора за формулою

$$Z_p = 2p \cdot m_1 \cdot q_1 = 24 \cdot 3 \cdot 1 = 72 \quad (3.11)$$

Число пазів на полюс буде дорівнювати

$$Z_{\tau} = m_1 \cdot q_1 = 3 \cdot 1 = 3 \quad (3.12)$$

При цьому число пазів індуктора буде визначатись за формулою

$$Z_1 = Z_p + Z_{\tau} - 1 = 72 + 3 - 1 = 74$$

Орієнтовне значення критичного зусилля лінійного двигуна дорівнює

$$F_{1k} = \lambda \cdot F_{1H} = 1.8 \cdot 2000 = 3600 \text{ Н} \quad (3.13)$$

Розраховуємо механічну характеристику двигуна, враховуючи крайові ефекти як [24]

$$F_{\text{мех}} = 2F_k \cdot \left(\frac{1}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - \frac{1}{2p \cdot \left(\frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s} \right)} \right) \quad (3.14)$$

де F_k – критичне зусилля розрахункової механічної характеристики;

s, s_k – ковзання і критичне ковзання відповідно;

$2p$ – число полюсів.

Приймаємо критичне ковзання ЛАД

$$s_{1k} = 0.75$$

Розрахуємо критичне зусилля розрахункової механічної характеристики за формулою [24]

$$F_k = \frac{F_H}{\left(\frac{2}{\frac{s_H}{s_k} + \frac{s_k}{s_H}} - \frac{2}{2p \cdot \left(\frac{2-s_H}{s_k} + \frac{s_k}{2-s_H} \right)} \right)} = \frac{2000}{\left(\frac{2}{\frac{0.25}{0.75} + \frac{0.75}{0.25}} - \frac{2}{24 \cdot \left(\frac{2-0.25}{0.75} + \frac{0.75}{2-0.25} \right)} \right)} = 3509,83 \text{ Н}$$

Використовуючи вираз (3.14) будемо механічну характеристику двигуна, що проектується.

За характеристикою, що зображена на рис. 3.3, знаходимо номінальне зусилля лінійного двигуна [25]:

$$F_{нмех} = 2098 \text{ Н при } s_H = 0.25 \quad (3.15)$$

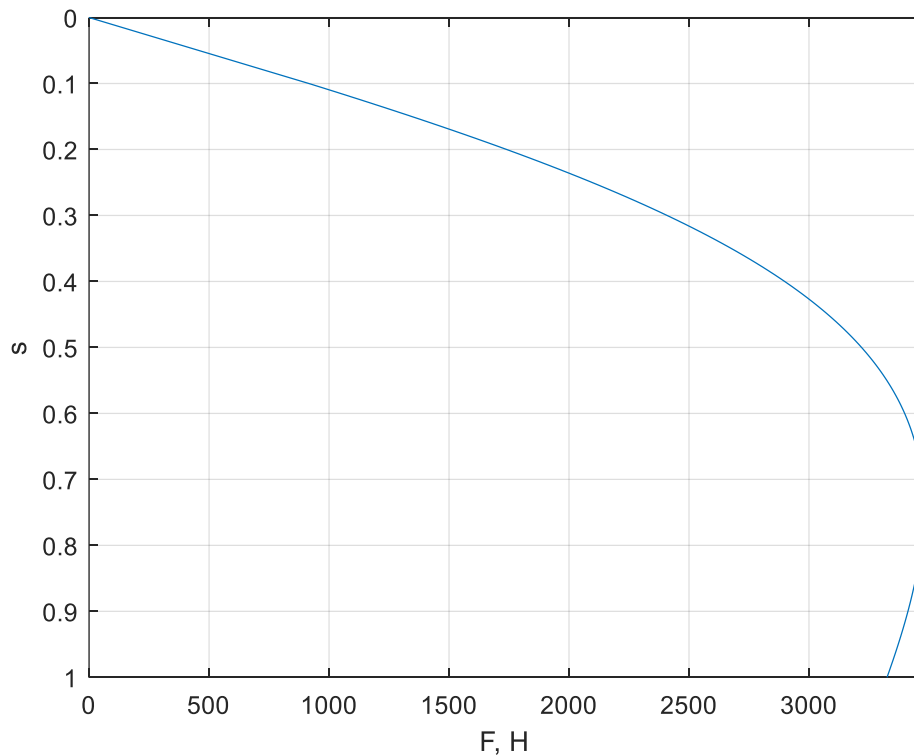


Рисунок 3.3 – Механічна характеристика лінійного двигуна

Перевантажувальна здатність двигуна знаходиться відповідно до формули

$$\lambda = \frac{F_k}{F_{нмех}} = \frac{3509,83}{2098} = 1,67 \quad (3.16)$$

На основі (3.16) визначимо розрахункову потужність двигуна як

$$P_{2,мех} = \frac{F_{нмех} \cdot V_H}{10^3} = \frac{2098 \cdot 5}{10^3} = 10,49 \text{ кВт} \quad (3.17)$$

Розрахунковий струм двигуна буде дорівнювати

$$I_{1н} = \frac{P_{2.мех}}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos \phi_{н} \cdot \eta_{н}} = \frac{10490}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.6 \cdot 0.5} = 91,32 \text{ A} \quad (3.18)$$

Значення $\cos \phi_{н}$, $\eta_{н}$ попередньо прийняті на основі [5].

Визначимо електромагнітну сталу ЛАД за формулою

$$T_{e1} = \frac{1}{2\pi f_H S_k} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,75} = 0,004 \quad (3.19)$$

Визначимо жорсткість механічної характеристики [26] як

$$\beta = \frac{2 \cdot F_k}{s_k \cdot v_{\max}} = \frac{2 \cdot 3509,83}{0,75 \cdot 5} = 1871,9 \text{ Н/м/с} \quad (3.20)$$

Обмотка індуктора виконується в два шари зі зменшеним кроком. Кількість витків у фазі обмотки визначаємо з індукції в повітряному зазорі, яку приймаємо

$$W_1 = \frac{E_1}{2\sqrt{2} \cdot f_1 \cdot K_w \cdot b_1 \cdot \tau_1 \cdot B_{\delta}} \quad (3.21)$$

де f_1 – частота напруги живлення;

K_w – обмоточний коефіцієнт;

b_1 – ширина індуктора;

τ_1 - полюсне ділення;

B_{δ} – величина магнітної індукції в зазорі.

Значення E_1 приймається рівним

$$E_1 = 0,8 U_{\phi} = 0,8 \cdot 220 = 175 \text{ В} \quad (3.22)$$

Визначимо обмоточні коефіцієнти:

$$K_w = K_y \cdot K_p \quad (3.23)$$

де $K_y = \sin(\beta_1 \pi / 2)$ – коефіцієнт укорочення;

β_1 – відносний крок обмотки по пазах [25].

$$\beta_1 = \frac{m_1 \cdot q_1 - 1}{m_1 \cdot q_1} = \frac{3 \cdot 1 - 1}{3 \cdot 1} = 0,67 \quad (3.24)$$

$$K_y = \sin\left(\frac{0,89\pi}{2}\right) = 0,985 \quad (3.25)$$

Коефіцієнт розподілу знаходиться як

$$K_p = \frac{\sin(\pi / 2m_1)}{q_1 \cdot \sin(\pi / 2m_1 \cdot q_1)} = \frac{\sin(\pi / 2 \cdot 3)}{1 \cdot \sin(\pi / 2 \cdot 3 \cdot 1)} = 1 \quad (3.26)$$

Підставивши (3.25), (3.26) в (3.23), отримуємо значення обмоточного коефіцієнта

$$K_w = 0,985 \cdot 1 = 0,985 \quad (3.27)$$

Приймаємо індукцію рівною [5]:

$$B_\delta = 0.345 \text{ Тл} \quad (3.28)$$

Підставивши (3.4), (3.22), (3.27), (3.28) в (3.21) отримуємо число витків у фазі обмотки

$$W_1 = \frac{175}{2\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0,985 \cdot 0,25 \cdot 0,067 \cdot 0,345} = 217,66 \approx 218 \quad (3.29)$$

Число витків у пазу:

$$W_n = \frac{W_1}{p \cdot q_1} = \frac{218}{12 \cdot 1} \approx 18 \quad (3.30)$$

Визначимо поперечний переріз одного витка обмотки індуктора, вважаючи, що допустима густина струму $\Delta_c = 4 \text{ А/мм}^2$. Беремо круглий провід марки ПВБЛ з поперечним перерізом 10 мм^2 . Один виток утворюється з 4 елементарних витків із заданим поперечним перерізом. Тоді площа поперечного перерізу витка становитиме $S = 4 \cdot 10 = 40 \text{ мм}^2$ [25]. Густина струму у витку становитиме приблизно

$$\Delta_c = \frac{I_{1H}}{S} = \frac{91,32}{40} = 2,28 \text{ А / мм}^2 \quad (3.31)$$

Вибираємо висоту паза рівною $h_n = 38 \text{ мм}$ і ширину $b_n = 8 \text{ мм}$. Коефіцієнт заповнення паза міддю приймаємо $K_3 = 0,37$

Розміри зубця визначаються за виразом:

$$b_z = t_1 - b_n = (22 - 8) \cdot 10^{-3} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.32)$$

Знаючи ширину зубця, можна визначити точну довжину магнітопроводу індуктора:

$$l_c = Z_1 \cdot t_1 + b_z = 74 \cdot 22 \cdot 10^{-3} + 14 \cdot 10^{-3} = 1614 \text{ мм} \quad (3.33)$$

Лінійне навантаження двигуна визначається як

$$A = \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot I_1}{l_c} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 218 \cdot 91,32}{1614} = 72,7 \text{ А/ мм} \quad (3.34)$$

Визначаємо величину струму намагнічування і мінімальну висоту магнітопроводу індуктора h_c' . Магнітний потік на полюс визначається за формулою:

$$\Phi_1 = \frac{2 \cdot b_1 \cdot \tau \cdot B_\delta}{\pi} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 0,067 \cdot 0,345}{\pi} = 0,003 \text{ Вб} \quad (3.35)$$

При такому магнітному потоці і величині допустимої індукції в сталі ярма $B_c=1,4 \text{ Тл}=1,4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб/см}^2$, величина h_c' рівна [24]:

$$h_c' = \frac{0,75\Phi_1}{b_1 \cdot B_c} = \frac{0,75 \cdot 0,003}{25 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4}} = 0,64 \text{ см} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.36)$$

У зв'язку із застосуванням для набору і кріплення пакета індуктора натискних пластин, збільшуємо висоту ярма магнітопроводу і приймаємо її рівною 5 см. Вибираємо величину ефективного немагнітного зазору δ' . Слід зазначити, що у немагнітного ротора товщина пластини ротора входить до величини повітряного зазору. Для лінійного двигуна рекомендується вибирати значення зазору не менше $0,04\tau$.

$$\delta' = K_K \delta \quad (3.37)$$

де $\delta=0,04\tau=2 \text{ мм}$ – прийнятий повітряний зазор

K_K – коефіцієнт повітряного зазору

$$K_K = \frac{t_1 + 10\delta}{b_z + 10\delta} = \frac{22 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \quad (3.38)$$

Тоді

$$\delta' = K_K \delta = 1,2 \cdot 2 = 2,4 \text{ мм} \quad (3.39)$$

Сила намагнічування повітряного зазору визначається за наступним виразом, де $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна проникність повітряного зазору

$$2F_\delta = \frac{2\delta' \cdot B_\delta}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,345}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 1317,8 \text{ АВ} \quad (3.40)$$

Визначимо величину струму намагнічування

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot 2F_{\delta}}{0,9m_1 \cdot W_1 \cdot K_w} = \frac{12 \cdot 1317,8}{0,9 \cdot 3 \cdot 218 \cdot 0,985} = 27,28 \text{ A} \quad (3.41)$$

Враховуючи значення ЕРС обмотки індуктора (3.22) і величину струму намагнічування (3.41), визначимо реактивний опір контура намагнічування заступної схеми двигуна:

$$x_{\mu} = \frac{E_1}{I_{\mu}} = \frac{175}{27,28} = 6,41 \text{ Ом} \quad (3.42)$$

Визначимо активні і реактивні опори обмотки і реактивної полоси. Активний опір обмотки індуктора при 75 градусах Цельсія [26]

$$r_1 = \rho_{75} \frac{l_{w_1} \cdot W_1}{S_1} = 2,17 \cdot 10^{-8} \frac{0,66 \cdot 218}{50 \cdot 10^{-6}} = 0,062 \text{ Ом} \quad (3.43)$$

де

$$l_{w_1} = 2b_1 + 3,6\tau \cdot \beta_1 = 2 \cdot 0,25 + 3,6 \cdot 0,067 \cdot 0,67 = 0,66 \text{ м} \quad (3.44)$$

де $\beta_1 = 0,67$ – відносний крок по пазах,

$\rho_{75} = 2,17 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – питомий опір міді.

Реактивний опір розсіювання обмотки статора

$$X_1 = 4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{W_1^2}{p \cdot q_1} \cdot b_1 \cdot (\lambda_{\pi 1} + \lambda_{\lambda 1} + \lambda_{\delta 1}) \quad (3.45)$$

де $\lambda_{\pi 1}$ – пазова провідність розсіювання;

$\lambda_{\lambda 1}$ – провідність розсіювання лобових частин;

$\lambda_{\delta 1}$ – провідність диференційного розсіювання.

Для напівзакритого паза провідність розсіювання визначається із наступного виразу (рис. 3.4):

$$\lambda_{\text{лп1}} = \frac{3\beta_1 + 1}{4} \cdot \left(\frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} + \frac{h_0}{b_0} \right) \quad (3.46)$$

$$\lambda_{\text{лп1}} = \frac{3 \cdot 0,67 + 1}{4} \cdot \left(\frac{35}{3 \cdot 8} + \frac{3}{8} + \frac{2}{7} \right) = 1,59 \quad (3.47)$$

Провідність розсіювання лобових частин обмотки

$$\lambda_{\text{лп1}} = 0,57 \cdot \frac{\tau}{b_1} \cdot q_1 \cdot \frac{3\beta_1 - 1}{2} = 0,57 \cdot \frac{0,067}{0,25} \cdot 1 \cdot \frac{3 \cdot 0,67 - 1}{2} = 0,657 \quad (3.48)$$

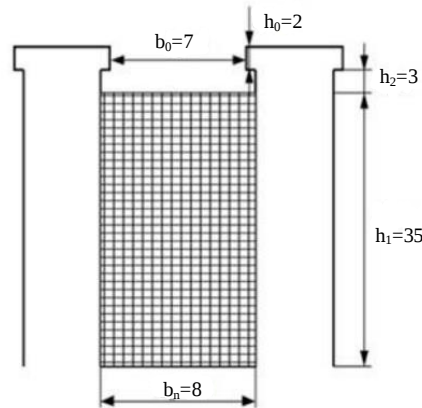


Рисунок 3.4 – Паз індуктора двигуна

Провідність диференційного розсіювання

$$\lambda_{\delta 1} = \frac{m_1 \cdot q_1}{\pi^2} \cdot \frac{\tau}{\delta'} \cdot K_w^2 \sigma_\delta = \frac{3 \cdot 1}{3,14^2} \cdot \frac{0,067}{2,4 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,985^2 \cdot 0,06 = 0,494 \quad (3.49)$$

Визначивши провідності розсіювання (3.47), (3.48), (3.49), визначимо X_1 :

$$X_1 = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{218^2}{12 \cdot 1} \cdot 0,25 \cdot (1,59 + 0,657 + 0,494) = 2,142 \text{ Ом} \quad (3.50)$$

Для визначення опору полоси, скористаємося заступною схемою, зображеною на рис. 3.5 [25]. При цьому збільшення струму намагнічування у

порівнянні із звичайним двигуном, будемо враховувати відповідним збільшенням коефіцієнта розсіювання σ_1 .

$$\sigma_1 = 1 + \frac{x_1}{x_\mu} = 1 + \frac{2,14}{6,41} = 1,33 \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} r_1'' &= r_1 \cdot \sigma_1 & x_2'' &= x_2' \cdot \sigma_1^2 \\ x_1'' &= x_1 \cdot \sigma_1 & x_k &= x_1'' + x_2'' \\ r_2'' &= r_2' \cdot \sigma_1^2 \end{aligned} \quad (3.52)$$

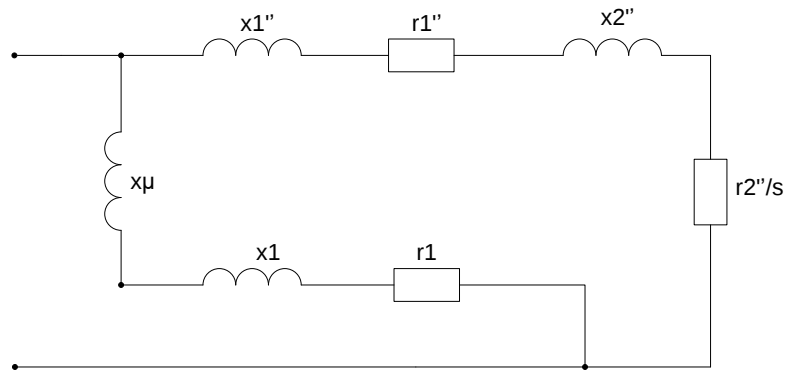


Рисунок 3.5 – Заступна схема двигуна, яка використовується для визначення опору полоси

Величину критичного зусилля визначимо за наступною формулою [22]

$$F_k = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{2V_c \cdot (r_1'' + \sqrt{r_1''^2 + x_k^2})} \quad (3.53)$$

Перетворюючи даний вираз, отримуємо значення X_k

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2 - 2F_k \cdot V_c \cdot r_1''}{2F_k \cdot V_c} \right)^2 - r_1''^2}$$

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2 - 2 \cdot 3509,83 \cdot 6,7 \cdot 0,082}{2 \cdot 3509,83 \cdot 6,7} \right)^2 - 0,082^2} = 3 \text{ Ом} \quad (3.54)$$

де

$$r_1'' = r_{1_{75}} \cdot \sigma_1 = 0,062 \cdot 1,33 = 0,082 \text{ Ом} \quad (3.55)$$

В свою чергу

$$X_K = X_1 \cdot \sigma_1 + X_2' \cdot \sigma_1^2 \quad (3.56)$$

На основі (3.56) з врахуванням (3.52) маємо:

$$X_2' = \frac{X_K - \sigma_1 \cdot X_1}{\sigma_1^2} = \frac{3 - 1,33 \cdot 2,142}{1,33^2} = 0,085 \text{ Ом} \quad (3.57)$$

Так як товщина реактивної полоси прокату $\Delta = 2$ мм, визначимо вторинний опір полоси r_2' за формулою

$$r_2' = 4 \cdot m_1 \cdot W_1^2 \cdot K_w \cdot \frac{\rho \cdot b_1}{l_c \cdot \Delta} =$$

$$= 4 \cdot 3 \cdot 218^2 \cdot 0,985 \cdot \frac{2,17 \cdot 10^{-8} \cdot 0,25}{1643 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 0,927 \text{ Ом} \quad (3.58)$$

На основі знайдених опорів визначимо фактичний струм двигуна. В номінальному режимі, тобто при номінальному ковзанні, струм визначається опором r_2' , а величиною

$$R_2' = \frac{r_2'}{s_H} = \frac{0,927}{0,25} = 3,7 \text{ Ом} \quad (3.59)$$

Для визначення струму індуктора, тобто первинного струму двигуна, скористаємося Т-подібною заступною схемою, яка зображена на рис. 3.6.

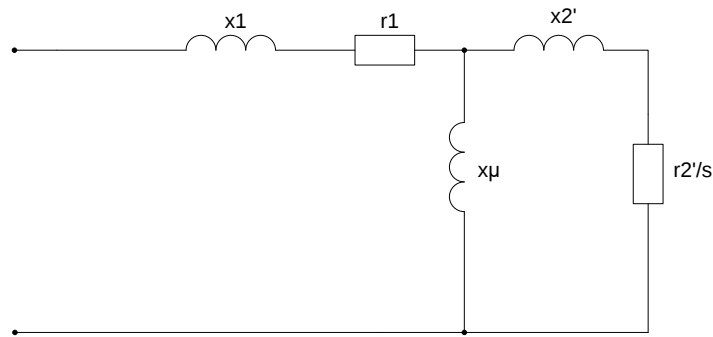


Рисунок 3.6 – Т – подібна заступна схема лінійного асинхронного двигуна

Повний приведенний опір вторинної мережі

$$Z_2' = R_2' + jX_2' = 3,7 + j0,085 \text{ Ом} \quad (3.60)$$

Опір вторинного контура разом із контуром намагнічування, визначимо наступним чином [26]:

$$Z_{ab} = \frac{Z_\mu \cdot Z_2'}{Z_\mu + Z_2'} = \frac{j6,41 \cdot (3,7 + j0,085)}{j6,41 + 3,7 + j0,085} = 2,72 + j1,63 \text{ Ом} \quad (3.61)$$

де $Z_\mu = jx_\mu$

Загальний опір заступної схеми

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_{AB} + Z_1 = 2,72 + 1,63j + 0,062 + 2,142j = \\ &= 2,782 + 3,776j \text{ Ом} \end{aligned} \quad (3.62)$$

Визначимо номінальний струм індуктора

$$I_1 = \frac{U_{1\phi}}{Z_0} = \frac{220}{2,782 + j3,776} = 27,83 - j37,76 = 46,9e^{-53,6j} \text{ А} \quad (3.63)$$

Повна потужність, що споживається двигуном

$$\begin{aligned} S_1 &= 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_1 = 3 \cdot 220 \cdot (27,83 - j34,76) = \\ &= 18,37 - 22,94j = 29,389e^{-51,31j} \text{ кВА} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Звідки випливає, що активна потужність на вході двигуна

$$P_1 = 18,37 \text{ кВт} \quad (3.65)$$

Реактивна потужність на вході двигуна

$$Q_1 = 22,94 \text{ кВАр} \quad (3.66)$$

Знаючи величину повної і реактивної потужності, можна визначити $\cos\varphi$ і ККД в номінальному режимі:

$$\cos\varphi_H = \frac{P_1}{S_1} = \frac{18,37}{29,389} = 0,63 \quad (3.67)$$

$$\eta_H = \frac{P_2}{P_1} = \frac{10,49}{18,37} = 0,57 \quad (3.68)$$

Таблиця 3.1 – Номінальні дані спроектованого двигуна

I_{1H}, A	46,9
$\eta_H, \%$	57
$\cos\varphi_H$	0,63
$S_{1H}, \text{кВт}$	29,39

Висновки до розділу 3

1. В даному розділі, на основі вихідних даних, а саме номінальної напруги живлення, частоти, номінального тягового зусилля, номінальної швидкості, ширина і товщина реактивної полоси та робочого повітряного зазору між індуктором ЛАД і реактивною половою було виконано побудову механічної характеристики двигуна та розраховано його параметри.

2. На основі розрахованих параметрів, а також Т-подібної схеми заміщення лінійного асинхронного двигуна знайдено номінальні дані двигуна, що проектується. Це дає змогу здійснити моделювання статичних і динамічних режимів лінійного електроприводу і визначити його відповідність до поставлених вимог.

РОЗДІЛ 4 ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

При виборі перетворювача частоти необхідно зважати на такі параметри, як напруга живлення, номінальна потужність та струм електродвигуна. Отже, необхідно обрати перетворювач частоти з потужністю 30 кВт і максимальним вихідним струмом більше 47 А.

Обираємо перетворювач частоти ACS880-01-115A-2 від виробника ABB (рис. 4.1), параметри якого наведені в табл. 4.1 [27].

Перетворювачі загального призначення від ABB підходять для використання в широкому спектрі галузей промисловості. Типові застосування включають системи з постійним моментом, такі як насоси, вентилятори та конвеєри. Перетворювачі загального призначення від ABB ідеально підходять для середовищ, які потребують простоти встановлення, введення в експлуатацію та використання, без необхідності індивідуального проектування чи спеціальної розробки продукту.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики перетворювача ACS880-01-115A-2

Номінальна напруга живлення	208..240 В
Частота мережі живлення	50...60 Гц
Потужність двигуна [кВт]	30 кВт (нормальний режим роботи) 22 кВт (важкий режим роботи)
Лінійний струм	115 А (нормальний режим роботи) 87 А (важкий режим роботи)
Ступінь захисту	IP21

Перетворювач ACS880 дозволяє вибирати та налаштовувати параметри приводу без увімкнення живлення через інтерфейс FlashDrop. Користувачі можуть приховувати окремі параметри/групи з дисплея перетворювача, захищаючи перетворювач та підключене обладнання від несанкціонованого доступу.

Ця серія перетворювачів пропонує можливість підключення модуля розширення релейних виходів. Підключені модулі забезпечують три додаткові релейні виходи. Усі реле можна запрограмувати на ввімкнення або вимкнення через панель керування. Польову шину також можна використовувати для керування зовнішніми компонентами системи.

Модуль польової шини забезпечує підключення до основних систем автоматизації. Ці модулі усувають потребу в тривалій кабельній розводці, зменшуючи витрати та підвищуючи надійність системи.

ACS880 підтримує наступні опції польової шини:

- DeviceNet™
- LonWorks®
- PROFIBUS DP
- CANopen®
- ControlNet
- Modbus TCP
- EtherNet/IP™
- PROFINET IO
- POWERLINK
- EtherCAT®

Для захисту від перевантажень та коротких замикань обираємо автоматичний вимикач C60H-DC [28] від виробника Schneider Electric, характеристики якого наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики автоматичного вимикача C60H-DC

Серія	Acti9
Кількість полюсів	2
Номінальний струм	50 А
Вимикаюча здатність	10 кА

Номинальний струм автоматичного вимикача 50 А та здатність відключення на рівні 10 кА забезпечує ефективний захист для електричних систем. Пристрій має два захищені полюси і належить до серії Acti9. Конструкція оптимізована для захисту від перевантажень та коротких замикань, гарантуючи високий рівень безпеки та надійності.

Висновки до розділу 4

1. В даному розділі за попередньо розрахованими параметрами лінійного електродвигуна було обрано перетворювач частоти ACS880-01-115A-2 від виробника АВВ. Наведено його технічні характеристики, а також особливості та властивості серії перетворювальних пристроїв загального призначення ACS880.

2. Для захисту силового обладнання обрано автоматичний вимикач C60H-DC. Автоматичні вимикачі C60H-DC від виробника Schneider Electric мають механізми відключення для захисту від короткого замикання та перевантаження.

3. Вибір силової апаратури дозволяє здійснити проєктування схеми керування електроприводом транспортувального візка.

РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Параметри математичної моделі лінійного асинхронного двигуна знаходяться аналогічно до параметрів обертальної асинхронної машини, для опису якої використовується універсальна однофазна схема заміщення, рис. 5.1 [17].

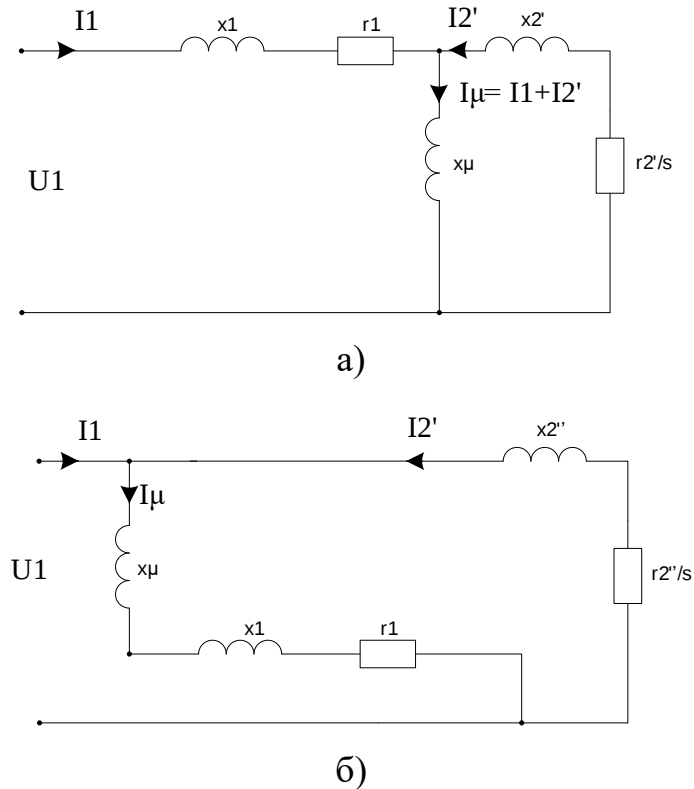


Рисунок 5.1 – Т-подібна (а) і Г-подібна (б) схеми заміщення ЛАД: U_1 – первинна фазна напруга живлення; I_1, I_2' – первинний та приведений вторинний фазні струми; I_μ – намагнічувальний струм; r_1, x_1 – активний і індуктивний опори фази статора; r_2', x_2' – приведені активний і індуктивний опори фази ротора; x_μ – індуктивний опір контуру намагнічування; s – ковзання

Електромагнітне тягове зусилля ЛАД знаходиться по аналогії до електромагнітного моменту M обертальної машини за формулою [17]:

$$M = \frac{P_{\text{мх}}}{\Omega}, \quad (5.1)$$

де $P_{\text{мх}}$ – механічна потужність на валу; Ω – кутова швидкість ротора.

Тоді електромагнітне тягове зусилля може бути виражене як:

$$F = \frac{P_{\text{мх}}}{V}, \quad (5.2)$$

де V – швидкість ротора ЛАД.

Механічна потужність на валу ротора дорівнює [24]

$$P_{\text{мх}} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{(1-s)}{s}, \quad (5.3)$$

де m_1 – число фаз обмотки.

Механічна потужність не залежить від принципу роботи електричної машини, тому тягове зусилля ЛАД отримується з (5.2) [29]:

$$\begin{aligned} F &= \frac{P_{\text{мх}}}{V} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{(1-s)}{Vs} = m_1 r_2' \frac{(1-s)}{Vs} \cdot \frac{U_1^2}{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2} = \\ &= m_1 r_2' \frac{(1-s)}{2\tau f_1 (1-s)s} \cdot \frac{U_1^2}{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2} = \frac{m_1 r_2'}{2\tau f_1 s} \cdot \frac{U_1^2}{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2} = \\ &= \frac{m_1 r_2'}{2\tau f_1 s} I_2'^2. \end{aligned}$$

Виразимо момент M через фазну напругу U_1 , параметри схеми заміщення і ковзання s :

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (5.4)$$

Звідси рівняння, що описують ЛАД, будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{m_1 r_2'}{2\tau f_1 s} \frac{U_1^2}{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2} = \frac{m_1 r_2'}{2\tau f_1 s} I_2'^2; \\
 I_2' &= \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}; \\
 F - F_c &= M_\Sigma \cdot \frac{dV}{dt}.
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

де F_c – зусилля опору руху; M_Σ – маса рухомої частини ЛАД та корисного навантаження; $s = (V_1 - V)/V_1$ – ковзання ЛАД.

Рівняння для визначення первинного струму I_1 впливає із Г-подібної схеми заміщення ЛАД [25]:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_1 &= \dot{I}_m + \dot{I}_2'; \\
 \dot{I}_m &= \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m},
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

де Z_1 – повний опір первинної обмотки; $Z_m = x_m$ – опір контуру намагнічування.

Звідси, модуль вторинного струму дорівнює:

$$I_m = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}}. \tag{5.6}$$

Структурна схема ЛАД, складена у відповідності до рівнянь (5.5), представлена на рис. 5.2. Управління двигуном здійснюється одночасно по двом каналам: частоти і напруги статора. З цією метою в моделі передбачено два входи завдання – відповідно, по напрузі і частоті (рис. 5.2) [17, 30].

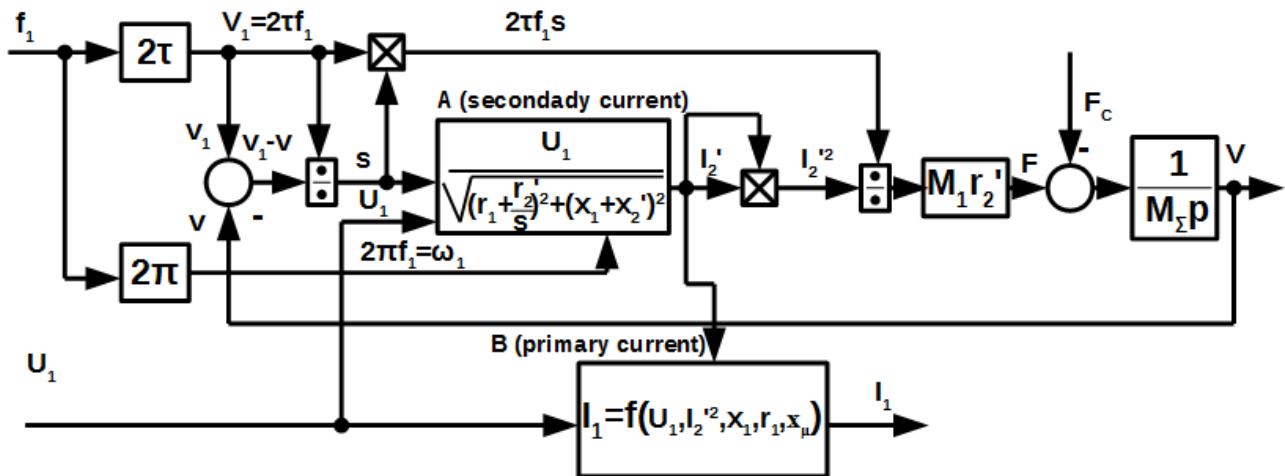


Рисунок 5.2 – Структурна схема ЛАД

Структурна реалізація блоку A (secondary current), призначеного для визначення вторинного струму I_2' , показана на рис. 5.3 [30].

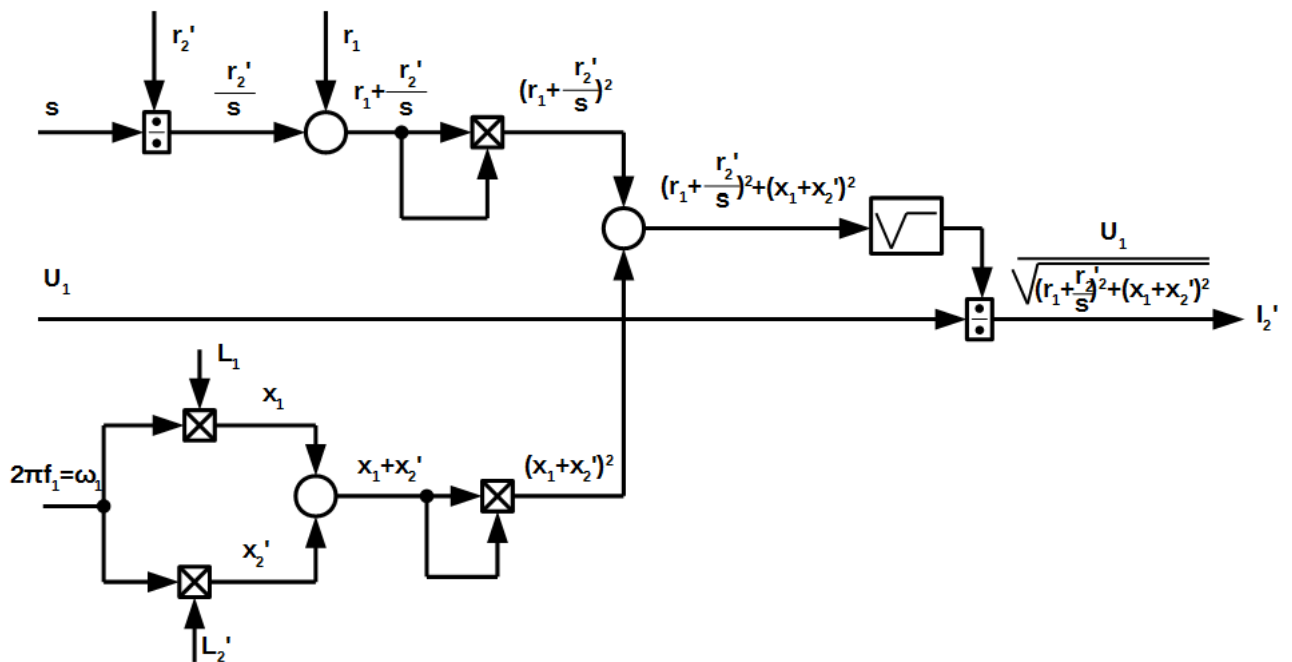


Рисунок 5.3 – Структурна схема блоку A для визначення вторинного струму: L_1, L_2' - індуктивності розсіювання первинної і вторинної обмоток, відповідно

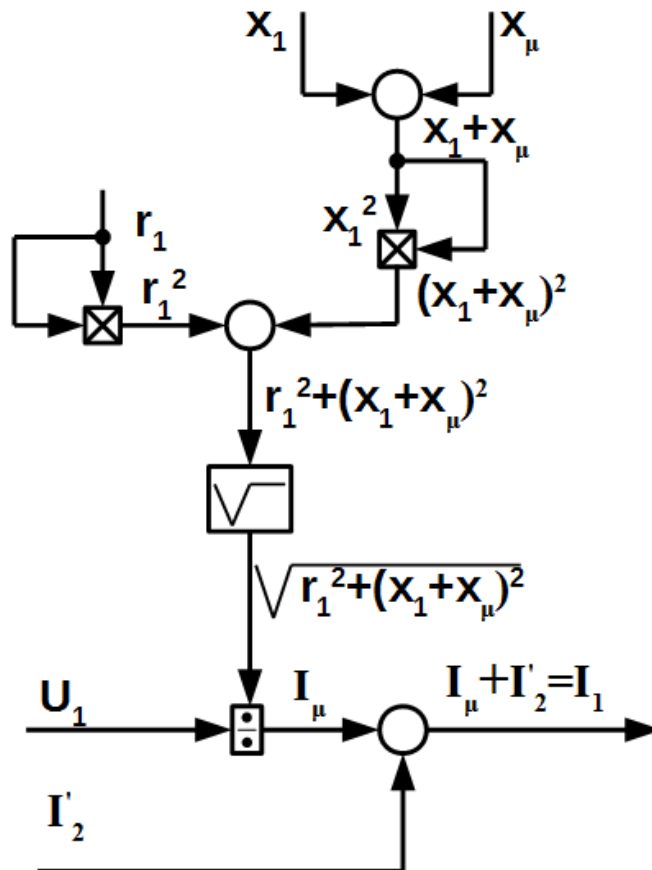


Рисунок 5.4 – Структурна схема блоку В для визначення первинного струму

Структурна схема лінійного асинхронного електропривода з частотним керуванням представлена на рис. 1.6 [30].

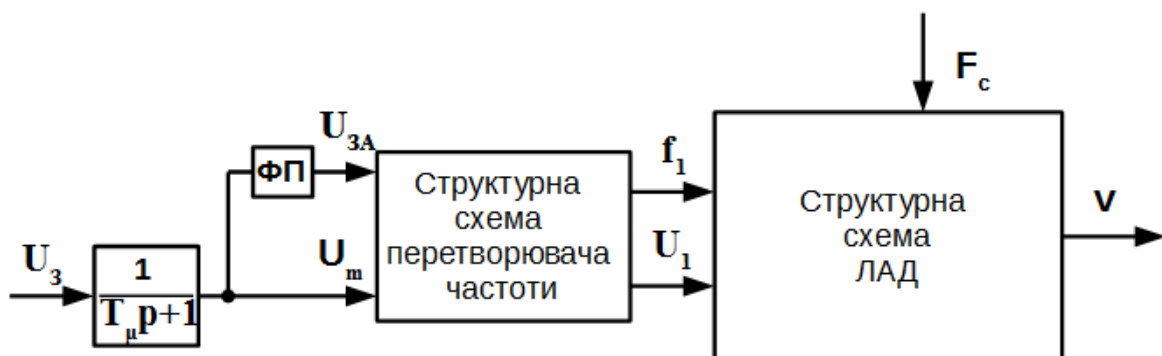


Рисунок 5.6 - Структурна схема лінійного асинхронного електропривода з частотним керуванням

Методи підвищення жорсткості механічних характеристик, які були описані в п.1.3 базуються на застосуванні зворотного зв'язку за струмом [17]. Зазвичай регулятор струму WPC реалізується за ПІ-алгоритмом, що призводить до того, що живлення статора двигуна працює подібно до керованого джерела струму. За таких умов механічна характеристика на робочому інтервалі стає більш жорсткою, зростає значення критичного тягового зусилля, проте пусковий момент зменшується [29]. Функціональна схема лінійного електроприводу з контуром регулювання струму статора представлена на рис. 1.7.

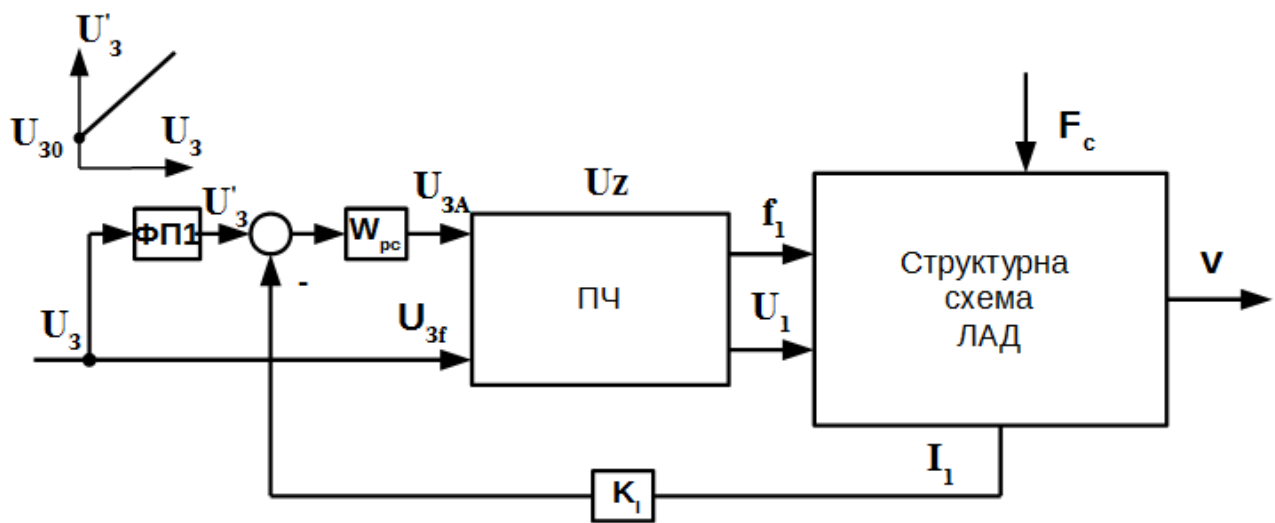


Рисунок 5.7 – Функціональна схема лінійного електропривода зі зворотним зв'язком за струмом

Виконаємо моделювання лінійного асинхронного двигуна в середовищі Matlab Simulink. Вимоги для моделювання наступні [26]:

- величина прискорення та уповільнення не менше 1 м/с² ;
- точність позиціонування 50 мм;
- тривалість вмикання 100%;
- напруга живлення ЛАД 220 В, 50 Гц, 3 фази.

В процесі моделювання досліджувались механічна характеристика ЛАД та графіки перехідних процесів в лінійному електроприводі.

На рис. 5.8 – 5.9 наведено результати моделювання лінійного асинхронного двигуна при прямому пуску на холостому ході на номінальну швидкість 5 м/с з наступним накиданням на 12 с номінального навантаження 2000 Н.

Час перехідного процесу розгону до номінальної швидкості при прямому пуску 10 с, прискорення при цьому складає 1 м/с^2 . При прикладанні номінального навантаження статична похибка становить $0,7 \text{ м/с}$ (10%).

З графіків встановлено, що величина ККД складає 0.68, що відповідає розрахованому значенню.

На початковому етапі спостерігається короткочасне зростання струму, що зумовлено інерційними процесами під час розгону. Після досягнення номінальної швидкості струм стабілізується на номінальному рівні, що свідчить про сталий режим роботи.

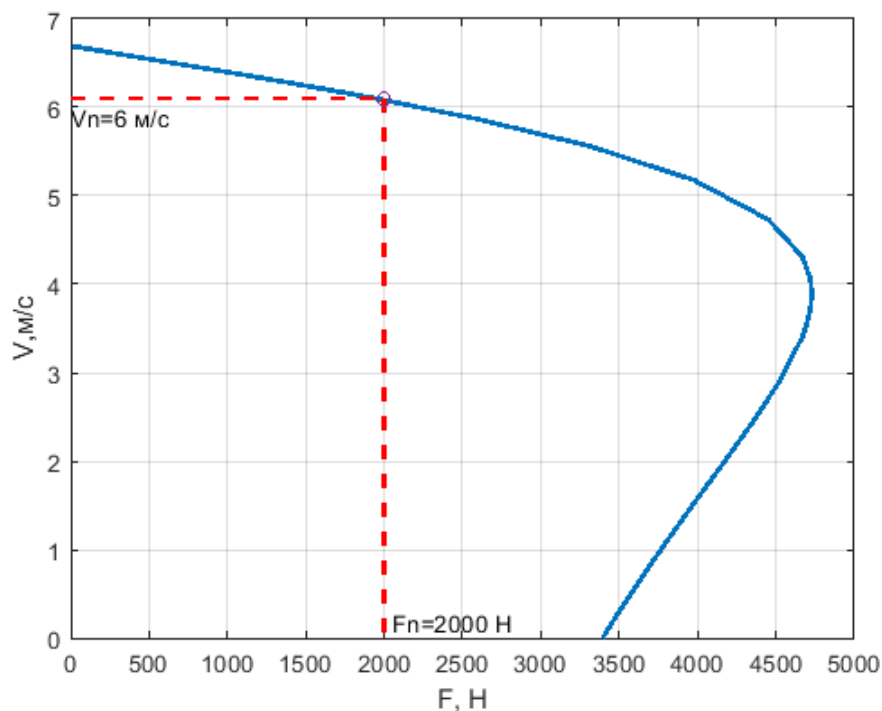


Рисунок 5.8 – Механічна характеристика ЛАД при прямому пуску

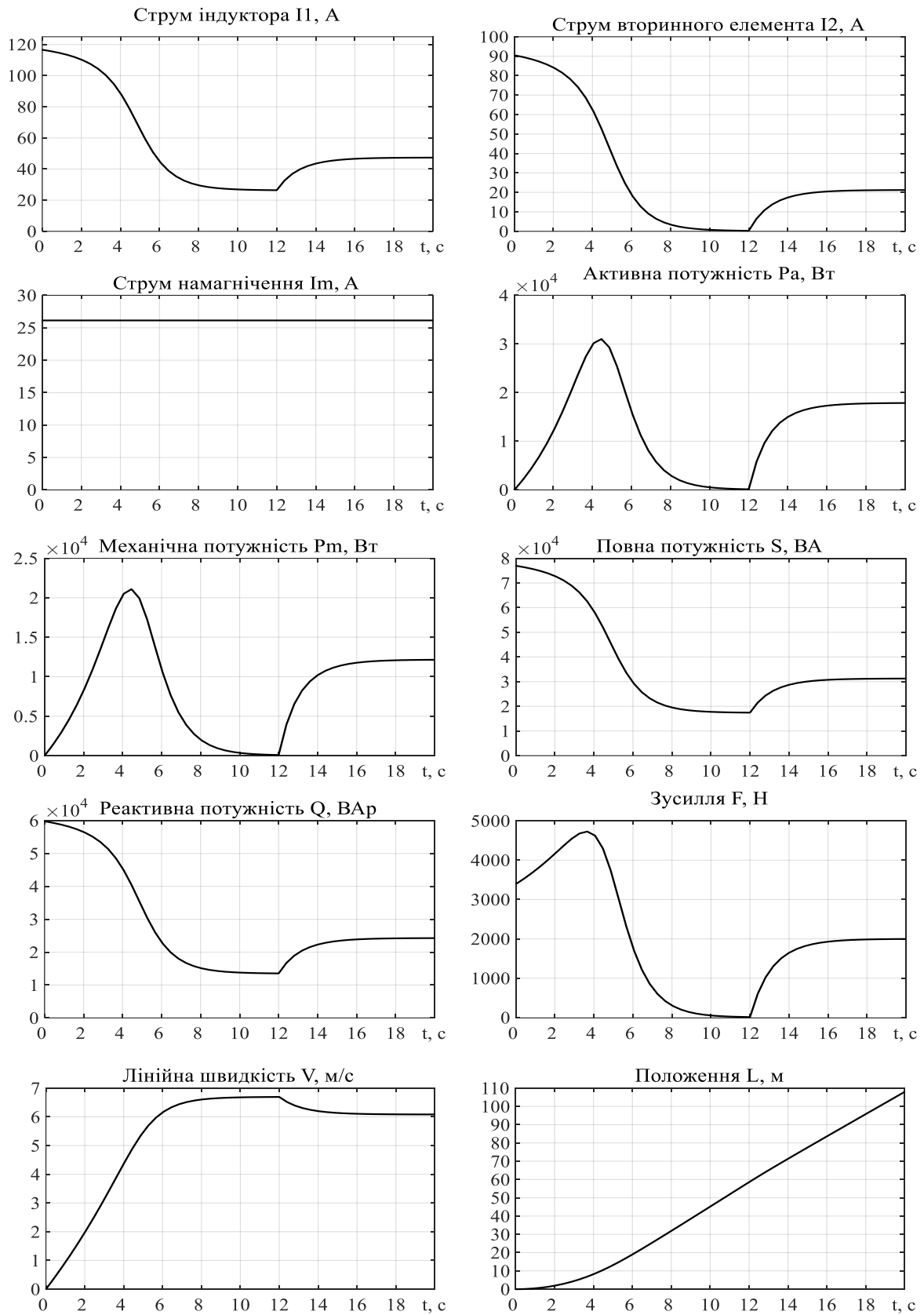


Рисунок 5.9 - Результати дослідження моделі лінійного асинхронного двигуна при прямому пуску

На рис. 5.10 – 5.11 наведено результати моделювання системи ЛАД із застосуванням зворотного зв'язку за струмом. Графіки швидкостей і зусиль показані у збільшеному масштабі. З графіків видно, що використання замкненої системи забезпечує покращення динамічних характеристик. При наявності зворотного зв'язку стична похибка складає 1,8%, що в 5,5 разів менше, чим в розімкненій системі. Навантаження викликає менше зниження швидкості порівняно із системою без зворотного зв'язку.

Графік механічної швидкості свідчить про підвищення жорсткості.

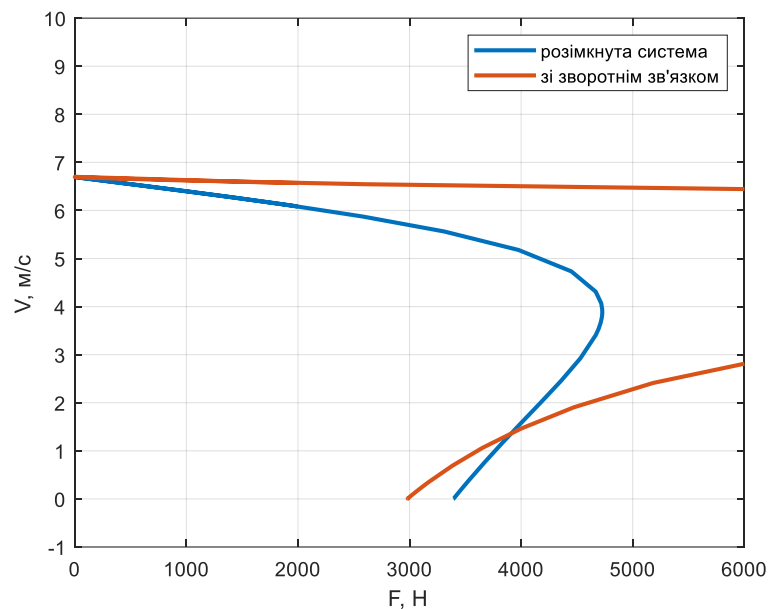


Рисунок 5.10 – Механічна характеристика ЛАД при прямому пуску зі зворотним зв'язком по струму

На рис. 5.12 наведено порівняння зміни лінійної швидкості при накиданні навантаження розімкнутої системи і системи зі зворотним зв'язком за струмом. Згідно з рисунком можна побачити що система зі зворотним зв'язком забезпечує швидший розгін. Крім того, розімкнута система є чутливішою до накидання навантаження. Регулятор струму компенсує вплив навантаження, тому зменшення швидкості є несуттєвим.

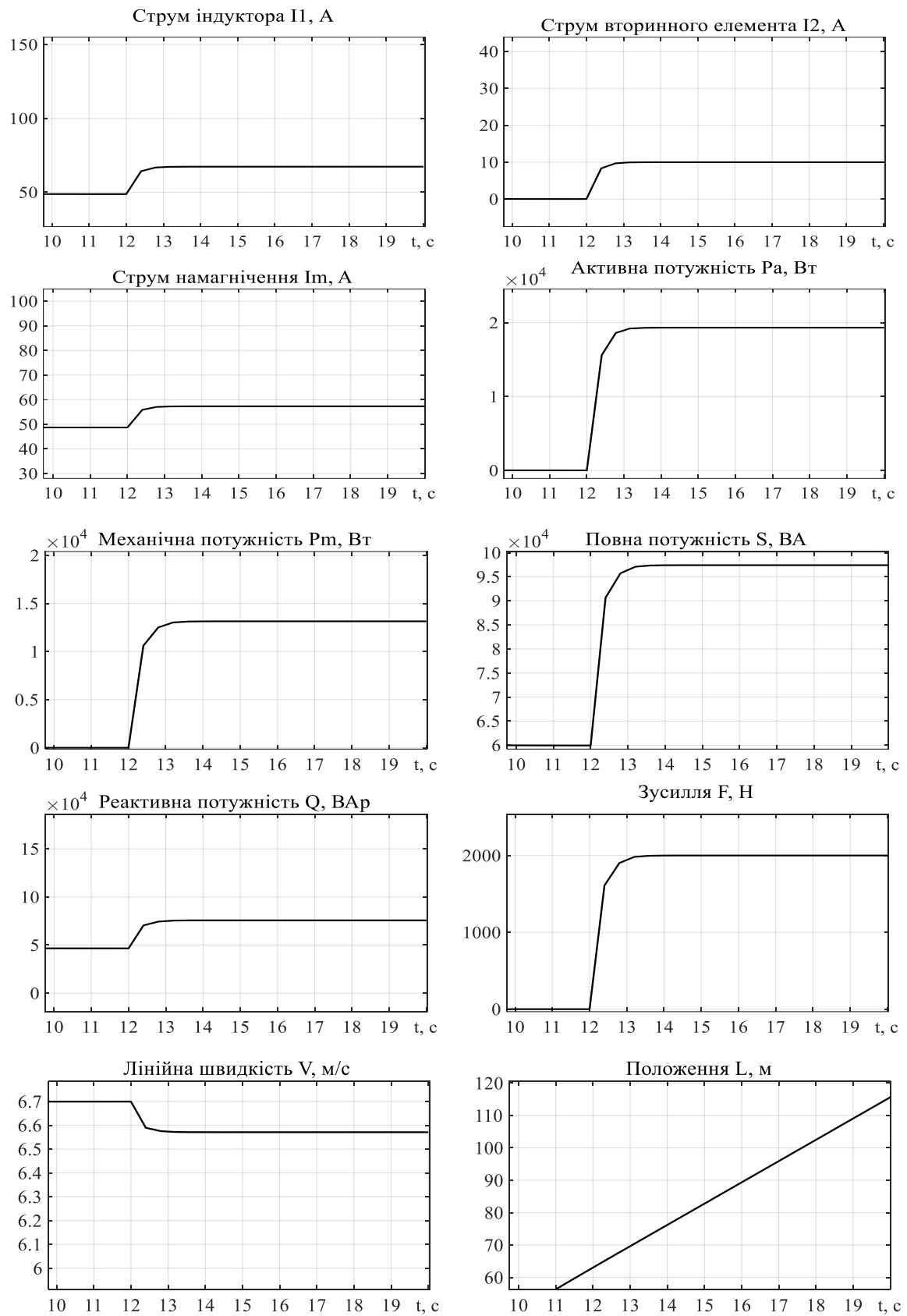


Рисунок 5.11 - Результати дослідження лінійного асинхронного двигуна при прямому пуску зі зворотним зв'язком по струму

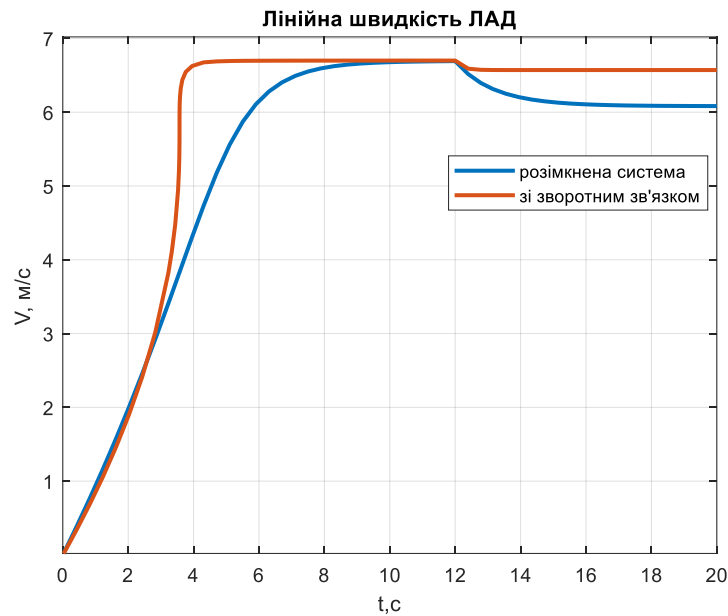


Рисунок 5.12 – Порівняння лінійної швидкості ЛАД розімкнутої та замкнутої за струмом системи

На рис. 5.13 наведено графіки перехідних процесів дослідження динамічних характеристик ЛАД із використанням задатчика інтенсивності. Задатчик інтенсивності дозволяє здійснювати плавне регулювання напруги і частоти перетворювача в процесі пуску і, тим самим, знизити пускові струми та динамічні навантаження.

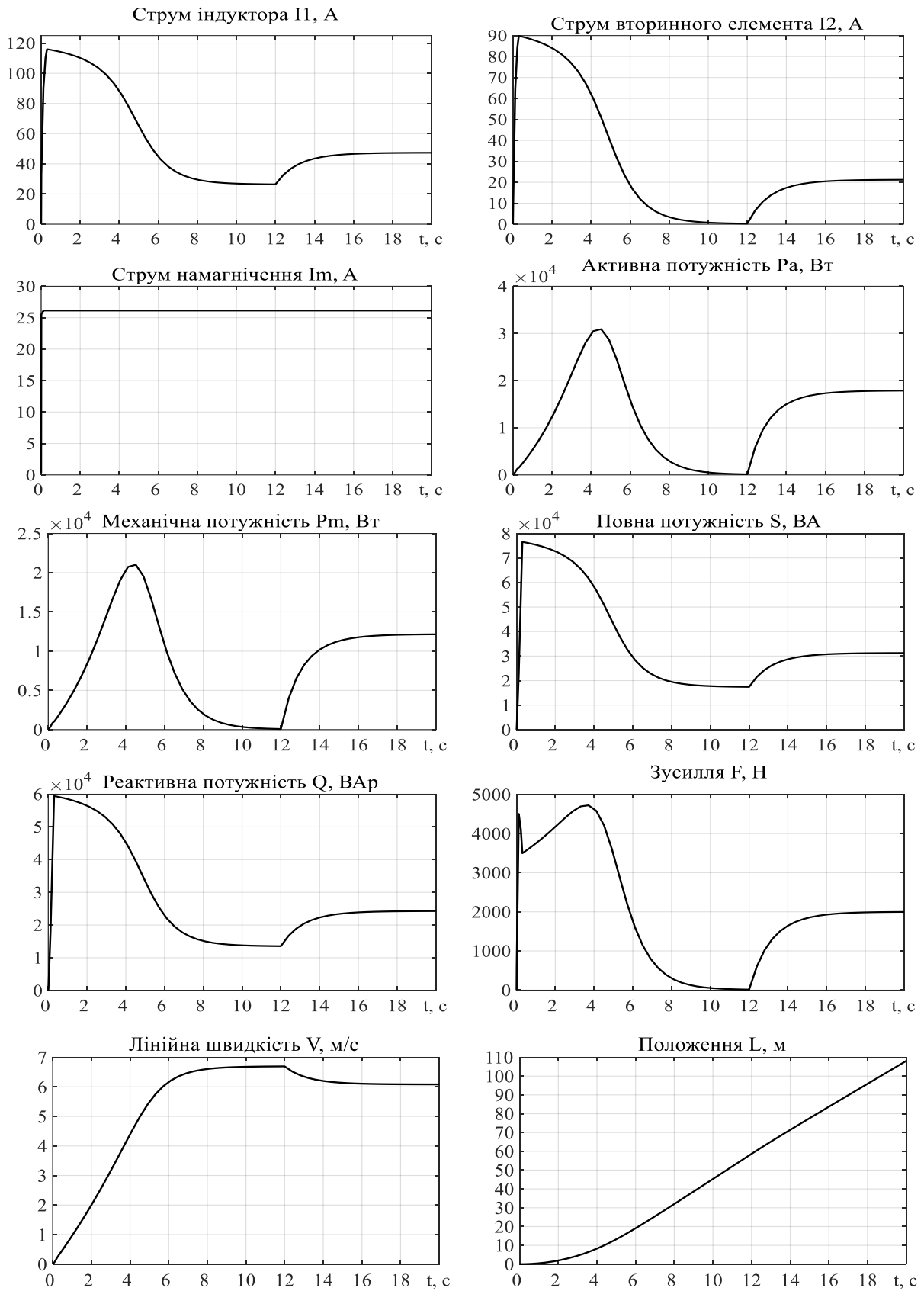


Рисунок 5.13 – Результати дослідження моделі лінійного асинхронного двигуна з використанням задатчика інтенсивності

Висновок по розділу 5

1. Розглянуто універсальну однофазну схему заміщення асинхронного двигуна, за якою знайдено параметри та виведено рівняння математичної моделі лінійного асинхронного двигуна. Складено нелінійну структурну схему системи ПЧ-ЛАД, в якій керування здійснюється по каналу напруги статора та частоти.
2. Показано можливість підвищення жорсткості механічних характеристик ЛАД за рахунок використання зворотного зв'язку по струму. На основі отриманих рівнянь побудовано замкнену систему ПЧ-ЛАД.
3. Виконано математичне моделювання замкненої і розімкнутої системи ЛАД при прямому пуску і при використанні задатчика інтенсивності. Аналізуючи отримані графіки, можна сказати, що використання зворотного зв'язку за струмом суттєво впливає на величину пускового та критичного моментів, а також жорсткість механічних характеристик. Замкнена система стає менш чутливішою до накидання навантаження ніж розімкнена, що є значною перевагою у виробництві де час доставки ватажу відіграє значну роль. Таким чином, розроблений електропривод з ЛАД відповідає завданню на проектування.

РОЗДІЛ 6 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТУАЛЬНОГО ВІЗКА

Для автоматизації технологічного процесу роботи транспортувального візка використовуються наступні датчики:

- датчики положення візка SQ1-SQ4;
- датчики наближення візка до перешкод SQ_A1 - SQ_A2;
- датчик контролю ваги на візку d1.

Автоматичний цикл роботи починається з натиснення кнопки Start. На перетворювач частоти подається команда збільшення швидкості, яке триває час t_1 . Після цього візок рухається на усталеній швидкості поки не досягне кінцевого вимикача SQ1. Коли надходить сигнал з SQ1 візок починає сповільнятися і остаточно гальмує біля вимикача SQ2. Після завантаження візка (спрацьовує тензодатчик d1) візок починає рухатися у зворотному напрямку: спершу візок розганяється протягом часу t_2 , працює на сталій швидкості, потім при досягненні SQ3 візок починає гальмувати і зупиняється при SQ4. Далі візок чекає поки його розвантажать і повторює цикл руху, якщо не було команди Stop.

Для запобігання зіткнення з перешкодами використовується система датчиків наближення. У разі виявлення об'єкта на небезпечній відстані відбувається автоматичне гальмування та активація звукової сигналізації.

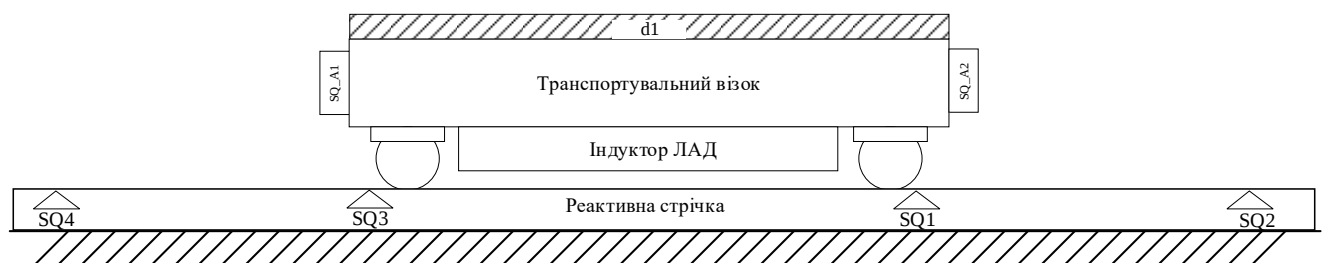


Рисунок 6.1 – Технологічна схема транспортувального візка

Прийmemo такі позначення вхідних і вихідних сигналів, а також сигналів таймерів, які необхідно розглядати як вхідні сигнали для графа переходів.

Вхідні сигнали: Start – команда "Пуск"; Stop – команда "Стоп"; t1 – t2 – сигнали таймерів затримок.

Вихідні сигнали: f1 – команда “дозволу роботи ” на рух вперед, f2 – команда на рух назад, f3 – команда на розгін, f4 – команда на сповільнення.

За умовами роботи виконаємо синтез методом графопереходів. Спочатку складаємо графоперехід (рис. 6.2).

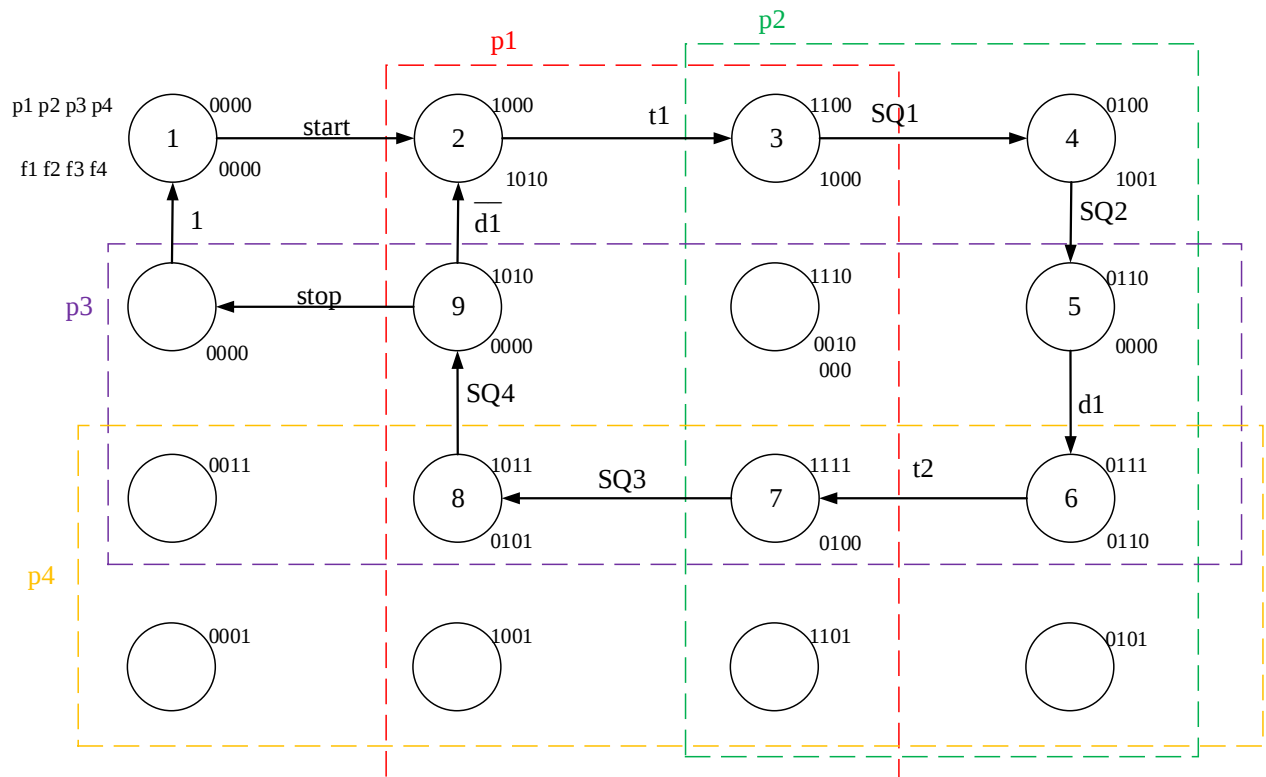


Рисунок 6.2 - Графоперехід

За отриманим графопереходом складаємо рівняння для встановлення та скидання тригерів, а також рівняння для вихідних змінних і таймерів.

$$S_{p1} = start \cdot \overline{p_2} \overline{p_3} \overline{p_4} + t_2 p_2 p_3 p_4$$

$$S_{p2} = t_1 p_1 \overline{p_3} \overline{p_4}$$

$$S_{p3} = SQ2 \cdot \overline{p_1} \overline{p_2} \overline{p_4}$$

$$S_{p4} = d_1 \overline{p_1} p_2 p_3$$

$$R_{p1} = stop \cdot \overline{p_2} p_3 \overline{p_4} + SQ1 \cdot p_1 \overline{p_3} \overline{p_4}$$

$$R_{p2} = SQ3 \cdot p_1 p_3 p_4$$

$$R_{p3} = \overline{p_1} \overline{p_2} \overline{p_4} + \overline{d_1} p_1 \overline{p_2} \overline{p_4}$$

$$R_{p4} = SQ4 \cdot p_1 \overline{p_2} p_3$$

$$T_1 = p_1 \overline{p_2} \overline{p_3} \overline{p_4}$$

$$T_2 = \overline{p_1} p_2 p_3 p_4$$

$$f_1 = p_1 \overline{p_3} \overline{p_4} + p_2 \overline{p_3} \overline{p_4}$$

$$f_2 = p_2 p_3 p_4 + p_1 p_3 p_4$$

$$f_3 = p_1 \overline{p_2} \overline{p_3} \overline{p_4} + \overline{p_1} p_2 p_3 p_4$$

$$f_4 = \overline{p_1} p_2 \overline{p_3} \overline{p_4} + p_1 \overline{p_2} p_3 p_4$$

Для зображення роботи заданого технологічного процесу виконаємо візуалізацію в середовищі CoDeSys. Для початку, складемо програму на мові LD. Лістинг програми відповідно до графопереходу наведений на рис. 6.3 – рис. 6.4.

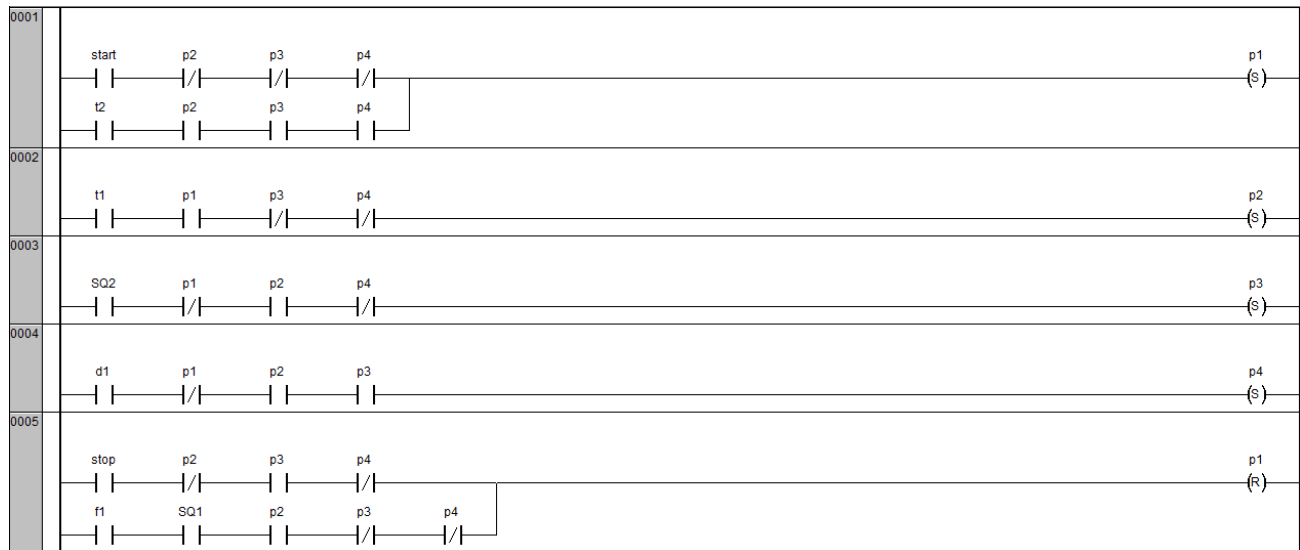


Рисунок 6.3 – Частина програми в CoDeSys

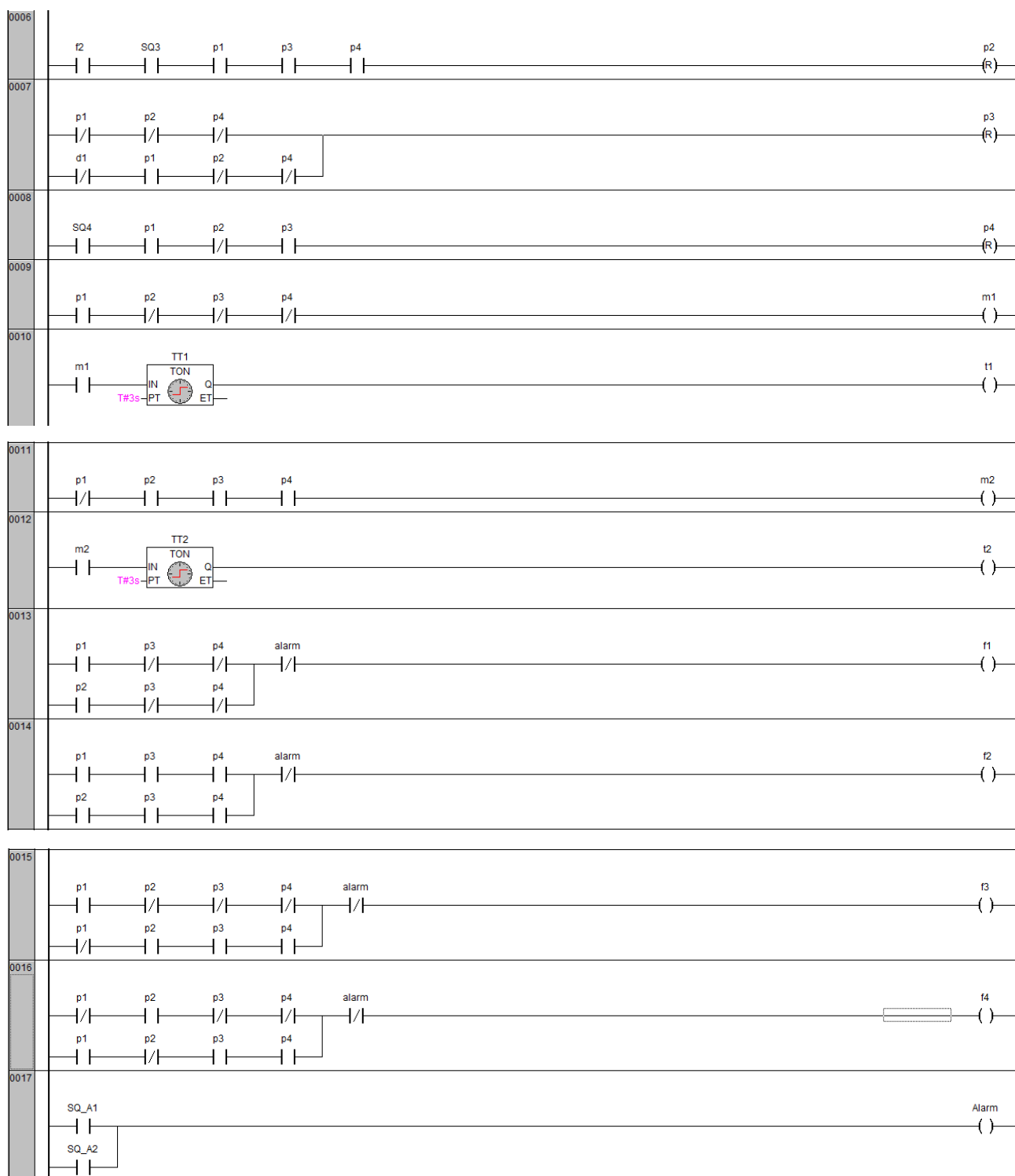


Рисунок 6.4 – Частина програми в CoDeSys

Початкове положення візка зображене на рис. 6.5. Коли оператор дає команду початку роботи кнопкою Start, візок починає розганятися до усталеної швидкості (рис. 6.6).

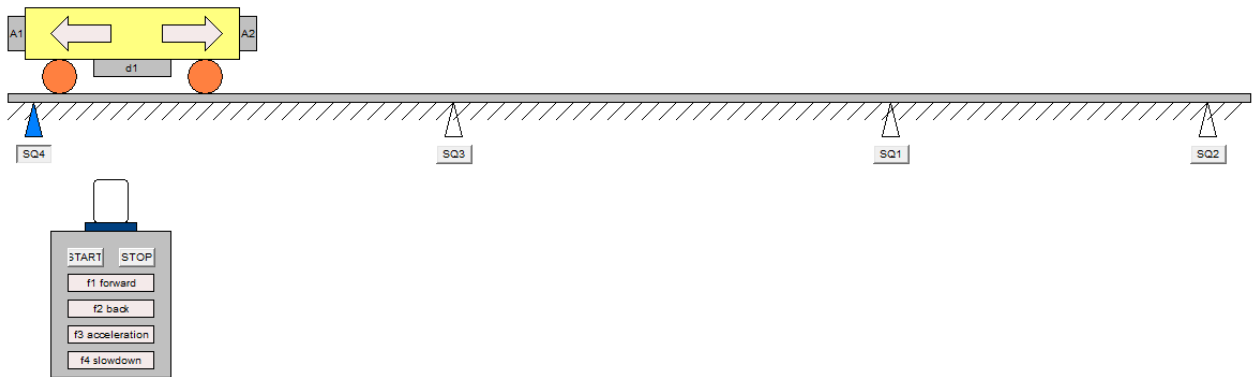


Рисунок 6.5 – Вихідний стан схеми

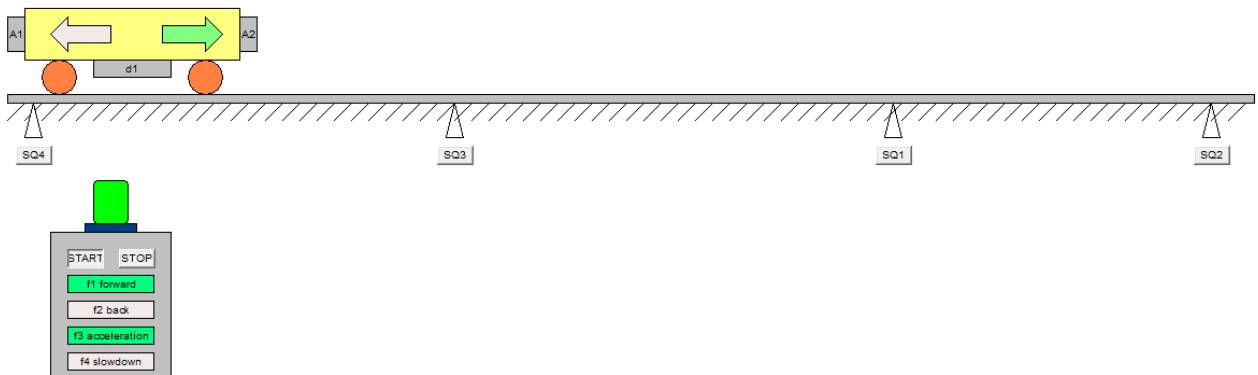


Рисунок 6.6 – Візуалізація технологічного процесу

Через час 5 секунд візок продовжує рухатися з усталеною швидкістю поки не досягне кінцевого вимикача SQ1 (рис. 6.7), після чого візок починає скидати швидкість (рис. 6.8).

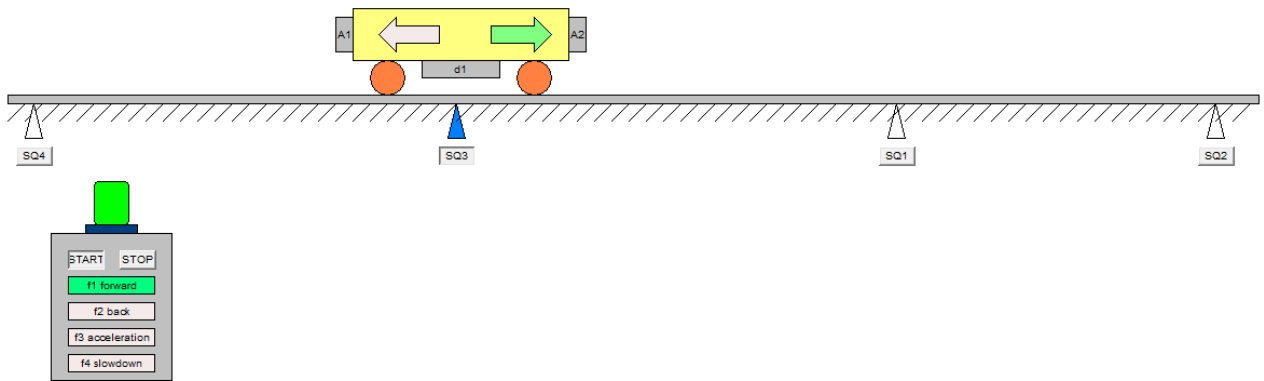


Рисунок 6.7 – Візуалізація технологічного процесу

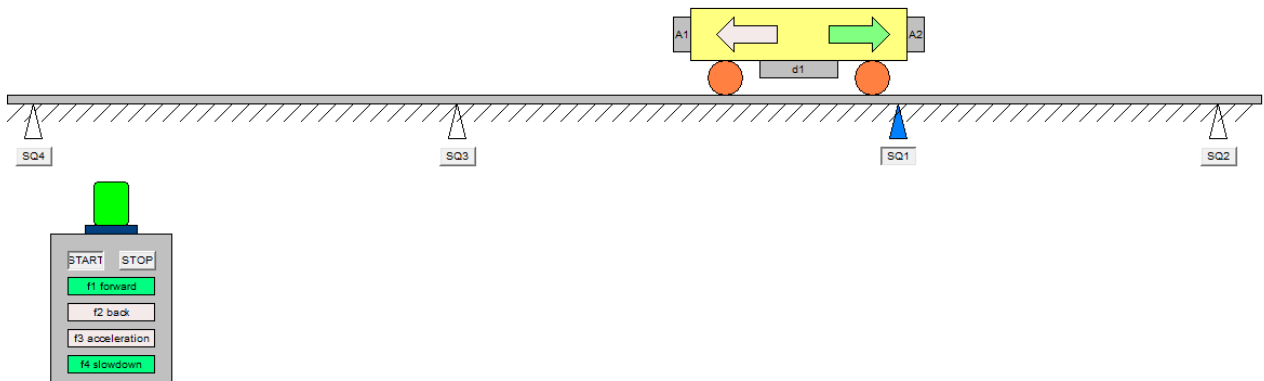


Рисунок 6.8 – Візуалізація технологічного процесу

Після того як візок досягнув кінцевого вимикача SQ2, він зупиняється (рис. 6.9), відбувається завантаження матеріалів для перевезення. Коли візок було завантажено до максимальної ваги, надходить сигнал від тензодатчика і візок починає рух у зворотному напрямку (рис. 6.10).

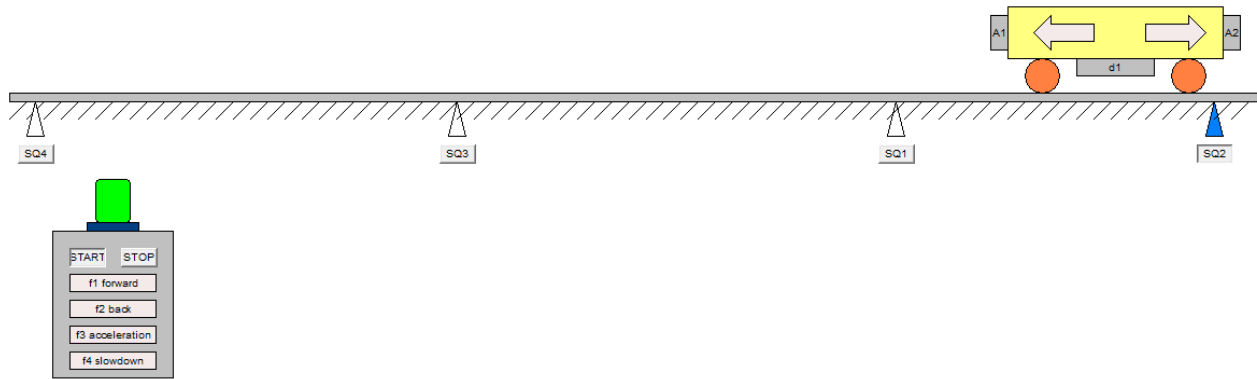


Рисунок 6.9 – Візуалізація технологічного процесу

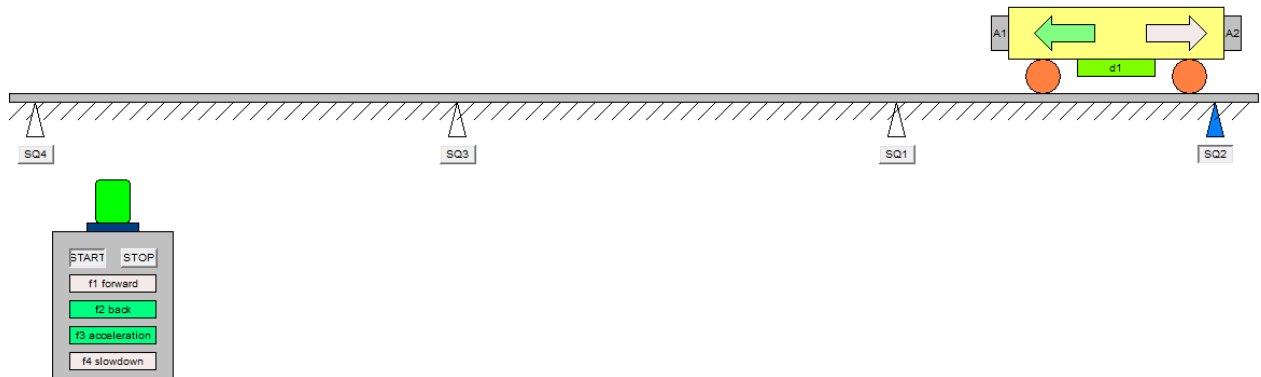


Рисунок 6.10 – Візуалізація технологічного процесу

Перші 5 секунд відбується розгін візка до усталеної швидкості, після чого візок рухається з постійною швидкістю поки не досягне вимикача SQ3 (рис. 6.11-6.12).

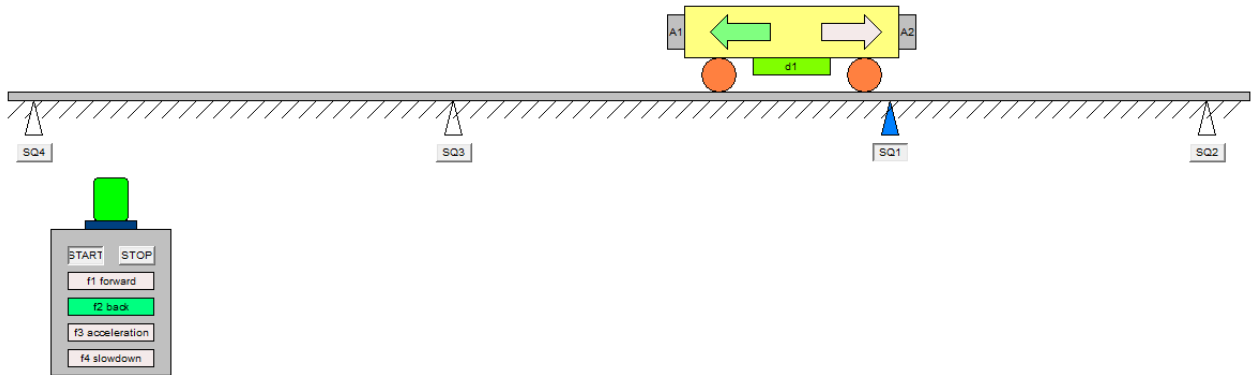


Рисунок 6.11 – Візуалізація технологічного процесу

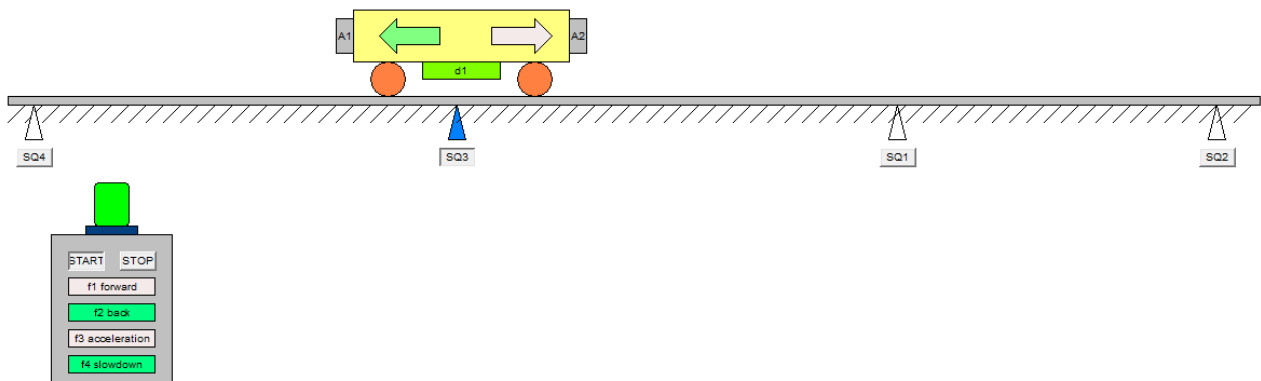


Рисунок 6.12 – Візуалізація технологічного процесу

Якщо натиснуто кнопку Stop, візок зупиняється у вихідному положенні. Якщо ні- візок чекає розвантаження і далі цикл руху повторюється (рис. 6.13 – 6.14).

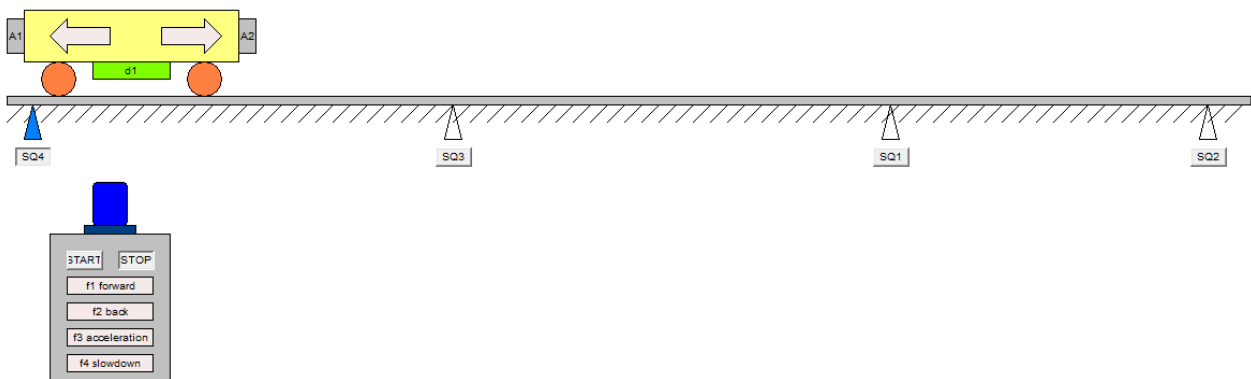


Рисунок 6.13 – Візуалізація технологічного процесу

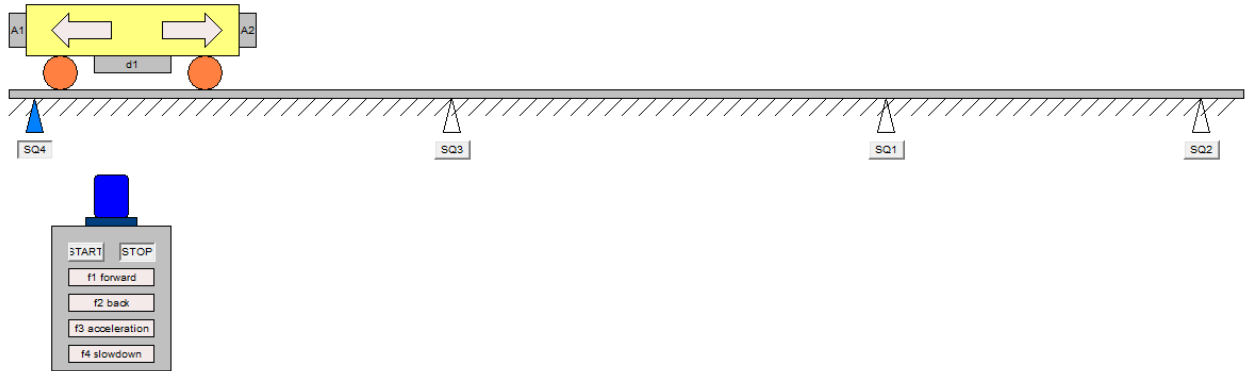


Рисунок 6.14 – Візуалізація технологічного процесу

Якщо під час руху візка на шляху виникає перешкода візок автоматично зупиняється на місці, вмикається світлова і звукова сигналізація (рис. 6.15 – 6.16). Коли перешкода зникає візок продовжує рух.

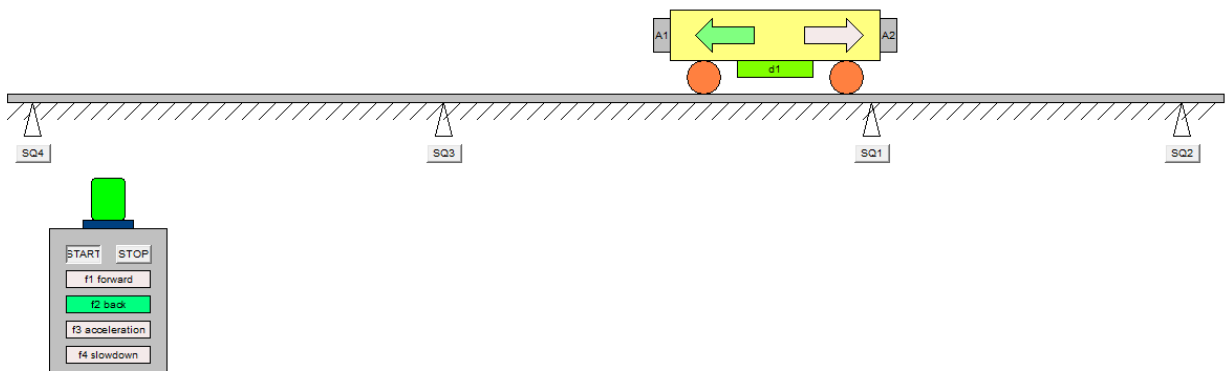


Рисунок 6.15 – Візуалізація технологічного процесу

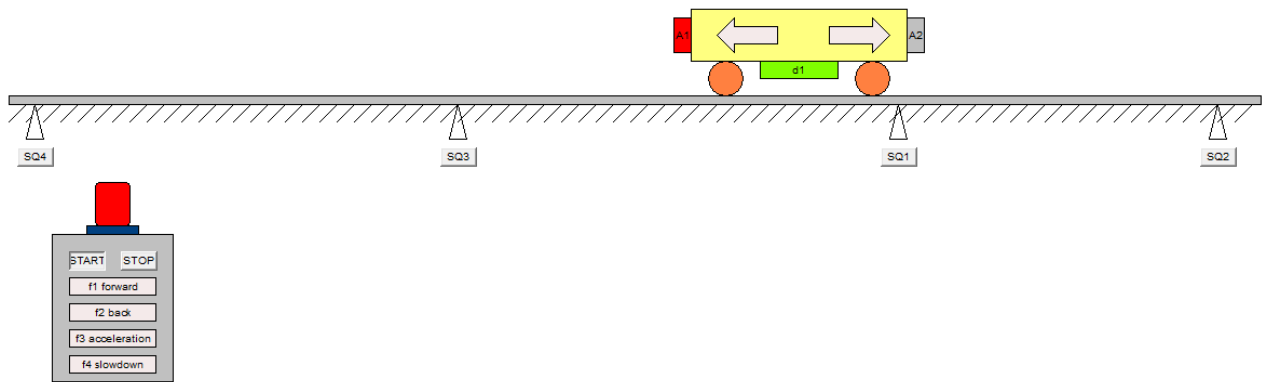


Рисунок 6.16 – Візуалізація технологічного процесу

Висновок до розділу 6

1. Визначено кількість датчиків, що необхідні для створення автоматизації лінійного електроприводу транспортувального візка. Складено цикл руху візка для забезпечення переміщення вантажу з одної точки в іншу. Керування візком здійснюється за допомогою кнопок на пульті управління, а також забезпечено контроль наближення до перешкод за допомогою кінцевих вимикачів та звукової сигналізації.

2. За визначеними умовами роботи складено графоперехід на основі якого записано рівняння спрацювання тригерів, вихідних змінних, а також таймерів. Використавши отриманні рівняння, складено програму на мові LD, та розроблено візуалізацію процесу переміщення візка в середовищі CoDeSys.

РОЗДІЛ 7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

У даному розділі проводиться маркетинговий аналіз стартап-проекту. Визначаються можливості ринкового впровадження та напрямків реалізації даного проекту [31].

7.1 Опис ідеї проекту

В табл. 7.1 наведено ідею проекту, напрямки застосування та вигоду, яку отримає замовник.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання лінійного асинхронного електроприводу у маневрових транспортувальних візках	Машинобудування	Перевезення продукції або матеріалів всередині одного цеху або між декількома цехами за короткий проміжок часу без суттєвого втручання оператора
	Переробна промисловість	
	Харчова промисловість	
	Лісова та деревообробна промисловість	
	Поліграфічна промисловість	

Табл. 7.1 дає цілісне уявлення щодо змісту ідеї, можливих потенційних ринків збуту, можливих потенційних клієнтів.

В табл. 7.2 наведено порівняння сильних і слабких сторін розробленої ідеї і потенційними конкурентами, а саме виробників транспортних візків HYDROLIDER [32], KAIJIA [33] та PERFT [34].

Таблиця 7.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характери- стики ідеї	Концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтра- льна сторона)	S (сильні)
		Мій проект	Hydrolider	Kaiji	PERFT			
1	Відсутність механічних передач	+						+
2	Мобільність переміщення	+		+	+		+	
3	Знижена участь оператора	+						+
4	Зменшені габарити	+						+
5	Зменшені витрати на обслуговування	+						+

7.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В табл. 7.3 виконано аудит технології реалізації проекту. Визначається за якою технологією виконується ідея, чи доступні ці технології тощо.

Аналізуючи табл. 7.3 можна сказати, що реалізація даного проекту можлива, за рахунок наявного бюджету, а також необхідного програмного забезпечення і ресурсів.

Таблиця 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізація	Наявність технології	Доступність технології
1	Виготовлення маневрових	Виготовлення рами візка	+	Доступна
2	транспортувальних візків з лінійним асинхронним електроприводом	Виготовлення сталевих коліс	+	Доступна
3		Проектування ЛАД	+	Доступна
4		Розрахунок силового обладнання	+	Доступна
5	Написання програми для логічного контролера	Написання програми для логічного контролера	+	Доступна
6	Підключення датчиків до контролера	Підключення датчиків до контролера	+	Доступна

7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В табл. 7.4 наведено аналіз попиту ринку. За попереднім оцінюванням можна сказати, що ринок є досить привабливим, адже технологія є новою і вона може зацікавити великі виробництва.

Таблиця 7.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	2	3
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од.	~60 млрд грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує

1	2	3
4	Наявність обмежень для входу	Висока конкуренція, високі інвестиції, строгі норми безпеки
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	10

В табл. 7.5 наведено аналіз цільових груп покупців. Розроблена ідея може бути корисною і вигідною для виробництв і компаній, що займаються промисловістю.

Таблиця 7.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Збільшення маневреності, мобільність, зменшення роботи оператора	Машинобудування, переробна промисловість, харчова промисловість, лісова та деревообробна промисловість, поліграфічна промисловість	Вантажопідйомність, зміна кількості датчиків, зміна швидкості	Великий термін служби, доступне та швидке обслуговування, доступність обладнання для ремонту,

В табл. 7.6 – 7.7 наведено аналіз факторів загроз і можливостей, які впливають на впровадження даного проекту.

Таблиця 7.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція з іншими виробниками	Новим виробникам складно увійти в ринок, адже у інших компаній вже є клієнтська база	Запустити рекламну компанію, перший час зменшити ціни на обладнання
2	Залежність від імпорتنих компонентів	Основні компоненти здебільшого замовляються у закордонних виробників, зміна валютного курсу впливає на собівартість	Перехід на вітчизняне обладнання, співпраця з компаніями які мають філії в Україні

Таблиця 7.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростаючий попит на автоматизацію	Підприємства масово переходять до автоматизації електромеханічних систем	Впровадження рекламної кампанії задля поширення переваг застосування автоматизованих систем
2	Гнучкість технологій	Маневрений візок може застосовуватись в різних умовах і сферах	Можлива розробка проектів під конкретного клієнта

В табл. 7.8 наведено аналіз пропозицій, визначаються загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 7.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції - монополістична	Значна кількість виробників із унікальною продукцією.	Створити можливість варіювання характеристик продукції під окремого клієнта.
За рівнем конкурентної боротьби - всесвітній	Виготовленням схожої продукції займаються окремі компанії по всьому світу	Реклама, можливо зосереджена локально щоб зменшити затрати на доставку
За галузевою ознакою - міжгалузева	Можливе використання в багатьох галузях	Розробка універсальних продуктів або декількох моделей, щоб підходили для різних потреб
Конкуренція за видами товарів – товарно-видова	Присутня конкуренція між товарами одного виду, які відрізняються характеристиками, ціною, сервісом тощо.	Розширення варіацій товару
За характером конкурентних переваг - нецінова	Не лише ціна визначає конкуренцію, а й додаткові характеристики як надійність, обслуговування, якість окремих складових	Враховувати строки виготовлення, доступність сервісу тощо
За інтенсивністю - немарочна	Товарний знак або бренд не є основною перевагою, продукт обирають за характеристиками	Створити каталог з наявними моделями і описом

За табл. 7.8 і використовуючи модель 5 сил М. Портера [31] проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 7.9). Ситуація в галузі досить складна. Є декілька великих компаній-конкурентів, однак вони не виготовляють нові протопити транспортувальних візків, а концентруються на

продажі раніше розроблених моделей і інших продуктів. Тож вихід на ринок є цілком можливим, і досить конкурентоспроможним.

Таблиця 7.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Hydrolider, Kaijia, PERFT, КЗПТО	Серед бар'єрів входження в ринок: складність розробки електроприводу, високі початкові інвестиції, проблеми з закупівлею комплектуючих, лояльність клієнтів до існуючих виробників	Ціна на комплектуючі від імпортерів постачальників залежить від курсу валюти, ціноутворення продукції залежить від ціни комплектуючих	Віддають перевагу виробникам з широким асортиментом і підприємствам з якими співпрацювали раніше	Модернізація деяких складових, універсальність
Висновок:	Досить висока конкуренція, зважаючи на потужних гравців на ринку	Є можливість виходу на ринок.	Умови роботи на ринку залежать від цін постачальників	Умови роботи залежать від побажань клієнтів з приводу алгоритму роботи	Збільшення конкуренції при впровадженні товарів-замінників, можливе зниження цін

В табл. 7.10 наведено перелік факторів конкурентоспроможності даного проекту.

Таблиця 7.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Впровадження лінійного електроприводу	Зменшення механічних передач зменшує габарити продукта та збільшує термін служби
2	Перехід на автономне живлення	Збільшується мобільність візка за рахунок меншої кількості кабелів
3	Створення програмного забезпечення	Участь оператора необхідна лише для запуску і вимкнення обладнання

В табл. 7.11 наведено аналіз сильних та слабких сторін даної ідеї із виробником транспортувальних візків Hydrolider.

Таблиця 7.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Hydrolider						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Впровадження лінійного електроприводу	19							+
2	Перехід на автономне живлення	15						+	
3	Створення програмного забезпечення	15						+	

В табл. 7.12 наведено SWOT- аналіз стартап-проекту, тобто аналіз сильних та слабких сторін, а також загроз та можливостей. Ринкові загрози та можливості – це складені на основі дослідження ринку прогнози які можуть впливати з часом на продажі товару. На основі даних досліджень розробляється альтернатива ринкової поведінки – перелік заходів для виведення стартап проекту на ринок (табл. 7.13).

Таблиця 7.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Інноваційність, автоматизація, мобільність, унікальна технологія	Слабкі сторони: Високі початкові інвестиції, відсутність довіри клієнтів, залежність від постачальників
Можливості: Експорт, ріст попиту серед українських підприємств	Загрози: Економічні ризики, високі вимоги до безпеки і сертифікації

Таблиця 7.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Розробка декількох лінійок продукції: стандарт, бюджет, преміум	Велика	2-3 тижні
2	Затвердитися на локальному ринку	Велика	5-6 місяці
3	Зменшити залежність від імпорту	Середня	2-3 місяці

В результаті аналізу альтернатив ринкового впровадження обирає найбільш ймовірний варіант, а також такий що потребує найменших строків реалізації. В даному випадку, найкращий варіант це створити лінійку продукції. Такий варіант є найбільш швидким, та має більшу ймовірність гарного сприйняття покупцями.

7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

В табл. 7.14 наведено перелік цільових груп покупців.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 7.15). Була обрана стратегія диференціації, так як наш продукт має ряд відмінностей від товарів конкурентів. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування [31].

Таблиця 7.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Машинобудування	Висока	1 шт. в місяць	Висока	Середня
2	Харчова промисловість	Середня	1 шт. в місяць	Висока	Невисока
3	Деревообробна промисловість	Середня	1 шт. в 3 місяців	Висока	Середня
4	Поліграфічна промисловість	Висока	1 шт. в місяць	Висока	Середня
Які цільові групи обрано: всі групи					

Таблиця 7.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Розповсюдження за рахунок відмінних від інших виробників властивостей продукту	Демонстрація переваг продукту на виставках	Відданість клієнтів перешкоджає виходу на ринок нових гравців. Відмінні властивості товару і прихильність клієнтів захищають від товарів-замінників.	Диференціації

Наступним кроком є формування стратегії конкурентної поведінки (табл. 7.16). Було обрано стратегії наслідування лідера. Стратегія наслідування передбачає, що підприємство займе частку ринку яку з якихось причин не може охопити лідер, при цьому випускаючи товари-аналоги. Також основною метою такої стратегії є концентрація на прибутковості, і не на простому зростанні об'ємів продажу.

Таблиця 7.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Так	Шукати нових споживачів	Ні	Наслідування лідера

В табл. 7.17 розроблено стратегії позиціонування, що полягає у формуванні ринкової пропозиції, за якими споживачі ідентифікуватимуть проект.

Таблиця 7.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
Точність позиціонування, зменшені габарити, збільшена мобільність пересування	Диференціація	Наслідування лідера	Надійність, точність

7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

В табл. 7.18 результати попереднього аналізу конкурентноспроможності товару, який формує маркетингову концепцію товару, який отримує споживач.

Таблиця 7.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Впровадження нової технології використання лінійного асинхронного електроприводу	Перехід на автономне живлення, збільшення маневреності за рахунок меншої кількості кабелів	Замість живлення від мережі використовується живлення від акумуляторної батареї
	Зменшення кількості механічних передач	Використання ЛАД дозволяє створювати поступальних рух без використання механічних передач

Наступним кроком було визначено цінові межі на потенційний товар. Було проаналізовано ціни на товари конкурентів, а також рівень доходів цільових груп споживачів (табл. 7.19).

Таблиця 7.19 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
60000-90000	50000-70000	Високий	60000-100000

В табл. 7.20 розроблено оптимальну систему збуту. Було обрано систему збуту яка включає постачальника, визначено його задачі.

Таблиця 7.20 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Звичайна	Аналіз ринку, маркетингові комунікації, організація продажів і доставки	Двох-рівневий: виробник – постачальник - покупець	Традиційна

Останнім кроком є розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 7.21).

Таблиця 7.21 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Звичайна	Телефонний зв'язок, соціальні мережі	Довести переваги застосування лінійного електроприводу	Пояснити покупцям чому наш продукт є ефективним, пояснити застосування нових технологій, вказати основні переваги використання лінійного електроприводу та акумуляторної батареї

Висновок по розділу 7

1. Виконано розроблення стартап-проекту маневрового транспортувального візка, який базується на впровадженні технології використання лінійного асинхронного електроприводу.

2. Проаналізовано ринок виробників транспортувальних візків та визначено основних конкурентів. Встановлено, що на ринку України присутні

декілька основних виробників, однак вони не сконцентровані конкретно на виготовленні транспортувальних візків, тож вхід в ринок може виявитись досить конкурентноспроможним.

3. Проведено аналіз переваг і недоліків проекту, загроз та можливостей що постають перед виробником в ході введення товару на ринок, визначено цільові групи покупців, розроблено концепцію рекламного звернення тощо. Отримані результати демонструють, що впровадження стартап проекту є економічно та технічно доцільним, а належне маркетингове супроводження забезпечать його розвиток на ринку.

ВИСНОВКИ

1. В даній магістерській дисертації було виконано аналітичний огляд лінійних електроприводів. Насамперед, визначено як утворюється лінійний двигун, як приводиться в рух, розглянуто його різновиди, переваги та недоліки застосування, а також сфери використання лінійних електроприводів. Для дослідження було розглянуто прототип транспортувального візка від українського виробника, розглянуто його особливості та технічні характеристики. В якості модернізації було запропоновано заміну обертового електроприводу даного візка на лінійний асинхронний, а також заміну живлення від мережі на автономне.

2. На основі вихідних даних виконано розрахунок тягового зусилля транспортувального візка з лінійним електроприводом. Визначено, що технічні характеристики лінійного асинхронного двигуна знаходяться подібно до обертового двигуна, тож за схемами заміщення асинхронного двигуна розраховано параметри двигуна, що проектується. Виконано побудову механічної характеристики двигуна.

3. Обрано перетворювач частоти від виробника компанії АВВ, за допомогою якого здійснюється керування швидкістю лінійного двигуна. Крім того, обрано автоматичний вимикач від виробника Schneider Electric, який буде здійснювати захист обладнання від перевантажень та коротких замикань.

4. Виконано математичне моделювання спроектованої системи лінійного електроприводу. Складено нелінійну структурну схему системи ПЧ-ЛАД, в якій керування здійснюється по каналам напруги статора та частоти. Розглянуто можливість підвищення жорсткості механічних характеристик ЛАД, яка базуються на використанні зворотного зв'язку за струмом. На основі отриманих рівнянь побудовано замкнену систему ПЧ-ЛАД. Виконано математичне моделювання замкненої і розімкнутої системи ЛАД при прямому пуску і при використанні задатчика інтенсивності. Аналізуючи отримані графіки, можна сказати, що

використання зворотного зв'язку за струмом суттєво впливає на величину пускового та критичного моментів, а також підвищує жорсткість механічних характеристик. Замкнена система стає менш чутливою до накидання навантаження ніж розімкнена, що є значною перевагою у виробництві де час доставки ватажу відіграє значну роль. Таким чином, розроблений електропривод з ЛАД відповідає завданню на проектування.

5. Виконано автоматизацію транспортувального візка, що включає розробку умов роботи візка, виведення рівнянь на основі синтезу методом RS-тригерів та складення програми для візуалізації процесу роботи візка. Визначено, що для реалізації автоматизації роботи транспортувального візка, окрім самого візка, індуктора ЛАД та реактивної стрічки необхідно забезпечити систему пультом керування з кнопками початку та зупинки роботи візка, датчиками наближення візка до перешкод та датчиками що подаватимуть команди зупинки, гальмування та прискорення на перетворювач частоти.

6. Виконано розробку стартап-проекту маневрового транспортувального візка, проаналізовано ринок виробників транспортувальних візків та визначено основних конкурентів. Проведено аналіз переваг і недоліків проекту, загроз та можливостей що постають перед виробником в ході введення товару на ринок, визначено цільові групи покупців, розроблено концепцію рекламного звернення тощо. Отримані результати демонструють, що впровадження стартап-проекту є економічно та технічно доцільним, а належне маркетингове супроводження забезпечить його розвиток на ринку.

7. Отримані в ході виконання магістерської дисертації результати свідчать про можливість заміни обертового електроприводу маневрових візків лінійним. Перевірено, що такий підхід забезпечує спрощення конструкції, гнучкість переміщення, адже реактивну стрічку можна прокласти в тих місцях, де необхідно. Відповідно спрощується автоматизація процесу, так як потрібна менша кількість

датчиків для керування переміщенням візка, а також підвищується надійність і точності.

На основі отриманих результатів можна заключити, що завдання на магістерську дисертацію виконане в повному обсязі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lian K.-Y., Hung Ch.-Y., Fu L.-Ch. Linear Induction Motor Control: An Approach of Virtual-Desired-Variable Synthesis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 1066-1074, 2005.
2. Sinisterra A. J. Modeling of linear induction machines for analysis and control. Boca Raton, FL: Florida Atlantic University ProQuest Dissertations & Theses, 2011. 24p.
3. Murty V. S., Jain Sh. K., Ojha A. Development of single linear induction motor for high-speed transit system. *Soft Computing*, Vol. 28, No. 3, pp. 1-16, 2023.
4. Теряєв В.І., Островерхов М.О. Уточнена математична модель лінійного асинхронного двигуна. - Доповіді Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2009. – с. 100-103.
5. Теряєв В.І., Чернота В.Г. Електропривод з лінійним кроковим двигуном. Міжнародний науково-технічний журнал “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики”. Київ, 2017. С. 443-447.
URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/131244/127090>
6. Теряєв В.І., Довбик А.Ю. Особливості математичного моделювання та керування багатосекційним лінійним асинхронним двигуном, Наук. Праці ВНТУ, вип. 4, квіт. 2021, URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/621>
7. Теряєв В.І., Островерхов М.О. Алгоритм скалярного керування лінійним асинхронним двигуном із компенсацією впливу кінцевих ефектів. - Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково – технічний журнал. - Київ: «Техніка», 2011. - с. 32-34.
8. Павленко Т. П., Габльовська Н. Я., Кубієвич Ю. А. Особливість використання лінійних електродвигунів та методи розрахунку параметрів. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, Vol. 2, No. 4, pp. 58–70, 2023. DOI: 10.46299/j.isjea.20230204.07.

9. Marcus L. China debuts world's fastest train. CNN. URL: <https://edition.cnn.com/travel/article/china-fastest-maglev-train-intl-hnk>
10. Palka R., Woronowicz K. Linear Induction Motors in Transportation Systems. *Performance of Induction Machines*, Vol. 14, No. 9, pp. 25-49, 2021.
11. Чумак, В. В. Математичне моделювання лінійного двигуна для сепаратора лому кольорових металів / В. В. Чумак, М. А. Коваленко, І. В. Ткачук // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2019. – № 2 (56). – С. 99–109.
12. Gieras J. F. Linear electric motors in aircraft technology: an overview. Int. Symp. on Linear Drives for Ind. Appl. LDIA' 09, Seoul, S. Korea, 2009.
13. Linear-motor drives for machine tools. *Union Carbide*. URL: <https://scispace.com/pdf/linear-motor-drives-for-machine-tools-4a48y8q5qf.pdf>
14. Precision and Efficiency. *Eidal*. URL: http://seidaltech.com/en/?list_28/52.html
15. Які характеристики та переваги лінійних двигунів? *FUYU*. URL: <https://www.fuyumotion.com/uk/news/what-are-the-characteristics-and-advantages-of-linear-motors/>
16. Linear Motor: Technology, Advantages, and Applications in Industry. *Sinadrives*. URL: <https://sinadrives.com/en/linear-motor-technology-advantages-and-applications-in-industry/>
17. Теряєв, В., Довбик, А. і Зайченко, О. 2023. Особливості математичного моделювання лінійного асинхронного двигуна з короткими індуктором і вторинним елементом. Технічна електродинаміка. 6 (Лис 2023), 023. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.06.023> (SCOPUS)
18. Теряєв В.І., Островерхов М.О. Частотне керування лінійним асинхронним двигуном. - Вісник Кременчуцького державного університету ім. М.Остроградського. Випуск 3/2010 (62), ч. 1, с. 45 - 48.
19. Теряєв В.І., Островерхов М.О. Уточнена математична модель лінійного асинхронного двигуна. - Доповіді Міжнародної науково-технічної конференції

молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2009. – с. 100-103.

20. Транспортний візок. *Завод транспортних візків Dowell*. URL: <https://ua.cranefty.com/transfer-cart-supplier-dowellcrane-company/transfer-carts-factory.html>

21. Візок маневровий. *КЗПТО*. URL: <https://kzpto.com.ua/uk/vizok/>

22. Автономний маневровий візок КЗПТО: ефективне рішення для виробничої логістики. *КЗПТО*. URL: <https://kzpto.com.ua/uk/avtonomnyy-manevrovyu-vizok/>

23. Александров М.П. Підйомно-транспортні машини: навч. посіб. / Москва: Висш. шк., 1985. 520 с.

24. Теряєв В.І., Довбик А.Ю. Лінійний електропривод вагонетки атракціону. Матеріали Науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (ВНТУ-2020)», Вінниця, 2020. [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/10385>

25. В.І. Теряєв, А.Ю. Довбик. Особливості математичного моделювання та керування багатосекційним лінійним асинхронним двигуном, Наук. Праці ВНТУ, вип. 4, квіт. 2021, URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/621>

26. V. Teriaiev and A. Dovbyk. Special considerations for the mathematical modeling and control of the multisectional asynchronous motor, Scientific Works of VNTU, No 4, Jul. 2021. URL: <https://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/581>

27. Перетворювач частоти ACS880-01-115A-2. *ABB*. URL: <https://www.abb.com/global/en/products/3abd0000137241>

28. Автоматичний вимикач C60H-DC. *Schneider Electric*. URL: <https://sal0.li/2aD674a>

29. Теряєв В.І. Методика розрахунку параметрів лінійного асинхронного електродвигуна. Авторське право на науковий твір, свідоцтво №85028, дата реєстрації 30.01.2019 р.

30. Teriaiev, V., Dovbyk, A., Kornienko, V., Pechenik, M., & Buryan, S. Generalized mathematical model of a linear induction motor. IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2022 - Proceedings, 741-745, DOI:10.1109/ELNANO54667.2022.9927095

31. 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.

32. Візок маневровий, ручний для малих і габаритних вантажів. *HYDROLIDER*. URL: https://hydrolider.com.ua/ua/p2115464865-telezhka-manevrova-ya-ruchnaya.html?srsId=AfmBOornoBIUD9P7PtwkfzKtQ1SF9paFgRVRAmZlgt3yjf3h3KqbV_6

33. Маневровий візок для обробки матеріалів. *Kaijia*. URL: <https://ua.kaijia-crane.com/electric-flat-car/material-handling-transfer-trolley.html>

34. Електричний маневровий візок для переміщення важкої техніки. *PERFT*. URL: <https://ua.carretonnave.com/trackless-transfer-cart/battery-powered-transfer-trolley/electric-transfer-trolley-to-move-heavy.html>