

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)
Інженерії машин, споруд та технологій
(назва факультету)
Автомобілів
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(назва освітнього ступеня)
на тему: Розробка концепції транспортного засобу з електричним приводом на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МАМ-62
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

	<u>Кошулінський М.Р.</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)
Керівник	<u>Матвіїшин А.Й.</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	<u>Хорошун Р.В.</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)
Зав. кафедри	<u>Цьонь О.П</u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)
Рецензент	<u></u>
	(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«12» листопада 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Кошулінському Максиму Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка концепції транспортного засобу з електричним приводом на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами

Керівник роботи Матвійшин Анатолій Йосипович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 12 » листопада 2024 року № 4/7-1088

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики електроприводу електричного автомобіля.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.

4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Функціональна схема електромобіля з реактивними електродвигунами – 1А1.

Класифікація тягових електродвигунів електро- і гібридних авто – 2А1.

Функціональна схема синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами – 1А1.

Характеристика основних вузлів електромобіля з встановленими синхронними реактивними двигунами – 2А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці			
Безпека в надзвичайних ситуаціях			

7. Дата видачі
завдання

12.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	25.11.2024	
2	Технологічний розділ	04.12.2024	
3	Конструкторський розділ	11.12.2024	
4	Науково-дослідний розділ	18.12.2024	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.12.2024	
6	Оформлення графічної частини	20.12.2024	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	27.12.2024	

Студент

(підпис)

Кошулінський М.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Матвійшин А.Й.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Розробка концепції транспортного засобу з електричним приводом на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами».

Метою кваліфікаційної роботи магістра є розробка концепції транспортного засобу з електричним приводом на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами для підвищення енергоефективності, надійності та екологічності транспортних засобів.

Основні завдання, які необхідно вирішити у роботі:

- проаналізувати сучасний стан розвитку електромобільності у світі та в Україні, визначити ключові тенденції та виклики;
- здійснити технічний аналіз електро- та гібридних транспортних засобів, порівняти їх технічні характеристики;
- розробити класифікацію та провести порівняльний аналіз тягових двигунів, приділивши особливу увагу синхронним реактивним двигунам з постійними магнітами;
- розробити принципову концепцію електроприводу на базі синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами та виконати розрахунки основних параметрів;
- розробити модель електроприводу, що забезпечить ефективну роботу транспортного засобу;
- сформулювати рекомендації щодо впровадження розробленої концепції в умовах сучасного виробництва.

Перший розділ «Загально-технічний розділ» включає в себе аналіз сучасного стану галузі транспортних засобів з електричним приводом, тенденцій розвитку електромобільності у світі та в Україні, а також формування висновків і постановку завдання на виконання магістерської роботи.

Другий розділ кваліфікаційної роботи магістра «Технологічний розділ» містить аналіз технічних характеристик електричних та гібридних транспортних

засобів, а також класифікацію та порівняння різних типів тягових двигунів, зокрема синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи магістра «Конструкторський розділ» проведено дослідження принципу роботи синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами та виконано розрахунок основних параметрів електромобіля з використанням таких двигунів.

Четвертий розділ кваліфікаційної роботи магістра «Науково-дослідний розділ» містить розробку моделі електроприводу на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами, що дозволяє підвищити енергоефективність транспортного засобу.

У розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» розглянуто основні принципи та функції управління охороною праці на виробництві, а також основні положення концепції захисту населення і території у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 73 сторінки формату А4 та 6 аркушів формату А1 графічної частини і 6 сторінок додатків.

Ключові слова: гібридний автомобіль, синхронні реактивні двигуни, математична модель, режими роботи приводу, тяговий електродвигун.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Огляд сучасного стану галузі транспортних засобів з електричним приводом	9
1.2 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу	17
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	18
2.1 Технічні характеристики електро- і гібридних транспортних засобів	18
2.2 Класифікація тягових двигунів електромобілів	26
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	39
3.1 Дослідження принципу роботи синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами	39
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	47
4.1 Розробка математичної моделі електромобіля з встановленими синхронними реактивними двигунами	47
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
5.1 Системний підхід до управління охороною праці на виробництві	58
5.2 Система захисту населення і територій в умовах надзвичайних ситуацій	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
БІБЛІОГРАФІЯ	71
ДОДАТКИ	74

ВСТУП

В останні десятиліття електрифікація колісного транспорту стала одним із ключових напрямків розвитку світової автомобільної індустрії. Основними причинами цього є необхідність зменшення залежності від викопного палива, зниження викидів парникових газів і забруднення навколишнього середовища, а також підвищення енергоефективності транспортних засобів. Зростання попиту на електромобілі зумовлено також значними технологічними досягненнями у сфері акумуляторних систем, електродвигунів та систем управління, що робить електромобілі більш доступними та практичними для широкого кола споживачів. У світовій економіці спостерігається значне зростання інвестицій у виробництво електромобілів, що також стимулює їх розвиток в Україні.

Зважаючи на актуальність зменшення негативного впливу транспорту на довкілля та необхідність підвищення енергоефективності, вибір теми розробки транспортного засобу з електричним приводом на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами є цілком обґрунтованим. Така структура роботи дозволяє послідовно аналізувати технічні, технологічні, конструктивні й науково-дослідні аспекти цієї проблематики, а також врахувати питання охорони праці та безпеки в умовах надзвичайних ситуацій.

Метою роботи є розробка концепції транспортного засобу з електричним приводом на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами для забезпечення підвищеної енергоефективності, надійності та екологічності.

Задачі, які необхідно вирішити для досягнення мети:

1. Провести аналіз сучасного стану галузі транспортних засобів з електричним приводом у світі та в Україні.
2. Вивчити технічні характеристики електро- і гібридних транспортних засобів.
3. Розробити класифікацію тягових двигунів, зокрема дослідити синхронні реактивні двигуни з постійними магнітами.
4. Виконати розрахунок параметрів електромобіля з використанням синхронних реактивних двигунів.

5. Розробити модель електроприводу на базі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами.
6. Надати рекомендації щодо впровадження концепції у виробничий процес.
7. Розглянути основні принципи охорони праці та забезпечення безпеки у разі надзвичайних ситуацій.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Огляд сучасного стану галузі транспортних засобів з електричним приводом

Електромобільність стрімко розвивається у світі, стаючи одним із ключових напрямків трансформації транспортної галузі. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA) [1], на кінець 2023 року кількість електромобілів на дорогах перевищила 30 мільйонів одиниць, що майже втричі більше порівняно з 2019 роком. Основною причиною цього є посилення екологічних вимог та необхідність скорочення викидів парникових газів, що спричиняють глобальне потепління. Транспорт є одним із найбільших джерел викидів CO₂, і перехід на електромобілі є важливим кроком для досягнення цілей Паризької кліматичної угоди.

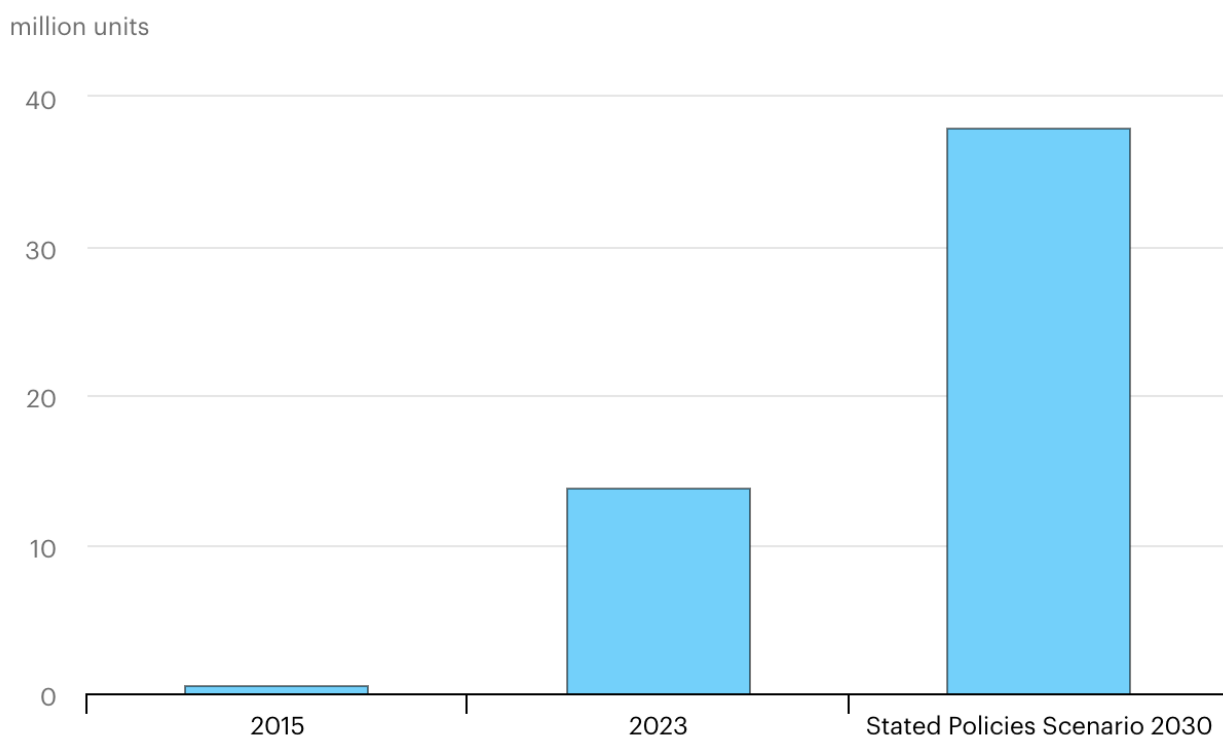


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни кількості продажів електромобілів у світі

Ще одним важливим фактором є технологічний прогрес, що дозволив значно покращити характеристики електромобілів. Сучасні моделі забезпечують

запас ходу до 500-700 км на одному заряді, що майже дорівнює характеристикам автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Крім того, зниження вартості літій-іонних акумуляторів у п'ять разів за останнє десятиліття зробило електромобілі більш доступними для споживачів [2].

Різні країни світу активно сприяють розвитку електромобільності шляхом впровадження державних програм, податкових пільг і стимулів. Наприклад, у Норвегії, яка є світовим лідером за часткою електромобілів на душу населення, на кінець 2023 року 80% усіх нових проданих автомобілів були електричними. Це стало можливим завдяки звільненню електромобілів від податку на додану вартість (ПДВ), дорожніх зборів та дозволу на використання смуг для громадського транспорту.

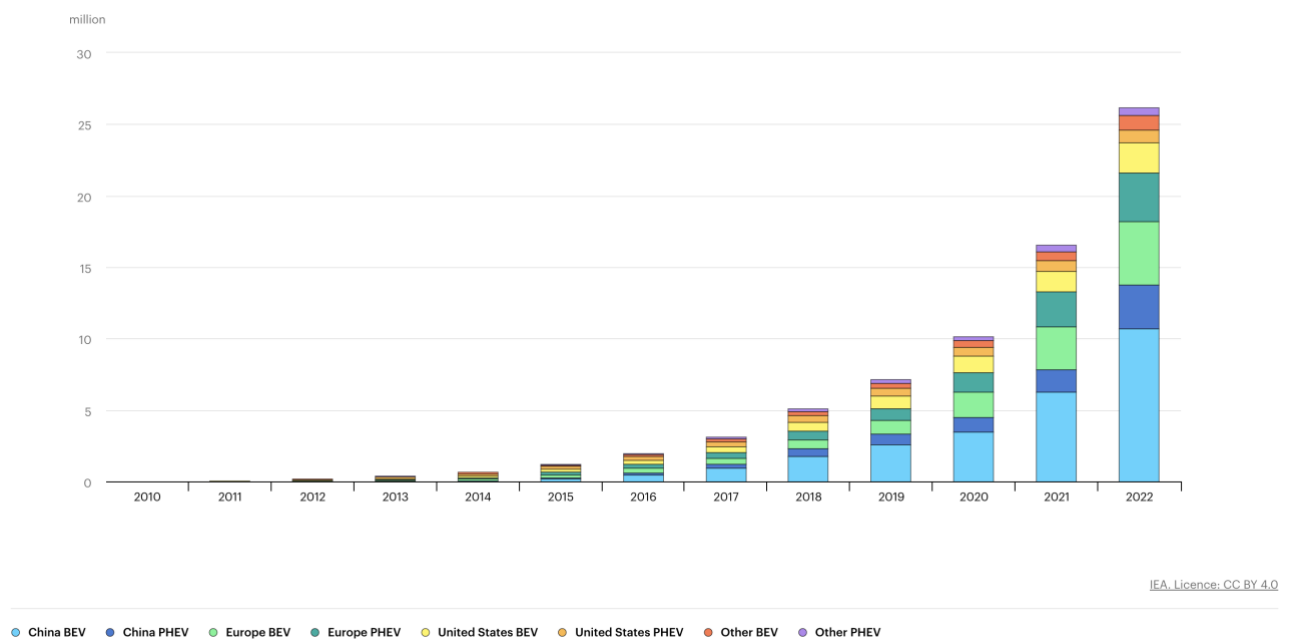


Рисунок 1.2 – Динаміка зміни кількості продажів електромобілів у світі у розрізі окремих країн

У Китаї, який є найбільшим ринком електромобілів у світі, держава пропонує прямі субсидії для покупців електромобілів, які можуть сягати \$4,000 на один автомобіль. Завдяки цим заходам, у 2023 році на частку електромобілів припало понад 25% від загального продажу автомобілів у Китаї. Крім того, уряд країни активно розвиває інфраструктуру зарядних станцій, що є ключовим фактором для масового впровадження електромобільності.

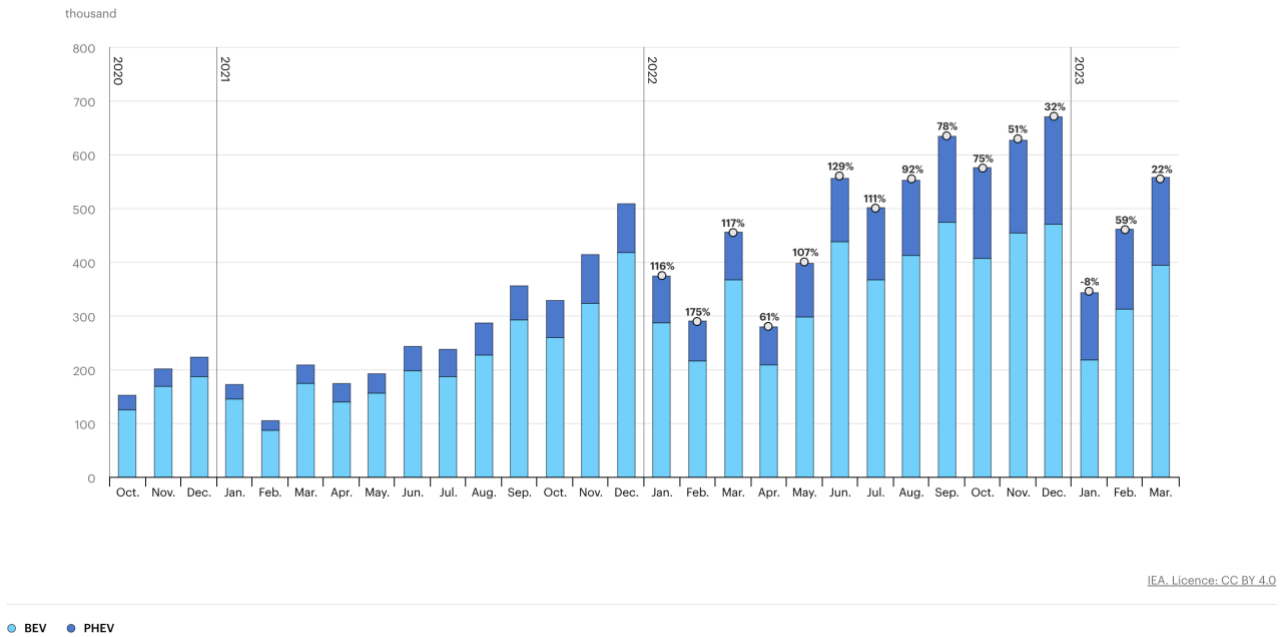
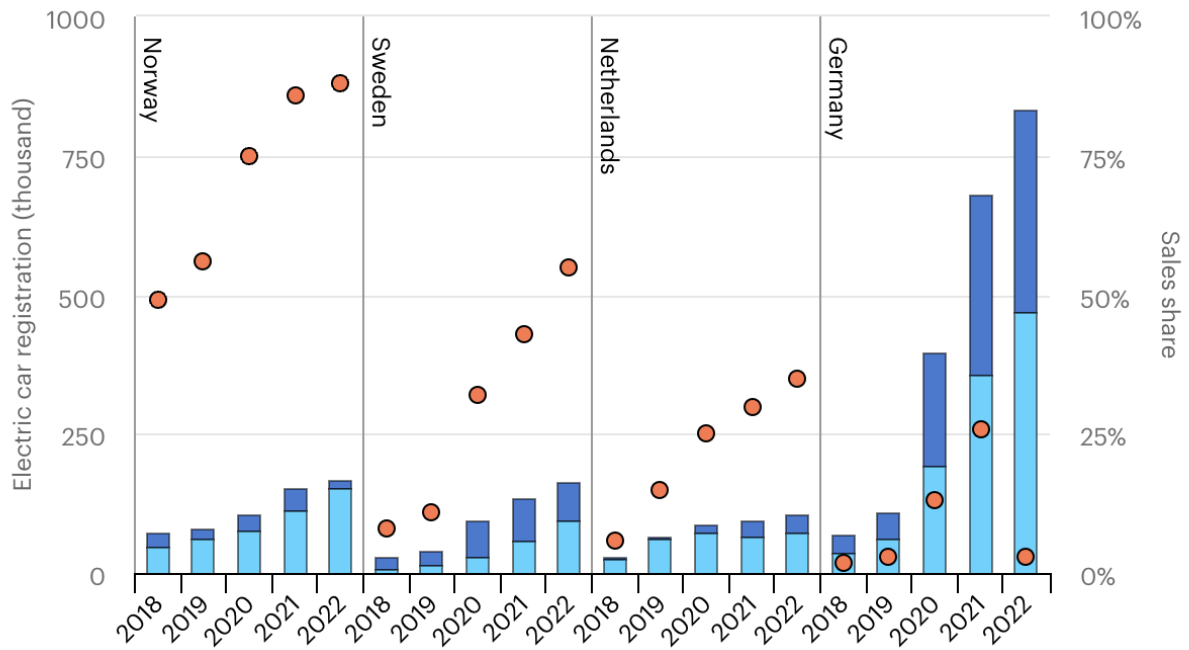


Рисунок 1.3 – Динаміка продажів електромобілів у Китаї

У Європейському Союзі активно впроваджуються екологічні стандарти, такі як «Євро 7», що стимулюють автовиробників переходити на випуск електричних моделей. Наприклад, Німеччина надає субсидії у розмірі до €9,000 для покупців електромобілів, що значно підвищило їх популярність серед населення. У 2023 році частка електромобілів у Німеччині перевищила 20% від загального продажу нових автомобілів.



IEA. Licence: CC BY 4.0

● BEV ● PHEV ● Sales share

Рисунок 1.4 – Динаміка продажів електромобілів у Євросоюзі

США також роблять значні кроки у розвитку електромобільності. У рамках закону «Inflation Reduction Act» (2022) передбачено податкові знижки до \$7,500 для покупців електромобілів, що вироблені на території США. У 2023 році на електромобілі припадало близько 8% продажів нових автомобілів у США, причому цей показник продовжує зростати.

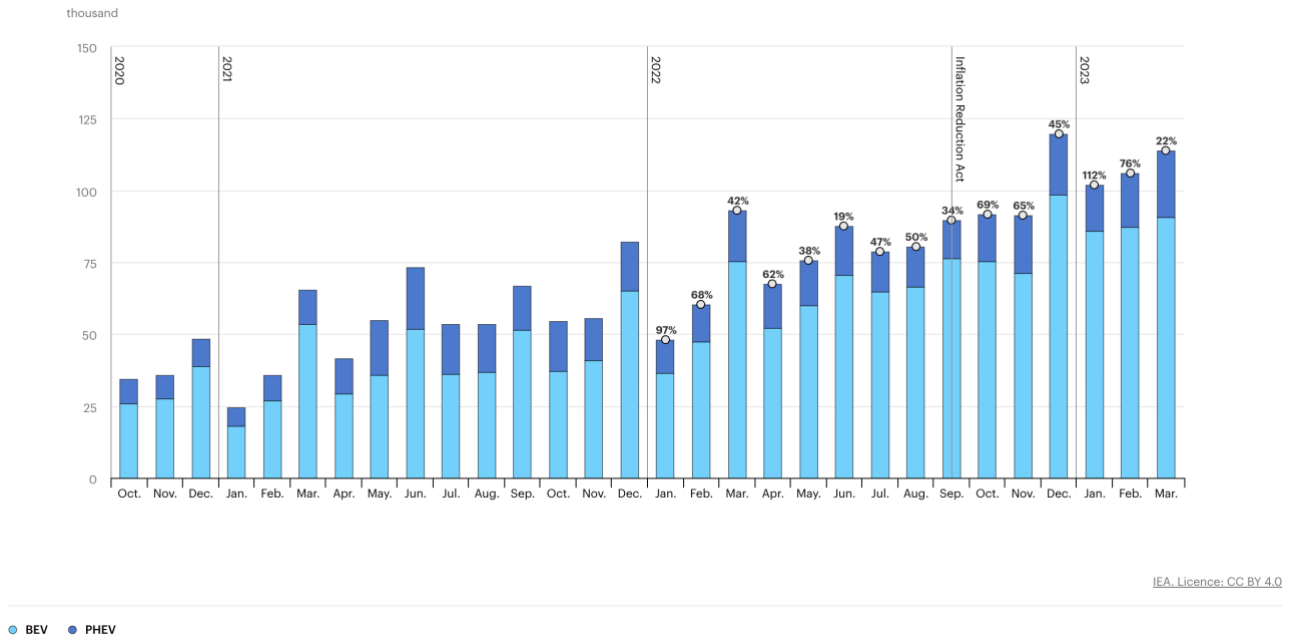


Рисунок 1.5 – Динаміка продажів електромобілів у США

Таким чином, світова електромобільність демонструє впевнене зростання завдяки поєднанню екологічних, економічних і технологічних факторів. Державні стимули та розвиток інфраструктури сприяють прискоренню цього процесу, забезпечуючи доступність та зручність використання електромобілів для широкого кола споживачів [3].

В Україні електромобільність також демонструє позитивну динаміку розвитку, хоча її темпи є дещо повільнішими порівняно зі світовими лідерами. На початок 2024 року в країні зареєстровано понад 50 тисяч електромобілів, причому лише за останні три роки кількість таких транспортних засобів зросла в кілька разів. Основними факторами цього зростання є доступність уживаних електромобілів, переважно імпортованих із Європи та США, а також поступове вдосконалення інфраструктури зарядних станцій.

Для стимулювання переходу населення на електромобілі в Україні запроваджено низку державних ініціатив. Зокрема, електромобілі звільнені від сплати податку на додану вартість (ПДВ) та акцизу, що суттєво знижує їхню кінцеву вартість для споживачів. Окрім цього, законодавство передбачає безкоштовне паркування для електромобілів на муніципальних парковках, а також дозвіл використовувати смуги громадського транспорту в деяких містах.

Одним із ключових напрямків підтримки електромобільності в Україні є

розвиток інфраструктури зарядних станцій. За останні роки кількість зарядних точок зросла в кілька разів, і наразі в Україні функціонує понад 2 тисячі зарядних станцій. Цей розвиток підтримується як приватними інвесторами, так і державою, яка стимулює створення інфраструктури через гранти та субсидії.

Уряд також планує запровадити програми підтримки вітчизняного виробництва електромобілів та їхніх компонентів, таких як акумулятори та зарядні системи. Це має на меті не лише сприяти поширенню електромобілів, але й створити нові робочі місця та підвищити конкурентоспроможність української економіки на світовому ринку.

Таким чином, в Україні поступово формуються умови для активного розвитку електромобільності, хоча для подальшого зростання необхідно покращувати інфраструктуру, підвищувати рівень обізнаності населення та продовжувати стимулюючі заходи на державному рівні.

Світовий ринок електромобілів демонструє стійке зростання протягом останніх років. У 2023 році глобальні продажі електромобілів досягли 14 мільйонів одиниць, що на 35% більше порівняно з 2022 роком. Це свідчить про зростаючий інтерес споживачів до екологічно чистого транспорту та підтримку з боку урядів різних країн [4].

У розвинених країнах спостерігаються різні тенденції щодо впровадження електромобілів. У Китаї, який є найбільшим ринком електромобілів, у 2023 році було зареєстровано 8,1 мільйона нових електромобілів, що становить близько 60% світових продажів.

У Європі продажі електромобілів у 2023 році досягли майже 3,2 мільйона одиниць, що на 20% більше порівняно з 2022 роком.

У Сполучених Штатах у 2023 році було зареєстровано 1,4 мільйона нових електромобілів, що на 40% більше порівняно з попереднім роком.

В Україні ринок електромобілів також демонструє позитивну динаміку. Станом на початок 2024 року в країні зареєстровано понад 50 тисяч електромобілів, причому лише за останні три роки їх кількість зросла в кілька разів. Згідно з офіційною статистикою, за часткою електромобілів у продажах нових авто Україна входить до першої десятки серед країн Європи. Нижче

наведено статистику продажів електромобілів у 2023 році в десяти розвинених країнах світу в порівнянні з Україною (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Статистика продажів електромобілів у 2023 році у порівнянні з 2022

Країна	Продажі електромобілів у 2023 році	Зміна порівняно з 2022 роком
Китай	8,100,000	+35%
Європа	3,200,000	+20%
США	1,400,000	+40%
Німеччина	500,000	+20%
Україна	4,000 (травень 2023)	+53.8% (до травня 2022)

Загалом, світовий ринок електромобілів продовжує зростати, причому розвинені країни відіграють провідну роль у цьому процесі. В Україні також спостерігається позитивна динаміка, що свідчить про зростаючий інтерес до екологічно чистого транспорту.

Порівняльний аналіз продажів електромобілів (EV) та автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) демонструє суттєві відмінності між розвиненими країнами і Україною, зумовлені рівнем економічного розвитку, інфраструктурою, державними стимулами та купівельною спроможністю населення [5].

У розвинених країнах, таких як Норвегія, Німеччина, Китай та США, частка електромобілів у загальних продажах нових автомобілів стрімко зростає. Наприклад, у Норвегії на кінець 2023 року електромобілі становили понад 80% від усіх проданих нових автомобілів. У Німеччині цей показник перевищив 20%, тоді як у Китаї електромобілі склали близько 25% від загальних продажів. Це стало можливим завдяки масштабним державним програмам підтримки, включаючи субсидії, податкові пільги, розвиток зарядної інфраструктури та суворі екологічні норми.

Автомобілі з ДВЗ, хоча й залишаються популярними у більшості країн світу, поступово втрачають ринкову частку. У багатьох розвинених країнах їхній

попит зменшується через введення суворіших стандартів щодо викидів CO₂, зростання цін на паливо та покращення доступності й характеристик електромобілів. Крім того, кілька країн, таких як Франція та Велика Британія, оголосили про поступову відмову від продажів нових автомобілів з ДВЗ до 2030-2040 років.

В Україні ситуація виглядає інакше. Незважаючи на зростання продажів електромобілів, їхня частка в загальних продажах автомобілів залишається відносно низькою, становлячи близько 5-7%. Це зумовлено низькою факторів, зокрема нижчою купівельною спроможністю населення, недостатньо розвинутою зарядною інфраструктурою та популярністю вживаних автомобілів з ДВЗ, які часто імпортуються з Європи та США за доступними цінами. Водночас спостерігається позитивна динаміка: у травні 2023 року продажі електромобілів в Україні зросли на 53,8% порівняно з аналогічним періодом попереднього року.

Таким чином, у розвинених країнах електромобілі стають дедалі популярнішими, поступово витісняючи автомобілі з ДВЗ, тоді як в Україні перехід на електромобільність ще перебуває на початковому етапі. Це підкреслює важливість подальшого розвитку інфраструктури, державних стимулів і підвищення обізнаності споживачів для пришвидшення цього процесу.

У структурі продажів електромобілів у світі можна виділити кілька основних типів, серед яких найбільшу частку займають батарейні електромобілі (Battery Electric Vehicles, BEV) та гібридні електромобілі, зокрема плагін-гібриди (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV).

За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), у 2023 році BEV становили близько 70% від загального обсягу продажів електромобілів у світі. Їхня популярність пояснюється екологічністю, відсутністю викидів під час експлуатації, зростаючим запасом ходу (до 500–700 км на одному заряді) та покращенням інфраструктури зарядних станцій. Крім того, зниження вартості акумуляторів зробило BEV більш доступними для широкого кола споживачів.

PHEV становили близько 30% загальних продажів електромобілів у 2023 році. Їхня популярність пов'язана з можливістю використовувати традиційний

двигун внутрішнього згоряння на додаток до електричного приводу, що робить їх зручним вибором для регіонів із недостатньо розвинутою зарядною інфраструктурою. PHEV забезпечують більшу гнучкість у використанні, особливо для дальніх поїздок.

У розвинених країнах, таких як Норвегія, Німеччина та Китай, частка BEV є вищою порівняно з PHEV завдяки наявності розвинутої інфраструктури та державних стимулів, які часто більше спрямовані на підтримку повністю електричних транспортних засобів. Наприклад, у Норвегії BEV становлять понад 85% від загального продажу електромобілів.

В Україні ситуація дещо інша. Більшість електромобілів, що купуються в країні, також належать до категорії BEV, але їхня популярність часто обумовлена доступністю вживаних автомобілів, імпортованих із Європи та США. PHEV користуються меншим попитом через складність обслуговування і відносно вищу вартість.

Отже, батарейні електромобілі (BEV) залишаються найбільш популярним типом електромобілів у світі, що свідчить про поступовий перехід до більш екологічного транспорту, тоді як плагін-гібриди (PHEV) обираються здебільшого споживачами, які потребують додаткової гнучкості у використанні.

1.2 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу

Аналіз сучасного стану електромобільності у світі та в Україні свідчить про високі темпи розвитку цієї галузі, зумовлені екологічними, економічними та технологічними факторами. Зростання частки електромобілів у глобальних продажах і посилення державної підтримки підтверджують важливість і актуальність розвитку транспортних засобів із електричним приводом. Використання синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами пропонує значний потенціал для підвищення енергоефективності, надійності та екологічності транспортних засобів. Усе це робить вибрану тему дослідження важливою як для вирішення глобальних екологічних проблем, так і для стимулювання розвитку електромобільності в Україні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- Провести детальний аналіз технічних характеристик електро- і гібридних транспортних засобів.
- Розробити класифікацію тягових двигунів для електромобілів, зосереджуючись на синхронних реактивних двигунах з постійними магнітами.
- Дослідити принцип роботи синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами.
- Виконати розрахунок основних параметрів електромобіля з використанням таких двигунів.
- Розробити модель електроприводу на базі синхронних реактивних двигунів.
- Виконати моделювання роботи електроприводу для підтвердження його ефективності.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Технічні характеристики електро- і гібридних транспортних засобів

Електричні та гібридні автомобілі є сучасними альтернативами транспортним засобам із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), які базуються на використанні електричної енергії для приводу двигуна. Основна відмінність між ними полягає у способах зберігання та використання енергії, а також у ступені інтеграції традиційного ДВЗ.

Електричні автомобілі (Electric Vehicles, EV) – це транспортні засоби, що працюють виключно на електричній енергії, яка накопичується у вбудованих батареях [6]. Електромобілі використовують тяговий електродвигун, який забезпечує рух автомобіля. Основними елементами їх конструкції є батарея (зазвичай літій-іонна), система управління енергією та зарядний пристрій. Електромобілі не мають викидів під час експлуатації, що робить їх екологічно чистими.

Серед різновидів електромобілів можна виділити:

- Батарейні електромобілі (Battery Electric Vehicles, BEV)

Ці автомобілі живляться виключно від батареї, яку потрібно регулярно заряджати від зовнішніх джерел енергії.

- Електромобілі на паливних елементах (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV)

Такі автомобілі виробляють електроенергію на борту за допомогою водневих паливних елементів. Вони виділяють лише водяну пару, але вимагають спеціальної інфраструктури для заправки воднем.

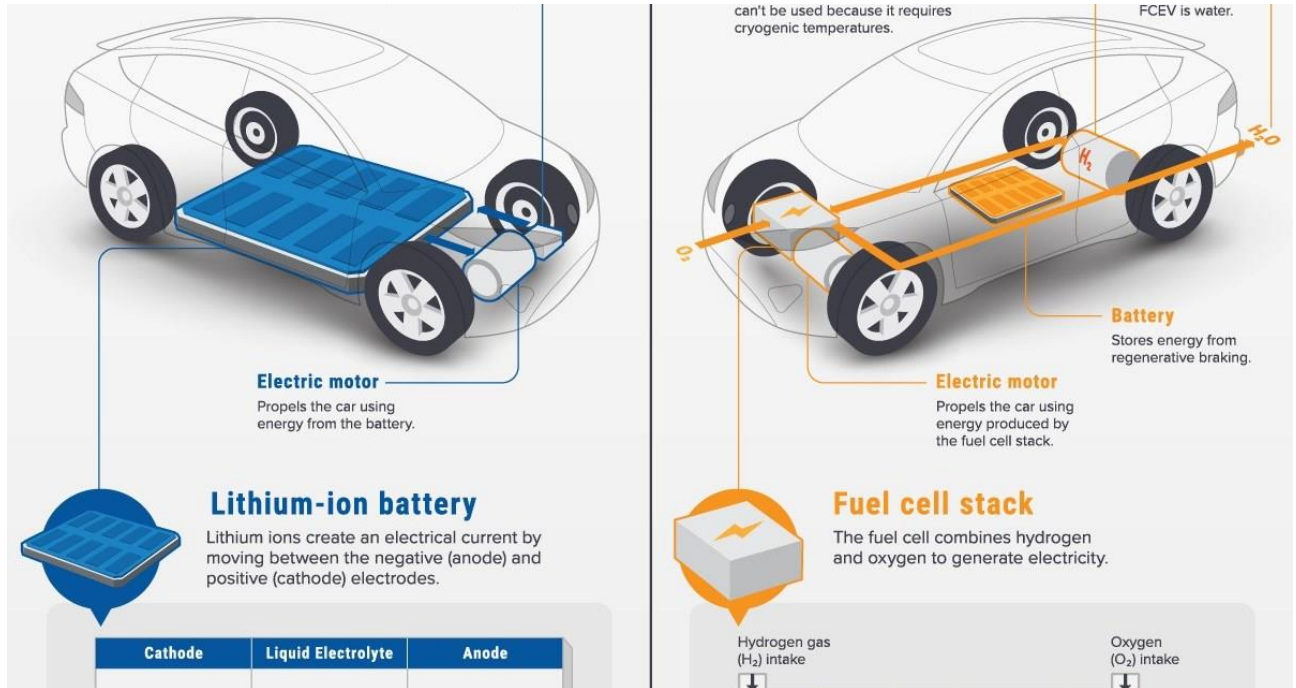


Рисунок 2.1 – Різновиди електромобілів (Battery Electric Vehicles, BEV)

Гібридні автомобілі (Hybrid Electric Vehicles, HEV) – це транспортні засоби, що поєднують електродвигун і традиційний двигун внутрішнього згоряння. Основною особливістю гібридів є здатність комбінувати роботу обох типів двигунів для оптимізації енергоефективності та зменшення шкідливих викидів.

Різновиди гібридних автомобілів включають:

- Плагін-гібриди (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV)

Ці автомобілі оснащені батареями, які можна заряджати від зовнішніх джерел енергії, подібно до BEV. У разі розрядження батареї автомобіль переходить на використання ДВЗ.

- Повні гібриди (Full Hybrid Vehicles, FHV)

Автомобілі, які здатні рухатися як на електричному, так і на бензиновому двигуні окремо або одночасно. Батарея заряджається під час роботи ДВЗ або рекуперативного гальмування.

- М'які гібриди (Mild Hybrid Vehicles, MHEV)

Ці автомобілі мають невеликий електродвигун, який допомагає ДВЗ під час старту та прискорення, але не здатний забезпечити самостійний рух автомобіля.

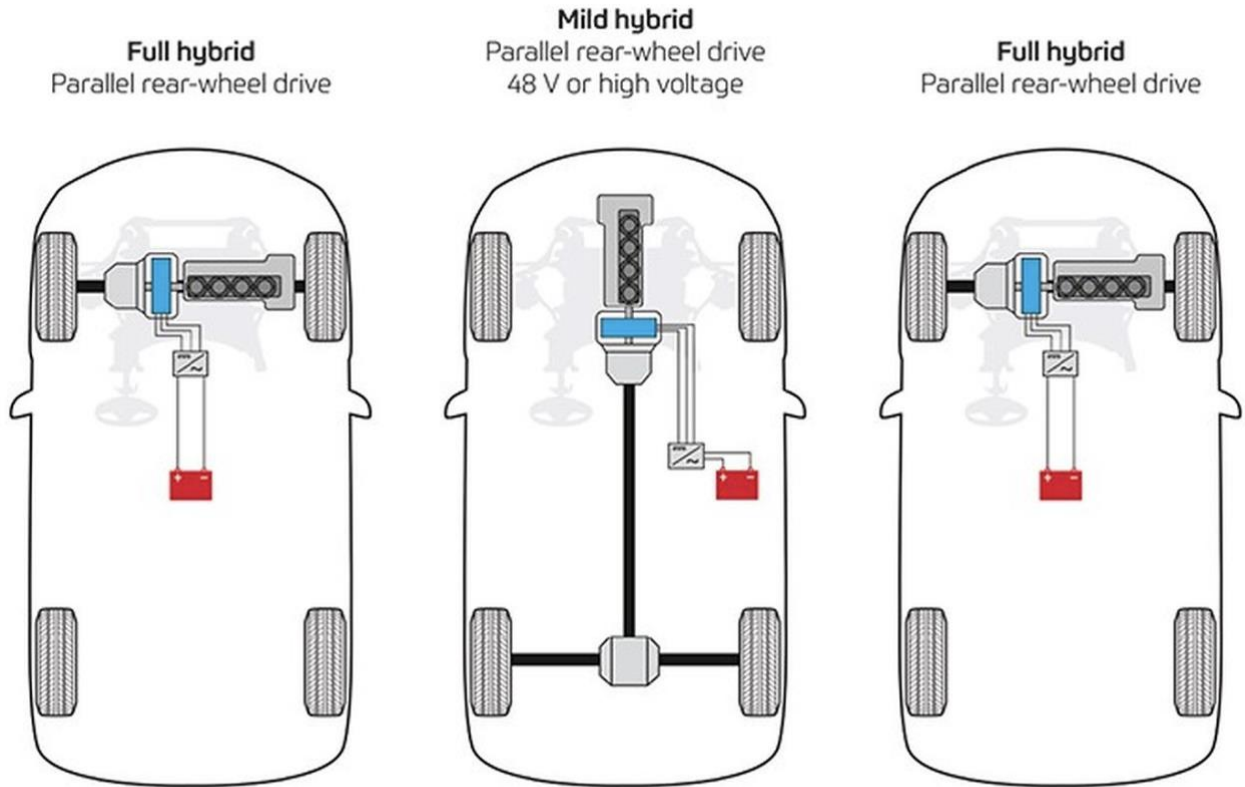


Рисунок 2.2 – Різновиди електромобілів (Hybrid Electric Vehicles, HEV)

Обидва типи транспортних засобів мають свої переваги та обмеження [7]. Електромобілі забезпечують максимальну екологічність, але залежать від розвитку зарядної інфраструктури. Гібридні автомобілі дозволяють використовувати переваги електродвигунів без повної залежності від зарядних станцій, що робить їх практичними у регіонах із недостатньо розвинутою інфраструктурою для електромобілів. Обидві технології сприяють зменшенню викидів парникових газів і підтримують глобальний тренд на екологізацію транспорту. Далі детальніше розглянемо кожен з видів транспортних засобів з електричним приводом [8].

2.1.1. Батарейні електромобілі (Battery Electric Vehicles, BEV)

Батарейні електромобілі (BEV) працюють виключно на електричній енергії, яку накопичують у батареях. Основним компонентом BEV є високоефективна літій-іонна батарея, яка забезпечує значний запас енергії для тягового електродвигуна. BEV не мають двигуна внутрішнього згорання,

паливного баку чи вихлопної системи, що робить їх повністю екологічними під час експлуатації.

Батарейні електромобілі включають декілька ключових компонентів, кожен із яких відіграє важливу роль у забезпеченні їхньої ефективної роботи. Основним джерелом енергії є літій-іонна батарея, яка зберігає електроенергію і забезпечує автомобіль необхідним запасом ходу. Ця батарея працює в тісній взаємодії із системою управління енергією, що оптимізує її розподіл між електродвигуном та іншими системами автомобіля.

Тяговий електродвигун, який може бути синхронним або асинхронним, відповідає за перетворення електричної енергії в механічну, забезпечуючи рух автомобіля. Інвертор, який входить до складу системи, перетворює постійний струм батареї у змінний струм, необхідний для роботи двигуна. У конструкцію BEV також входить рекуперативна система гальмування, що дозволяє повертати енергію назад у батарею під час гальмування.

Особливістю конструкції BEV є відсутність складних механічних елементів, таких як коробка передач чи вихлопна система. Це не лише спрощує конструкцію автомобіля, але й знижує його вагу та витрати на обслуговування. Основні характеристики цього типу електромобілів наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики BEV

Характеристика	Значення
Джерело енергії	Літій-іонна батарея
Запас ходу	300–700 км
Час зарядки	30 хв–10 год
Основні вузли	Електродвигун, батарея, інвертор, контролер, зарядна система
Максимальна швидкість	120–200 км/год
Потужність двигуна	50–400 кВт

2.1.2. Електромобілі на паливних елементах (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV)

Електромобілі на паливних елементах (FCEV) використовують водень як основне джерело енергії. У цих автомобілях енергія генерується шляхом хімічної реакції між воднем і киснем у паливному елементі, де утворюється електроенергія для приводу електродвигуна. FCEV оснащені резервуарами для водню, паливними елементами та тяговим електродвигуном.

Електромобілі на паливних елементах мають більш складну конструкцію через використання водню як джерела енергії. Центральним компонентом є паливний елемент, у якому відбувається реакція між воднем і киснем, в результаті якої генерується електроенергія. Ця енергія використовується для приводу тягового електродвигуна, який забезпечує рух автомобіля.

Для зберігання водню автомобіль обладнаний високотехнологічними резервуарами, які виготовлені з композитних матеріалів, що забезпечують безпеку під час зберігання стисненого газу. Буферна батарея використовується для накопичення енергії, отриманої під час рекуперації, а також для підтримки роботи системи в пікові моменти.

Система управління теплом є важливою частиною FCEV, оскільки підтримує оптимальну температуру паливного елемента та буферної батареї, забезпечуючи їхню ефективну роботу. Інвертор, як і в BEV, відповідає за перетворення електроенергії для приводу двигуна. Хоча конструкція FCEV є складнішою, вона забезпечує швидку заправку та великий запас ходу, що робить ці автомобілі перспективними для тривалих поїздок.

FCEV є складнішою в конструктивному виконанні через необхідність безпечного використання водню, але вони забезпечують швидку заправку і довгий запас ходу, що робить їх перспективними для комерційного транспорту та регіонів із доступом до водневої інфраструктури. Основні характеристики цього типу електромобілів наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики FCEV

Характеристика	Значення
Джерело енергії	Водень
Запас ходу	400–800 км
Час заправки	3–5 хв
Основні вузли	Паливний елемент, резервуари для водню, буферна батарея, інвертор, система теплового управління
Максимальна швидкість	150–200 км/год
Потужність двигуна	100–300 кВт

2.1.3. Плагін-гібриди (Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV)

Плагін-гібриди вирізняються наявністю великих акумуляторних батарей, які заряджаються від зовнішніх джерел електроенергії. Основою системи є тяговий електродвигун, що працює у парі з ДВЗ. Батарея забезпечує рух виключно на електричній енергії до 50–100 км, після чого вмикається ДВЗ для подальшого руху.

Конструкція PHEV включає наступні ключові вузли. Батарея великої ємності відповідає за накопичення енергії для руху автомобіля. Електродвигун перетворює електричну енергію з батареї в механічну для приводу коліс, забезпечуючи безшумну та екологічну роботу. ДВЗ працює як резервне джерело енергії, дозволяючи збільшити загальний запас ходу автомобіля. Трансмісія забезпечує плавний перехід між електричним і бензиновим режимами роботи. Система управління енергією оптимізує розподіл енергії між двигунами, тоді як інвертор перетворює постійний струм із батареї на змінний для електродвигуна. Основні характеристики цього типу гібридів наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики PHEV

Характеристика	Значення
Запас ходу на електриці	50–100 км
Загальний запас ходу	600–900 км
Потужність електродвигуна	50–150 кВт
Потужність ДВЗ	70–200 кВт
Час зарядки батареї	2–4 години

2.1.4. Повні гібриди (Full Hybrid Vehicles, FHV)

Повні гібриди здатні працювати в електричному режимі на невеликих відстанях, зазвичай до 5 км, а їхня батарея заряджається виключно під час роботи ДВЗ або гальмування. Вони поєднують електродвигун і ДВЗ у гнучкій системі, яка адаптується до умов руху.

Основними вузлами FHV є невелика батарея, яка зберігає енергію для короткочасного руху на електриці або для підтримки електродвигуна. Електродвигун підтримує ДВЗ під час розгону чи роботи в міському режимі, зменшуючи споживання палива. ДВЗ забезпечує основний привід автомобіля, коли потрібна більша потужність, наприклад, на високих швидкостях чи при довгих поїздках. Трансмісія об'єднує обидва джерела енергії для оптимізації їхньої роботи, тоді як система управління регулює використання енергії залежно від умов руху. Основні характеристики цього типу гібридів наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики FHV

Характеристика	Значення
Запас ходу на електриці	До 5 км
Загальний запас ходу	800–1,000 км
Потужність електродвигуна	20–70 кВт
Потужність ДВЗ	100–250 кВт

2.1.5. М'які гібриди (Mild Hybrid Vehicles, MHEV)

М'які гібриди використовують невеликий електродвигун для підтримки ДВЗ під час старту та розгону. Вони не можуть рухатися виключно на електриці,

але дозволяють значно скоротити споживання палива та викиди CO₂.

Електродвигун допомагає також у роботі допоміжних систем автомобіля, таких як кондиціонер або система зарядки акумулятора.

Конструкція MHEV включає компактну батарею, яка зберігає енергію для допомоги ДВЗ. Електродвигун працює разом із ДВЗ, зменшуючи навантаження на основний двигун. ДВЗ залишається головним джерелом енергії для руху автомобіля. Система управління енергією інтегрує роботу всіх компонентів для досягнення максимальної ефективності. Основні характеристики цього типу гібридів наведені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики MHEV

Характеристика	Значення
Запас ходу на електриці	Відсутній
Загальний запас ходу	Визначається ДВЗ
Потужність електродвигуна	5–20 кВт
Потужність ДВЗ	100–300 кВт

Таким чином, різні види гібридів забезпечують широкий спектр рішень для різних потреб користувачів: від максимальної економії палива в PHEV до зниження викидів без значного ускладнення конструкції в MHEV.

2.2 Класифікація тягових двигунів електромобілів

Електродвигуни стали ключовими компонентами сучасних електромобілів завдяки своїй високій ефективності, надійності та екологічності. Порівняно з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), електричні двигуни мають значно вищий коефіцієнт корисної дії (ККД), який може досягати 90–95%, тоді як ККД ДВЗ зазвичай не перевищує 30–35%. Це означає, що електродвигуни здатні більш ефективно перетворювати енергію в механічну роботу, мінімізуючи втрати тепла. Крім того, електричні двигуни забезпечують миттєвий крутний момент навіть на низьких обертах, що робить їх ідеальними для міських умов, коли потрібні часті зупинки й розгони [9].

Висока ефективність і надійність електродвигунів зумовлені їхньою простою конструкцією, яка не потребує складних систем, таких як паливний насос, система охолодження ДВЗ або багатоступінчаста трансмісія. Це також знижує витрати на технічне обслуговування та збільшує довговічність електромобілів.

До тягових двигунів електромобілів висуваються високі вимоги. Вони повинні забезпечувати широкий діапазон швидкостей, високий крутний момент, особливо на низьких обертах, а також підтримувати стабільну роботу за різних умов експлуатації. Двигуни мають бути компактними, легкими та економічними у виробництві, щоб мінімізувати загальну вагу та вартість автомобіля. Важливою є також здатність працювати в режимі рекуперативного гальмування, коли кінетична енергія перетворюється в електричну й повертається до батареї, що підвищує енергоефективність транспортного засобу.

Серед найпоширеніших типів електродвигунів, які використовуються в електромобілях, виділяють: двигуни постійного струму (DC), асинхронні двигуни, синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), синхронні реактивні двигуни та комбіновані рішення. Кожен із цих типів має свої переваги, недоліки та області застосування. Розглянемо детальніше основні види електродвигунів, які застосовуються в електромобілях [10].

2.2.1. Двигуни постійного струму (DC Motors)

Двигуни постійного струму (DC Motors) були одними з перших, які застосовувалися в електромобілях, і залишаються важливими для розуміння розвитку тягових електродвигунів. Їх принцип роботи базується на перетворенні електричної енергії постійного струму в механічну обертальну енергію за допомогою магнітного поля. У конструкції двигунів постійного струму є дві основні частини: ротор (якір) і статор. Статор створює постійне магнітне поле, тоді як ротор обертається завдяки взаємодії цього поля з магнітним полем, створеним електричним струмом у обмотках ротора.



Рисунок 2.3 – Двигуни постійного струму (DC Motors)

Для передачі електричного струму до обмоток ротора використовується щітково-колекторний вузол. Щітки забезпечують електричний контакт із колектором, який обертається разом із ротором. Це дозволяє змінювати напрямок струму в обмотках ротора, підтримуючи постійне обертання.

Основними перевагами двигунів постійного струму є простота конструкції, легкість управління швидкістю обертання та високий крутний момент на низьких обертах. Ці двигуни мають високу реактивність, що дозволяє швидко змінювати швидкість і напрямок обертання, що є важливим для міських умов руху. Завдяки цим характеристикам двигуни постійного струму застосовувалися в ранніх моделях електромобілів, а також у транспортних засобах спеціального призначення, таких як електрокари для аеропортів або навантажувачі.

Однак двигуни постійного струму мають суттєві недоліки, які обмежують їх застосування в сучасних електромобілях. Найбільш значущою проблемою є наявність щіток і колектора, які поступово зношуються, що призводить до підвищених витрат на обслуговування та зменшення терміну служби. Крім того, ці двигуни мають нижчий коефіцієнт корисної дії (ККД) порівняно з сучасними типами електродвигунів. Ще одним обмеженням є їхня менша енергоефективність при високих обертах.

У сучасних електромобілях двигуни постійного струму поступово витісняються іншими типами двигунів, такими як асинхронні двигуни чи синхронні двигуни з постійними магнітами, які забезпечують кращі технічні характеристики і менші витрати на обслуговування. Проте вони все ще знаходять застосування в невеликих транспортних засобах і електромобілях спеціального призначення.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики двигунів постійного струму

Характеристика	Значення
Тип струму	Постійний
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	75–85%
Крутний момент	Високий на низьких обертах
Швидкість обертання	Легко регулюється
Конструкція	Щітково-колекторна
Знос вузлів	Високий через зношування щіток і колектора
Обслуговування	Часте
Основні сфери застосування	Електрокари, навантажувачі, електрокари спеціального призначення
Довговічність	Обмежена через знос механічних частин

Двигуни постійного струму, незважаючи на свою історичну важливість, стають менш популярними через їх обмеження в довговічності та енергоефективності. Сучасні електромобілі переважно використовують новітні типи двигунів, які забезпечують кращі характеристики за більш низьких витрат.

2.2.2. Асинхронні двигуни (Induction Motors)

Асинхронні двигуни, також відомі як двигуни індукційного типу, є одними з найпоширеніших електродвигунів у сучасних електромобілях. Їхній принцип роботи базується на явищі електромагнітної індукції. Магнітне поле, створене в обмотках статора двигуна, індукує електричний струм у роторі. Цей струм, у свою чергу, створює магнітне поле, яке взаємодіє з магнітним полем статора, приводячи ротор в обертальний рух. Головною особливістю асинхронних двигунів є те, що ротор обертається із швидкістю, яка трохи відстає від

швидкості обертання магнітного поля статора (так звана «ковзна швидкість»), що дозволяє ефективно створювати обертальний момент.

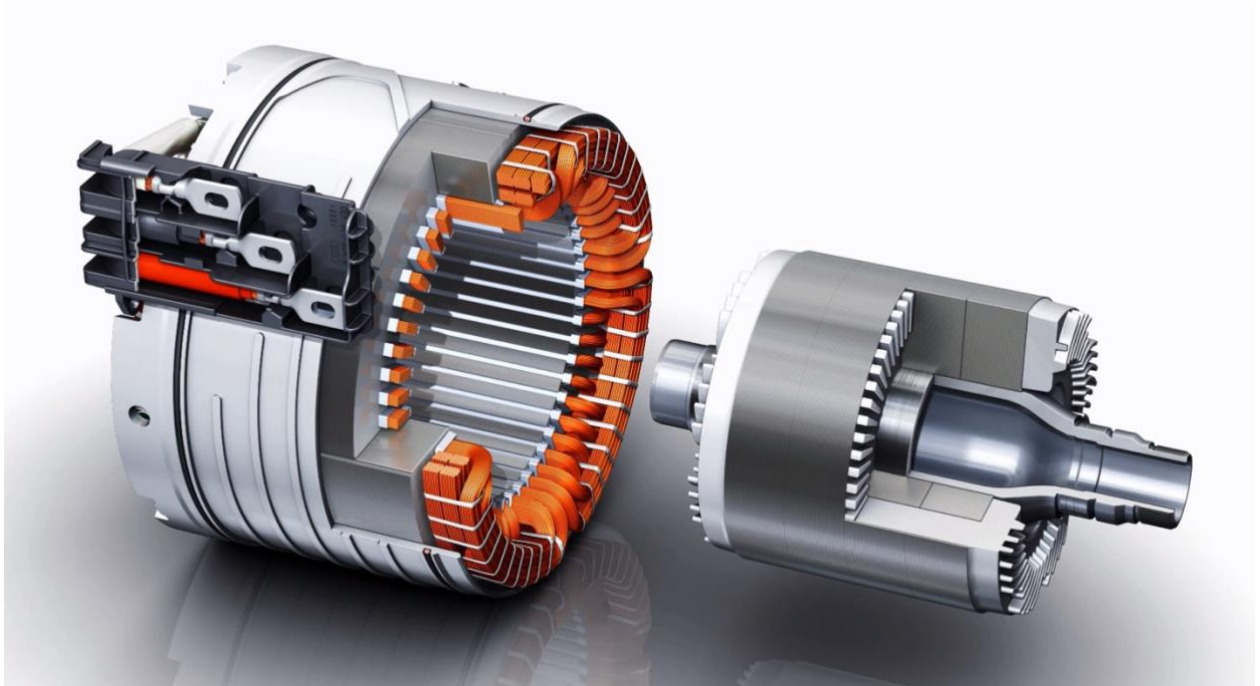


Рисунок 2.4 – Асинхронні двигуни (Induction Motors)

Асинхронні двигуни мають просту і надійну конструкцію, оскільки в них відсутні щітки, колектори та постійні магніти. Це значно знижує ризик механічного зношування та полегшує обслуговування. Крім того, ці двигуни забезпечують високу потужність і здатні працювати в широкому діапазоні швидкостей, що робить їх ідеальними для електромобілів преміум-класу або транспортних засобів із високими динамічними характеристиками.

Однією з основних переваг асинхронних двигунів є їхня відносно низька вартість виробництва, оскільки вони не вимагають використання дорогих рідкоземельних матеріалів. Вони також мають високий рівень довговічності завдяки відсутності зношуваних частин, таких як щітки. Асинхронні двигуни здатні забезпечувати потужний крутний момент при старті, що є важливим для прискорення електромобіля.

Однак ці двигуни мають і певні недоліки. Їхній коефіцієнт корисної дії (ККД) є дещо нижчим порівняно із синхронними двигунами, особливо при роботі на низьких швидкостях. Крім того, асинхронні двигуни споживають

більше енергії під час роботи, що може зменшити загальний запас ходу електромобіля. Також для керування асинхронними двигунами потрібні складні електронні системи, що може збільшити вартість автомобіля.

Асинхронні двигуни широко використовуються у багатьох сучасних електромобілях, таких як Tesla Model S, де вони забезпечують чудовий баланс між продуктивністю та вартістю. Завдяки своїй універсальності, ці двигуни підходять для різноманітних умов експлуатації, включаючи міський рух і швидкісні магістралі.

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики асинхронних двигунів

Характеристика	Значення
Тип струму	Змінний
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	85–90%
Крутний момент	Високий при старті
Швидкість обертання	Широкий діапазон
Конструкція	Безщіткова, індукційного типу
Знос вузлів	Мінімальний
Обслуговування	Низькі витрати
Основні сфери застосування	Електромобілі преміум-класу, комерційний транспорт
Довговічність	Висока
Вартість виробництва	Низька

Асинхронні двигуни є перевіреним часом рішенням для електромобілів завдяки їхній простоті, надійності та потужності. Незважаючи на деякі недоліки, вони продовжують залишатися популярними, особливо у випадках, коли важливими є висока потужність і стабільна робота у різних умовах. Сучасні розробки в галузі електронних систем керування допомагають усунути недоліки асинхронних двигунів, роблячи їх ще ефективнішими для застосування в електромобілях.

2.2.3. Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM)

Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) є одними з найбільш ефективних і популярних типів електродвигунів, які використовуються в

сучасних електромобілях. Їхній принцип роботи базується на створенні магнітного поля за допомогою постійних магнітів, які встановлюються на роторі. Це магнітне поле взаємодіє з обертовим магнітним полем статора, створеним за допомогою змінного струму, поданого на обмотки статора. Завдяки цій взаємодії ротор обертається синхронно зі статором, що забезпечує високу стабільність і ефективність роботи.

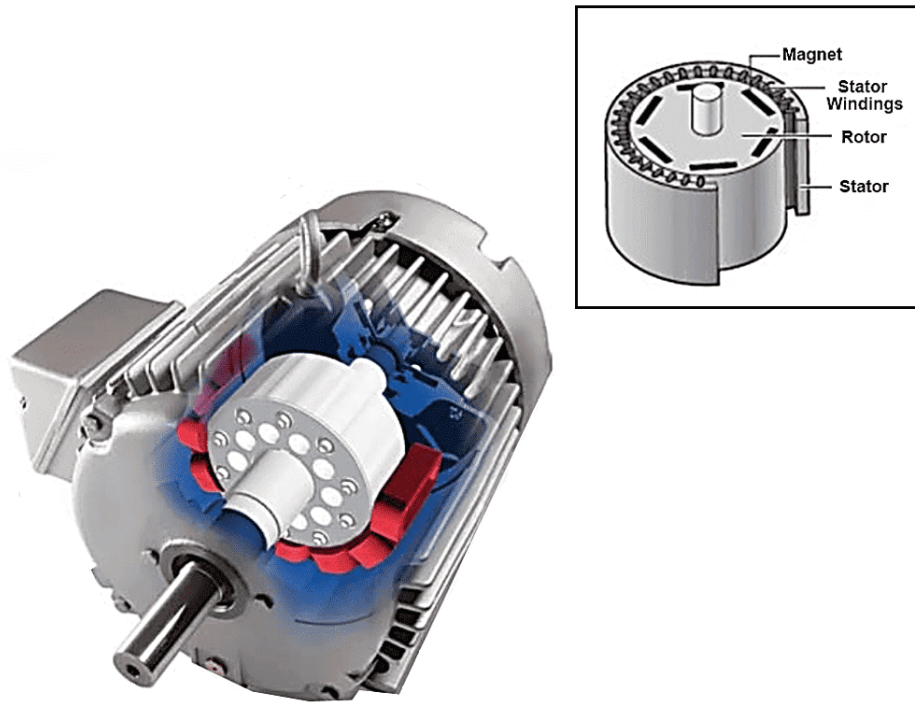


Рисунок 2.5 – Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM)

Оскільки ротор оснащений постійними магнітами, в PMSM відсутні додаткові втрати енергії на збудження магнітного поля, як у деяких інших типах двигунів. Це дозволяє досягати дуже високого коефіцієнта корисної дії (ККД), який може перевищувати 95%. Завдяки цьому PMSM забезпечують мінімальне споживання енергії та максимальний запас ходу електромобіля.

Серед основних переваг PMSM можна виділити їхню компактність і високу щільність потужності, що робить ці двигуни особливо привабливими для застосування в легкових автомобілях. Крім того, вони забезпечують високий крутний момент навіть на низьких швидкостях, що є важливим для старту та

прискорення. Двигуни цього типу працюють дуже тихо, що додатково підвищує комфорт під час використання електромобіля.

Недоліком синхронних двигунів із постійними магнітами є висока вартість виготовлення, пов'язана з використанням рідкоземельних матеріалів, таких як неодим, для створення магнітів. Крім того, при високих температурах продуктивність магнітів може знижуватися, що вимагає додаткових систем охолодження. Ще одним викликом є утилізація магнітів після завершення терміну служби двигуна.

PMSM активно використовуються в багатьох сучасних електромобілях, таких як Nissan Leaf, BMW i3, Tesla Model 3, та інших. Їхній високий ККД і надійність роблять їх оптимальним вибором для транспортних засобів, де важливі максимальна енергоефективність і динаміка.

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики двигунів з постійними магнітами

Характеристика	Значення
Тип струму	Змінний
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	92–97%
Крутний момент	Високий навіть на низьких швидкостях
Швидкість обертання	Стабільна і передбачувана
Конструкція	З постійними магнітами на роторі
Знос вузлів	Мінімальний
Обслуговування	Низькі витрати
Основні сфери застосування	Легкові автомобілі, преміум-сегмент
Довговічність	Висока
Вартість виробництва	Висока через використання рідкоземельних матеріалів

Синхронні двигуни з постійними магнітами є одним із провідних рішень у сучасній електромобільній індустрії. Їхня висока енергоефективність, компактність і потужність роблять їх ідеальним вибором для легкових автомобілів, які потребують максимальної продуктивності. Хоча їхній високий рівень залежності від рідкоземельних матеріалів є певним викликом, ці двигуни

залишаються одними з найкращих для забезпечення енергоефективності та надійності.

2.2.4. Синхронні реактивні двигуни (Synchronous Reluctance Motors)

Синхронні реактивні двигуни (SynRM) є сучасним типом електродвигунів, які отримують дедалі більше поширення завдяки своїм технічним характеристикам та економічній доцільності. Їх принцип роботи базується на явищі магнітного опору (реляктансу). Ротор у цих двигунах створений таким чином, що магнітне поле статора спричиняє обертання завдяки різниці магнітного опору в різних напрямках ротора. Це дозволяє уникнути використання обмоток на роторі або постійних магнітів, що значно спрощує конструкцію.

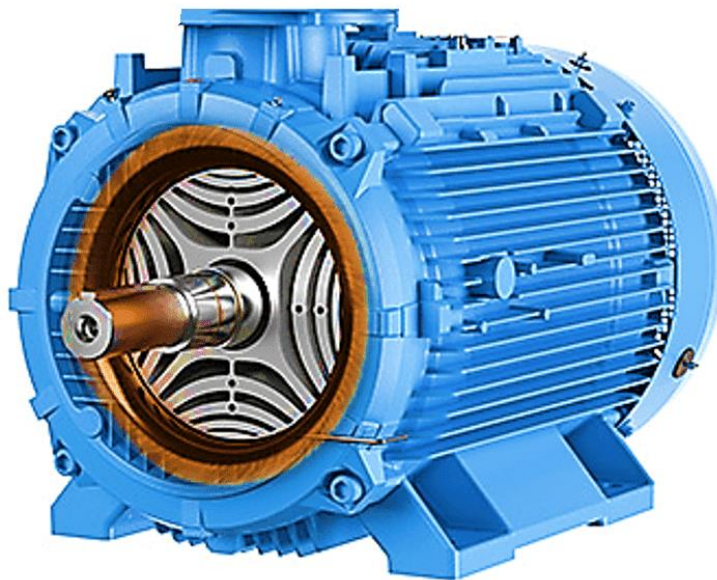


Рисунок 2.6 – Синхронні реактивні двигуни (Synchronous Reluctance Motors)

Ротор у синхронних реактивних двигунах має спеціальну геометрію, яка забезпечує магнітне насичення у напрямках із низьким опором і сприяє ефективному перетворенню електричної енергії в механічну. Магнітне поле ротора залишається синхронізованим із полем статора, що забезпечує стабільну і передбачувану роботу двигуна. Для керування такими двигунами використовуються сучасні електронні системи, які оптимізують їх роботу за різних умов.

Однією з головних переваг SynRM є відсутність постійних магнітів, виготовлених із рідкоземельних матеріалів, що значно знижує вартість їх виробництва і робить їх екологічно чистішими. Крім того, такі двигуни вирізняються високою енергоефективністю, особливо в середньому і високому діапазонах швидкостей. Синхронні реактивні двигуни є компактними, легкими та забезпечують значний крутний момент, що робить їх привабливими для застосування в електромобілях.

Проте SynRM мають і певні недоліки. Їх ефективність на низьких швидкостях та потужність старту можуть бути меншими порівняно з іншими типами двигунів, такими як двигуни з постійними магнітами. Крім того, для оптимальної роботи потрібні складні системи керування, що збільшує загальну вартість інтеграції цих двигунів у транспортний засіб.

Синхронні реактивні двигуни вже використовуються в деяких сучасних електромобілях, особливо в тих, де необхідно забезпечити баланс між продуктивністю, енергоефективністю та вартістю. Вони також є перспективними для масового використання в електромобілях початкового і середнього рівнів завдяки своїй економічності.

Синхронні реактивні двигуни представляють собою перспективну технологію для електромобілів завдяки їхній ефективності, надійності та низькій вартості виробництва. Хоча їхні характеристики на низьких швидкостях поки поступаються деяким іншим типам двигунів, розвиток електронних систем управління поступово компенсує ці обмеження, роблячи SynRM одним із провідних рішень для майбутніх моделей електромобілів.

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики синхронних реактивних двигунів

Характеристика	Значення
Тип струму	Змінний
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	90–95%
Крутний момент	Стабільний, середній на низьких швидкостях
Швидкість обертання	Висока ефективність у середньому і високому діапазонах
Конструкція	Без магнітів, із ротором спеціальної геометрії
Знос вузлів	Мінімальний
Обслуговування	Низькі витрати
Основні сфери застосування	Електромобілі початкового та середнього класів
Довговічність	Висока
Вартість виробництва	Низька

2.2.5. Комбіновані двигуни (Hybrid Motors)

Комбіновані двигуни (Hybrid Motors) представляють собою інноваційне поєднання різних типів електродвигунів, таких як асинхронні, синхронні з постійними магнітами або синхронні реактивні. Ця концепція розроблена для досягнення максимального рівня енергоефективності та продуктивності шляхом використання переваг кожного з типів двигунів у різних умовах експлуатації. Принцип роботи комбінованих двигунів базується на адаптації їх функціонування залежно від потреб транспортного засобу.

У комбінованих двигунах використовується розподілена система керування, яка визначає, який режим роботи двигуна буде найефективнішим у даний момент. Наприклад, під час прискорення може використовуватися високий крутний момент, характерний для двигунів із постійними магнітами (PMSM), а при русі на постійній швидкості вмикається асинхронний режим для економії енергії. Такий підхід дозволяє оптимально використовувати енергію, зменшуючи витрати батареї та збільшуючи запас ходу електромобіля.

Основними перевагами комбінованих двигунів є їхня універсальність і здатність адаптуватися до різних умов експлуатації. Завдяки цьому такі двигуни забезпечують стабільну продуктивність незалежно від швидкості руху, дорожніх умов чи навантаження. Вони також дозволяють ефективно поєднувати високий крутний момент на низьких швидкостях із енергоефективністю при тривалому русі на високих швидкостях.

Проте комбіновані двигуни мають певні недоліки. Їхня конструкція є складнішою порівняно з іншими типами двигунів, що може збільшувати вартість виробництва та обслуговування. Крім того, вони вимагають високорозвинених систем управління, які повинні інтегрувати різні режими роботи двигуна і забезпечувати їхню синхронізацію.

Комбіновані двигуни використовуються переважно в сучасних електромобілях преміум-класу, де важливо забезпечити оптимальний баланс між продуктивністю, комфортом і енергоефективністю. Також вони знаходять застосування в гібридних автомобілях, де поєднується робота електродвигунів із двигунами внутрішнього згоряння для забезпечення максимальної ефективності.

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики синхронних реактивних двигунів

Характеристика	Значення
Тип струму	Змінний
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	90–95%
Крутний момент	Високий на низьких швидкостях, стабільний на високих
Швидкість обертання	Широкий діапазон
Конструкція	Комбінація кількох типів двигунів
Знос вузлів	Низький
Обслуговування	Високі витрати через складність системи
Основні сфери застосування	Електромобілі преміум-класу, гібридні автомобілі
Довговічність	Висока
Вартість виробництва	Висока через складність конструкції

Комбіновані двигуни є перспективною технологією для електромобілів, яка дозволяє поєднувати переваги різних типів електродвигунів. Їхня універсальність і висока продуктивність роблять їх особливо цінними для електромобілів преміум-класу та гібридів, хоча висока вартість поки що обмежує їхнє масове впровадження. З розвитком технологій управління і здешевлення виробництва комбіновані двигуни можуть стати одним із ключових рішень для майбутнього транспорту.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Дослідження принципу роботи синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами

Синхронний реактивний двигун з постійними магнітами (Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, PМа-SynRM) є інноваційним типом електродвигуна, який поєднує принципи роботи реактивних двигунів і синхронних двигунів із постійними магнітами. Ця конструкція дозволяє забезпечити високу енергоефективність, компактність та стабільну роботу за різних умов [11].

Для розуміння особливостей PМа-SynRM важливо пояснити його принцип роботи, який базується на використанні магнітного опору ротора та додаткового магнітного поля, створеного постійними магнітами. Необхідно також визначити ключові переваги й недоліки цієї конструкції, щоб оцінити її доцільність для використання в електромобілях. Важливим є також пояснення причин, через які у ротор двигуна додаються постійні магніти.

3.1.1. Принцип роботи синхронного реактивного електроприводу

Синхронний реактивний електропривод є типом електродвигуна, що використовує магнітний опір (реляктанс) для створення оберտального моменту. Основною особливістю цього двигуна є те, що його ротор не містить обмоток або постійних магнітів у класичному вигляді. Натомість магнітне поле статора взаємодіє з роторами, конструкція яких забезпечує різницю магнітного опору вздовж і поперек осей [12].

Принцип роботи базується на явищі анізотропії, тобто різної реакції матеріалу на магнітне поле в залежності від напрямку. У синхронному реактивному двигуні ця анізотропія досягається шляхом спеціальної геометрії ротора, де є зони з високим і низьким магнітним опором. Коли магнітне поле статора змінюється, ротор вирівнюється вздовж напрямку найменшого магнітного опору, створюючи обертальний момент [13].

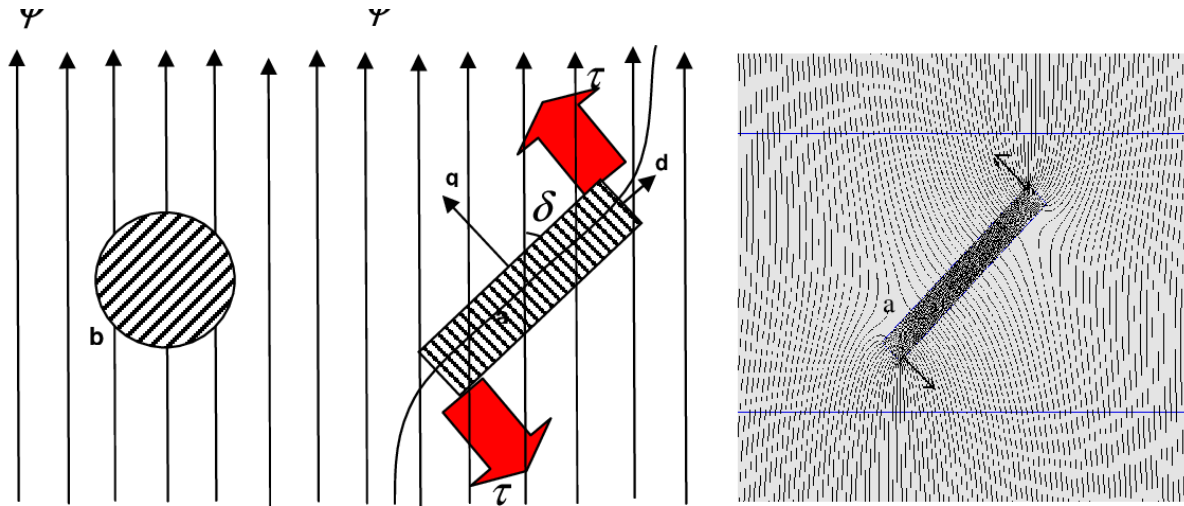


Рисунок 3.1 – Ілюстрація явища анізотропії

Анізотропія магнітного опору є ключовим явищем, яке лежить в основі роботи синхронного реактивного двигуна. Вона забезпечує різницю між індуктивностями в осьовому (d-ось) і поперечному (q-ось) напрямках. Ротор прагне зайняти таку позицію, щоб магнітний потік проходив через зони найменшого магнітного опору.

Формально явище анізотропії можна описати через магнітний потік і індуктивність у різних напрямках:

$$\Psi_d = L_d I_d \quad (3.1)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \quad (3.2)$$

де:

- Ψ_d і Ψ_q — магнітний потік у d- та q-осьових напрямках;
- L_d і L_q — індуктивності у відповідних напрямках;
- I_d і I_q — струм у d- та q-осьових обмотках.

Різниця індуктивностей ($L_d - L_q$) визначає здатність двигуна створювати обертальний момент. Обертальний момент можна математично виразити як:

$$T = \frac{3}{2} p \cdot (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q \quad (3.3)$$

де:

- T — обертальний момент;
- p — кількість пар полюсів статора.

У синхронному реактивному двигуні рівняння, що описують електромагнітну взаємодію між ротором і статором, включають напругу, струм,

опір і магнітний потік. Напруга у відповідних обмотках статора описується рівняннями:

$$V_d = R_s I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \quad (3.4)$$

$$V_q = R_s I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \quad (3.5)$$

де:

- V_d, V_q — напруга у d- та q-осьових напрямках;
- R_s — активний опір обмоток статора;
- ω — кутова швидкість.

Додавання постійних магнітів у конструкцію ротора підвищує магнітний потік у d-напрямку, що дозволяє збільшити обертальний момент без значного підвищення споживаної потужності. Це робить синхронний реактивний двигун із постійними магнітами одним із найефективніших рішень для електроприводів у сучасних електромобілях.

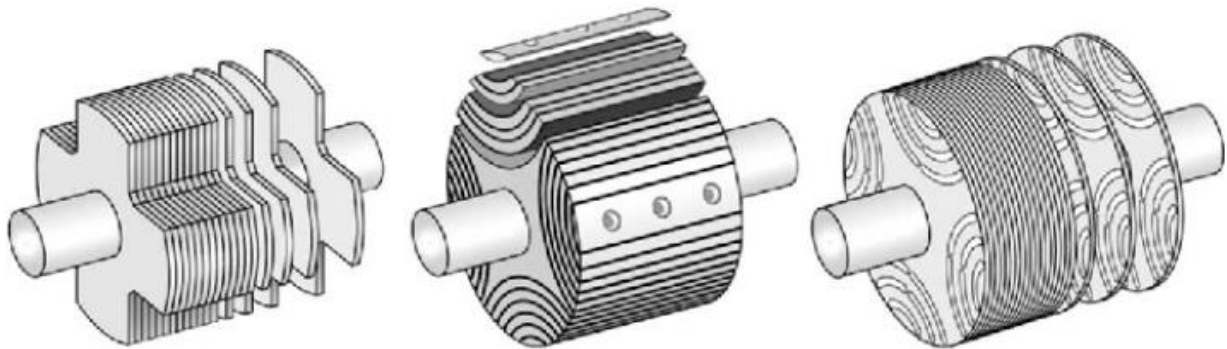


Рисунок 3.2 – Варіанти конструкції ротора синхронного реактивного електроприводу

У синхронних реактивних двигунах з анізотропними роторними структурами ключову роль відіграє геометрія ротора, яка забезпечує різницю магнітного опору в різних напрямках. Це дозволяє двигуну ефективно генерувати обертальний момент. Серед найбільш поширених конфігурацій можна виділити три типи (рис. 3.2): ротор із наскрізними пазами, ротор із бар'єрними структурами та ротор із осередками для постійних магнітів. Кожна з цих конфігурацій має свої конструктивні особливості, переваги й недоліки:

1. Ротор із наскрізними пазами

У цій конфігурації ротор містить наскрізні пази, які створюють зони з низьким і високим магнітним опором. Геометрія пазів забезпечує ефективну орієнтацію магнітного потоку вздовж напрямку найменшого магнітного опору. Такі ротори виготовляються з листової електротехнічної сталі, що зменшує втрати через вихрові струми.

Переваги цієї конфігурації полягають у простоті виготовлення та невисокій вартості. Вона забезпечує добру енергоефективність і стабільність роботи на середніх швидкостях. Однак ротор із наскрізними пазами має порівняно низький крутний момент на низьких швидкостях і може бути менш ефективним у режимах високого навантаження.

2. Ротор із бар'єрними структурами

Цей тип ротора має періодичні бар'єри, заповнені повітрям або немагнітними матеріалами. Бар'єри створюють значну різницю магнітного опору між d - і q -напрямами, що дозволяє генерувати більший обертальний момент. Такі конструкції вимагають високоточного виробництва, оскільки геометрія бар'єрів суттєво впливає на продуктивність двигуна.

Основною перевагою ротора із бар'єрними структурами є висока ефективність і здатність забезпечувати великий крутний момент навіть за низьких швидкостей. Крім того, така конструкція дозволяє мінімізувати втрати енергії. Недоліком є складність виготовлення та вища вартість порівняно з ротором із наскрізними пазами. Цей тип часто застосовується в преміум-сегменті електромобілів.

3. Ротор із осередками для постійних магнітів

У цій конфігурації постійні магніти інтегровані у спеціальні осередки ротора. Вони розташовані так, щоб додатково підсилювати магнітний потік у d -напрямку, підвищуючи обертальний момент і загальну ефективність двигуна. Осередки створюють також зони з низьким магнітним опором для посилення ефекту анізотропії.

Основними перевагами такого ротора є дуже високий коефіцієнт корисної дії (ККД) і значний обертальний момент навіть за низьких швидкостей. Ця

конструкція особливо ефективна для транспортних засобів із підвищеними вимогами до динамічних характеристик. Недоліком є висока вартість через використання рідкоземельних матеріалів для виготовлення магнітів, а також складність утилізації компонентів після завершення терміну служби двигуна.

3.1.2. Принцип роботи синхронного реактивного електроприводу з постійними магнітами

Синхронний реактивний електропривод з постійними магнітами (Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, PМа-SynRM) поєднує особливості синхронного реактивного двигуна та двигуна з постійними магнітами. Ця конструкція забезпечує підвищену ефективність, потужність і стабільність роботи завдяки взаємодії магнітного потоку, створеного постійними магнітами, та ефекту анізотропії в роторі [14].

Принцип роботи PМа-SynRM базується на створенні обертального моменту за рахунок магнітного потоку статора, який взаємодіє з ротором. У стандартному реактивному двигуні момент генерується завдяки різниці магнітного опору (реляктансу) у напрямках d- і q-осей. У PМа-SynRM постійні магніти на роторі збільшують магнітний потік у d-напрямку, підвищуючи момент двигуна та загальну ефективність. Таким чином, двигун використовує комбіновану дію реактивного моменту та моменту, створеного постійними магнітами.

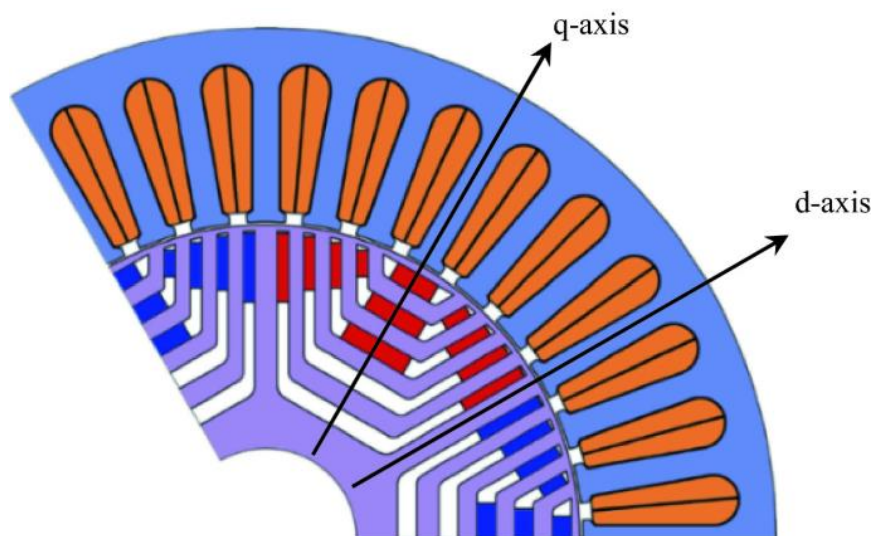


Рисунок 3.3 – Конструкція синхронного реактивного електроприводу з постійними магнітами

Ротор РМа-SynRM має спеціальні осередки для постійних магнітів, розташовані таким чином, щоб оптимізувати розподіл магнітного потоку. Ці осередки заповнені магнітами, які створюють постійний магнітний потік у напрямку d-осі. Ротор виготовляється з шарів електротехнічної сталі, що знижує втрати через вихрові струми, та має геометрію, яка забезпечує значну різницю магнітного опору вздовж різних осей.

Статор РМа-SynRM схожий на статор звичайного синхронного двигуна і має обмотки, які створюють обертове магнітне поле. Він виготовляється із сегментів електротехнічної сталі з високою магнітною проникністю та обмоток із мідного проводу, розташованих у пазах статора.

Серед переваг РМа-SynRM можна виділити наступні:

- Висока ефективність

Завдяки додатковому магнітному потоку від постійних магнітів цей тип двигуна має дуже високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що сприяє збільшенню запасу ходу електромобілів.

- Підвищений обертальний момент

Постійні магніти збільшують крутний момент навіть на низьких швидкостях, що покращує динаміку старту і прискорення.

- Компактність

Завдяки високій щільності потужності двигун займає менше місця, що дозволяє оптимізувати конструкцію автомобіля.

- Зниження втрат

Шари сталі в роторі зменшують вихрові струми і теплові втрати.

Серед недоліків цього типу електричних машин зазвичай виділяють наступні:

- Висока вартість

Постійні магніти виготовляються із рідкоземельних матеріалів, таких як неодим, що значно підвищує вартість виробництва.

- Чутливість до температури

При високих температурах магніти можуть втрачати свої магнітні властивості, що вимагає додаткових систем охолодження.

- Складність конструкції

Інтеграція постійних магнітів у ротор ускладнює виробничий процес, збільшуючи його тривалість і витрати.

Синхронний реактивний електропривод із постійними магнітами є одним із найефективніших рішень для сучасних електромобілів. Його конструкція дозволяє поєднувати високу ефективність, потужність і надійність, що робить його ідеальним вибором для автомобілів преміум-класу або транспортних засобів із підвищеними вимогами до динамічних характеристик. Незважаючи на високу вартість і технологічну складність, PМа-SynRM продовжує впроваджуватися у нові моделі автомобілів завдяки своїм технічним перевагам і перспективності.

3.1.3. Ефект Халбаха

Ефект Халбаха (Halbach Effect) є фізичним явищем, пов'язаним із особливим розташуванням магнітів, яке створює асиметричне магнітне поле. Це явище було вперше описано в 1980-х роках фізиком Клаусом Халбахом. Унікальна конфігурація магнітів у масиві Халбаха дозволяє посилити магнітне поле з одного боку масиву, одночасно майже повністю його нейтралізувавши з іншого боку. Цей ефект створює одностороннє магнітне поле, що є корисним у багатьох інженерних і наукових застосуваннях [15].

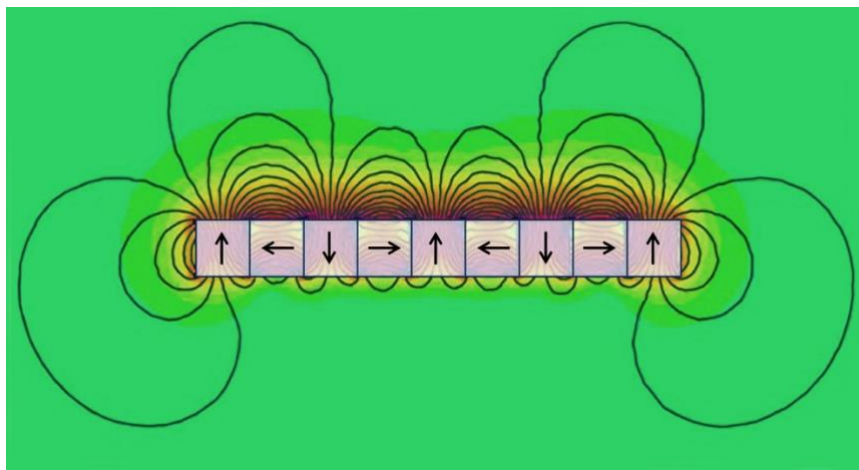


Рисунок 3.3 – Ефект Халбаха

Масив Халбаха формується за рахунок спеціального чергування полярності магнітів у певному порядку. У такій конфігурації вектори магнітної індукції зсуваються в напрямку посилення магнітного поля на одній стороні, тоді як магнітні потоки з протилежного боку компенсуються, створюючи дуже слабе або навіть відсутнє магнітне поле.

Принцип дії ефекту Халбаха полягає у зміні орієнтації магнітних доменів у масиві. У класичній конструкції масиву магнітів їх полярність змінюється таким чином, щоб магнітне поле підсумовувалося з одного боку й анулювалося з іншого. Це дозволяє сконцентрувати магнітну енергію лише в одному напрямку, що робить систему більш ефективною і керованою.

Ефект Халбаха знайшов широке застосування в багатьох галузях. Зокрема, він використовується в конструкції електродвигунів і генераторів для підвищення ефективності роботи магнітних систем. У транспортних технологіях, таких як маглев-поїзди, масиви Халбаха забезпечують потужне магнітне поле для левітації. Вони також застосовуються у магнітних підшипниках, медичних пристроях, системах безконтактного приводу, а також у наукових експериментах.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Розробка математичної моделі електромобіля з встановленими синхронними реактивними двигунами

Сучасні електромобілі потребують високоефективних електроприводів із можливістю гнучкого керування та адаптації до змінних умов роботи. У цьому контексті розробка математичної моделі електромобіля, оснащеного синхронними реактивними двигунами (PМа-SynRM), є актуальним завданням. Така модель дозволяє детально описати основні процеси в електромобілі, забезпечити оптимізацію енергоспоживання, а також створити ефективні закони керування для стабільної та економічної роботи електропривода [16].

Цей розділ спрямований на математичний опис електромеханічних процесів у PМа-SynRM і трифазному інверторі, що використовується для його живлення. Особливу увагу приділено методам керування, включаючи Model-Based Control (MBC) і Model-Free Control (MFC). Перший метод базується на використанні детальної моделі двигуна, тоді як другий дозволяє керувати системою без необхідності точного знання її параметрів. У сучасних дослідженнях саме MFC визнано перспективнішим завдяки його здатності адаптуватися до умов реального часу і працювати з неповними або неточними даними.

Детальний розгляд включатиме математичне формулювання законів управління для методу MFC, розробку контролера, моделювання роботи PМа-SynRM з інвертором, а також опис процесів керування струмом і швидкістю. Результатом стане модель, яка дозволить проводити симуляції для аналізу продуктивності електропривода в різних робочих режимах, забезпечуючи баланс між енергоефективністю, динамічними характеристиками і стабільністю системи.

4.1.1. Порівняння методів керування Model-Based Control (MBC) і Model-Free Control (MFC)

Model-Based Control (MBC) є класичним підходом до керування системами, який базується на детальному математичному моделюванні динаміки

системи. У цьому методі передбачається, що всі ключові параметри та залежності відомі, що дозволяє створити точну модель, яка описує поведінку системи. У контексті PМа-SynRM це означає знання параметрів статора, ротора, індуктивностей у d- і q-напрямах, магнітного потоку, а також інших фізичних характеристик [17].

Основною перевагою MBC є точність і можливість глибокого аналізу системи. Завдяки детальному моделюванню можна створити складні закони керування, такі як Field-Oriented Control (FOC) або Model Predictive Control (MPC), які дозволяють оптимізувати роботу двигуна. Однак MBC має значні недоліки. Цей підхід залежить від точності математичної моделі, яка може змінюватися через зовнішні фактори, такі як температурні впливи, зношування компонентів або варіації навантаження. Крім того, моделювання складних систем потребує значного обчислювального ресурсу, що ускладнює реалізацію таких контролерів у реальному часі.

Model-Free Control (MFC) є інноваційним підходом до керування, який не вимагає точного знання математичної моделі системи. Замість цього MFC використовує дані про поточний стан системи, отримані в реальному часі, для адаптивного налаштування керування. Цей підхід особливо ефективний для нелінійних систем або систем із невідомими параметрами.

Принцип роботи MFC базується на локальному наближенні динаміки системи. Для цього використовуються спостереження за виходами системи та зворотній зв'язок для коригування керуючого впливу. Це дозволяє MFC працювати навіть у випадках, коли система має значні невизначеності або зовнішні збурення. Перевагами MFC є його адаптивність, простота налаштування та низькі обчислювальні витрати порівняно з MBC. Однак MFC може мати обмеження при роботі з дуже швидкими змінами системи, де потрібна висока точність керування [18].

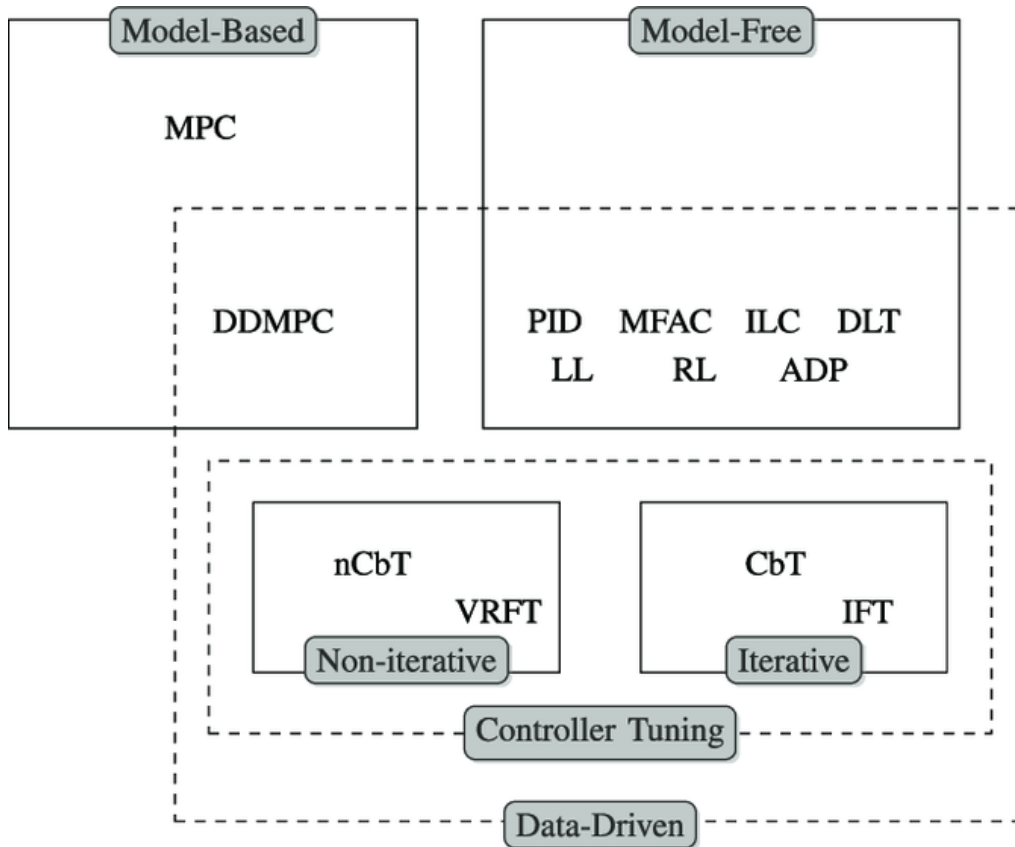


Рисунок 4.1 – Порівняння Model-Based Control (MBC) і Model-Free Control (MFC)

Безмодельне керування базується на локальній лінійній апроксимації динаміки системи, яка описується рівняннями стану:

$$\dot{x} = f(x, u), \quad y = h(x, u) \quad (4.1)$$

де:

- x — вектор стану;
- u — керуючий вплив;
- y — вихід системи;
- $f(x, u)$ та $h(x, u)$ — відомі й невідомі функції, що описують систему.

Для MFC рівняння керування записується у вигляді:

$$u = u_{\text{ref}} + u_{\text{feedback}}(\varepsilon) \quad (4.2)$$

де:

- u_{ref} — керуючий вплив, обчислений для заданого стану;
- $u_{\text{feedback}}(\varepsilon)$ — компенсаційний вплив для корекції похибок;
- $\varepsilon = u_{\text{ref}} - y$ — похибка між бажаним і реальним виходом системи.

Для нелінійних систем MFC дозволяє розділити систему на відому частину і невідому:

$$\dot{y} = \alpha(y, \dot{y}) + F + b \cdot u \quad (4.3)$$

де:

- F — невідома частина моделі;
- b — коефіцієнт підсилення.

Відомі частини системи описуються як:

$$u_{\text{ref}} = \frac{\dot{y}_{\text{ref}} - F}{b} \quad (4.5)$$

Невідома частина F оцінюється за допомогою спостерігача:

$$F = b \cdot u - \dot{y} \quad (4.6)$$

Ця формула забезпечує адаптацію керування до змін у системі або впливу зовнішніх факторів. Model-Free Control (MFC) є більш перспективним підходом у порівнянні з Model-Based Control (MBC) для систем із невідомими або змінними параметрами. Його здатність працювати в реальному часі без необхідності точного моделювання робить MFC оптимальним вибором для сучасних електромобілів із PMA-SynRM, де важлива стабільність і ефективність у різних робочих умовах.

4.1.2. Закон управління для методу безмодельного керування (MFC)

Метод безмодельного керування (Model-Free Control, MFC) є інноваційним підходом, який дозволяє керувати системами без необхідності знання точних параметрів або динамічної моделі об'єкта [19]. Основна ідея MFC полягає у використанні локального наближення динаміки системи на основі отриманих даних та спостережень.

У MFC система описується у вигляді рівняння стану:

$$\dot{y} = F + b \cdot u \quad (4.7)$$

де:

- $\dot{y}$ — вихід системи (наприклад, струм або швидкість у системі керування електроприводом);
- u — керуючий вплив;
- F — невідома нелінійна частина, яка включає всі непередбачувані зміни в системі;

- b — коефіцієнт підсилення, що є постійним і відомим.

Для забезпечення стабільності та компенсації похибок у МРС використовується компенсаційний зворотний зв'язок. Загальний закон управління записується як:

$$u = u_{\text{ref}} + u_{\text{feedback}}(\varepsilon) + \frac{\hat{F}}{b} \quad (4.8)$$

де:

- u_{ref} — базовий керуючий вплив;
- $u_{\text{feedback}}(\varepsilon)$ — компенсаційний вплив, який залежить від похибки $\varepsilon = y_{\text{ref}} - y$;
- $\hat{F}$ — оцінка невідомої частини F .

Компонентами закону управління є наступні величини:

1. Базовий керуючий вплив

Базова частина керуючого впливу визначається для забезпечення відповідності виходу системи бажаному значенню:

$$u_{\text{ref}} = \frac{y_{\text{ref}} - \hat{F}}{b} \quad (4.9)$$

де y_{ref} — похідна бажаного виходу системи.

2. Оцінка невідомої частини F

Невідома частина FFF оцінюється за допомогою спостерігача у реальному часі:

$$\hat{F} = b \cdot u - \dot{y} \quad (4.10)$$

Ця оцінка дозволяє врахувати зовнішні збурення та непередбачувані зміни в системі.

3. Компенсаційний вплив

Компенсаційний вплив забезпечує зниження похибок та покращення стабільності системи. Для його визначення використовується пропорційно-інтегральний (PI) регулятор:

$$u_{\text{feedback}} = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon dt \quad (4.11)$$

де K_p і K_i — коефіцієнти налаштування регулятора.

Підставляючи всі компоненти, отримуємо повний закон управління для МРС:

$$u = \frac{y_{\text{ref}}}{b} + K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon dt + \frac{\hat{F}}{b} \quad (4.12)$$

Динаміка системи з урахуванням зворотного зв'язку описується як:

$$\dot{\varepsilon} + b \cdot K_p \cdot \varepsilon + b \cdot K_i \cdot \int \varepsilon dt = 0 \quad (4.13)$$

Це рівняння описує поведінку системи у замкненому контурі керування, забезпечуючи зменшення похибок та стабільність роботи.

МФС забезпечує гнучкий і надійний підхід до керування системами з непередбачуваною динамікою або невідомими параметрами. Його використання дозволяє досягати високої точності керування навіть за наявності збурень або змін у системі, що робить його ідеальним вибором для застосувань у сучасних електроприводах [20].

4.1.3. Розробка контролера для безмодельного керування

У методі безмодельного керування (МФС) контролер відповідає за забезпечення точної відповідності виходу системи бажаним траєкторіям навіть за наявності зовнішніх збурень або невідомих динамічних змін. Контролер МФС має дві основні складові: оцінку невідомих параметрів і зворотний зв'язок для компенсації похибок.

Контролер побудовано на основі рівняння стану системи:

$$\dot{y} = F + b \cdot u \quad (4.14)$$

де:

- y — вихід системи;
- u — керуючий вплив;
- F — невідома нелінійна частина;
- b — коефіцієнт підсилення.

Контролер розраховує керуючий вплив u , який складається з базового впливу u_{ref} , зворотного зв'язку u_{feedback} і компенсації невідомої частини $\hat{F}$:

$$u = u_{\text{ref}} + u_{\text{feedback}} + \frac{\hat{F}}{b} \quad (4.15)$$

Розробку контролера можна розбити на декілька основних етапів:

1. Базовий вплив (u_{ref})

Базова частина керування забезпечує відповідність бажаному виходу системи, використовуючи модель відомої частини системи. Вона розраховується як:

$$u_{\text{ref}} = \frac{y_{\text{ref}} - \hat{F}}{b} \quad (4.16)$$

де y_{ref} — похідна бажаного значення виходу системи, а $\hat{F}$ — оцінка невідомої частини, яка компенсується в реальному часі.

2. Зворотний зв'язок (u_{feedback})

Компенсаційний зворотний зв'язок дозволяє мінімізувати похибку між бажаним і реальним виходами системи. Для цього використовується пропорційно-інтегральний (PI) регулятор:

$$u_{\text{feedback}} = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon dt \quad (4.17)$$

3. Оцінка невідомої частини ($\hat{F}$)

Невідома частина F , яка включає всі зовнішні збурення та неточності моделі, оцінюється за допомогою спостерігача:

$$\hat{F} = b \cdot u - \dot{y} \quad (4.18)$$

Ця оцінка дозволяє адаптувати керування до змін у системі або зовнішніх умов.

Підставляючи всі компоненти, отримуємо повний закон управління:

$$u = \frac{y_{\text{ref}} - \hat{F}}{b} + K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon dt \quad (4.19)$$

Цей закон забезпечує компенсацію похибок, адаптацію до змін і стабільність роботи системи.

Динаміка системи з урахуванням закону керування описується як:

$$\dot{\varepsilon} + b \cdot K_p \cdot \varepsilon + b \cdot K_i \cdot \int \varepsilon dt = 0 \quad (4.20)$$

Це рівняння показує, як система прагне до нуля похибки завдяки дії компенсаційного зворотного зв'язку. Коефіцієнти K_p і K_i визначаються шляхом порівняння динаміки системи з рівнянням другого порядку:

$$\ddot{\varepsilon} + 2\zeta\omega_n\dot{\varepsilon} + \omega_n^2\varepsilon = 0 \quad (4.21)$$

де:

- ζ — коефіцієнт демпфірування;
- ω_n — природна частота системи.

Звідси:

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n}{b}, \quad K_i = \frac{\omega_n^2}{b} \quad (4.22)$$

Розроблений контролер MFC забезпечує точність і стабільність керування навіть за наявності невідомих динамічних змін або зовнішніх збурень. Він дозволяє досягати оптимального балансу між швидкістю реакції системи, стабільністю та енергоефективністю, що робить його ідеальним вибором для застосувань у сучасних електроприводах.

4.1.4. Математична модель PМа-SynRM/Inverter приводу

PМа-SynRM/Inverter привід складається з двох ключових компонентів: трифазного інвертора і синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами (PМа-SynRM). Трифазний інвертор відповідає за генерацію змінного струму зі змінними частотою та амплітудою, необхідного для живлення двигуна. Основні процеси, які відбуваються в інверторі, включають перетворення постійного струму в змінний, модуляцію напруги та керування струмами в обмотках статора двигуна. Основні компоненти моделі:

1. Трифазний інвертор

Трифазний інвертор складається з шести силових ключів (MOSFET або IGBT), які працюють у режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вхідною напругою інвертора є постійна напруга VDC, а вихідною — змінна напруга Vabc, яка живить обмотки статора двигуна.

2. Синхронний реактивний двигун із постійними магнітами (PМа-SynRM)

PМа-SynRM характеризується відмінністю індуктивностей у d- та q-напрявках ($L_d > L_q$), що забезпечує створення реактивного моменту. Додатковий момент створюється за рахунок магнітного потоку постійних магнітів (Ψ_m).

Вихідна напруга трифазного інвертора може бути представлена у фазовій системі координат abc:

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{2} \begin{bmatrix} s_a - s'_a \\ s_b - s'_b \\ s_c - s'_c \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

де:

- V_a, V_b, V_c — фазові напруги інвертора;
- s_a, s_b, s_c — стан ключів у верхньому плечі (1 — ввімкнено, 0 — вимкнено);
- s'_a, s'_b, s'_c — стан ключів у нижньому плечі (1 — ввімкнено, 0 — вимкнено);

- VDC — напруга живлення інвертора.

Для аналізу інвертора зручно перейти у систему координат dq за допомогою перетворення Кларка-Парка:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

де θ — поточний кут ротора.

У системі координат dq рівняння напруги для РМа-SynRM записуються як:

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e L_q I_q \quad (4.25)$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e (L_d I_d + \Psi_m) \quad (4.26)$$

де:

- V_d, V_q — компоненти напруги у dq -системі;
- I_d, I_q — струми в dq -системі;
- R_s — опір обмоток статора;
- L_d, L_q — індуктивності у d - та q -напрявках;
- ω_e — електрична кутова швидкість;
- Ψ_m — магнітний потік постійних магнітів.

Електромагнітний момент T_e для РМа-SynRM визначається як:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\Psi_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (4.27)$$

де n_p — кількість пар полюсів.

Математична модель РМа-SynRM/Inverter приводу забезпечує опис ключових процесів у системі керування електроприводом. Вона включає рівняння напруги в трифазному інверторі, перетворення координат для полегшення аналізу та взаємозв'язок між струмами, напругами і моментом. Ця модель дозволяє створювати ефективні закони керування для оптимізації роботи двигуна в електромобілях.

4.1.5. Розробка математичної моделі керування струмом і швидкістю для РМа-SynRM із використанням безмодельного керування (MFC)

Для ефективного керування РМа-SynRM на основі принципу безмодельного керування (Model-Free Control, MFC) розробляється каскадне управління, яке включає внутрішній контур керування струмом і зовнішній

контур керування швидкістю. Це забезпечує оптимальну роботу двигуна у широкому діапазоні режимів. РМа-SynRM описується у dq-системі координат рівняннями напруги:

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_e L_q I_q \quad (4.28)$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_e (L_d I_d + \Psi_m) \quad (4.29)$$

Ці рівняння є основою для визначення взаємозв'язку між струмами, напругами та електромагнітним моментом.

У методі MFC рівняння керування розбиваються на відому частину (системні параметри) і невідому частину (F), яка включає всі непередбачувані зміни. Рівняння струмів у dq-системі координат у моделі MFC записуються як:

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{\omega_e L_q}{L_d} I_q + \frac{1}{L_d} V_d \quad (4.30)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{\omega_e L_d}{L_q} I_d + \frac{\omega_e \Psi_m}{L_q} + \frac{1}{L_q} V_q \quad (4.31)$$

У внутрішньому контурі MFC забезпечується регулювання струмів I_d і I_q для досягнення необхідного обертового моменту. Використовуючи принцип MFC, відома частина моделі струму описується як:

$$\alpha_1 = -\frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{\omega_e L_q}{L_d} I_q, \quad \alpha_2 = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{\omega_e L_d}{L_q} I_d + \frac{\omega_e \Psi_m}{L_q} \quad (4.32)$$

Невідома частина F оцінюється спостерігачем у реальному часі:

$$F_1 = \frac{dI_d}{dt} - \alpha_1, \quad F_2 = \frac{dI_q}{dt} - \alpha_2 \quad (4.33)$$

Закон керування напругою для dq-струмів записується як:

$$V_d = L_d \frac{dI_d}{dt} + \widehat{F}_1 \quad (4.34)$$

$$V_q = L_q \frac{dI_q}{dt} + \widehat{F}_2 \quad (4.35)$$

де $\widehat{F}_1$ і $\widehat{F}_2$ — оцінки невідомих частин.

Зовнішній контур відповідає за регулювання швидкості двигуна (ω_m) і генерує еталонні значення струмів I_d і I_q для внутрішнього контуру. Динаміка механічної частини двигуна описується рівнянням:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B_f \omega_m) \quad (4.36)$$

де:

- J — момент інерції ротора;
- T_e — електромагнітний момент, обчислений за формулою:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\Psi_m I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (4.37)$$

- T_L — момент навантаження;
- B_f — коефіцієнт в'язкого тертя.

Еталонний струм I_q^{ref} генерується на основі бажаної швидкості ω_{mref} :

$$I_q^{\text{ref}} = \frac{2}{3 n_p \Psi_m} T_e^{\text{ref}} \quad (4.38)$$

Контур керування швидкістю використовує зворотний зв'язок із компенсацією похибки. Закон управління має вигляд:

$$u_\omega = K_p^\omega (\omega_m^{\text{ref}} - \omega_m) + K_i^\omega \int (\omega_m^{\text{ref}} - \omega_m) dt \quad (4.39)$$

де K_p^ω і K_i^ω — коефіцієнти пропорційного й інтегрального посилення.

Повна модель керування для MFC включає:

1. Внутрішній контур керування струмом із динамікою:

$$\frac{dI_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{\omega_e L_q}{L_d} I_q + \frac{1}{L_d} V_d \quad (4.40)$$

$$\frac{dI_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{\omega_e L_d}{L_q} I_d + \frac{\omega_e \Psi_m}{L_q} + \frac{1}{L_q} V_q \quad (4.41)$$

2. Зовнішній контур керування швидкістю:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B_f \omega_m) \quad (4.42)$$

де T_e регулюється через I_d і I_q , визначені у внутрішньому контурі.

Таким чином, розроблена модель керування струмом і швидкістю з використанням MFC забезпечує ефективне та стабільне керування РМа-SynRM. Ця модель дозволяє адаптувати керування до змінних умов і гарантує високу точність і енергоефективність системи електропривода.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Системний підхід до управління охороною праці на виробництві

Охорона праці на виробництві є невіддільною складовою безпечної діяльності підприємства та забезпечення здоров'я працівників. Її основні принципи базуються на системності, стандартизації, оптимальності та динамічності, що дозволяє інтегрувати заходи з безпеки праці у всі аспекти виробничої діяльності [21].

Системність у цьому контексті означає, що всі процеси безпеки повинні бути взаємопов'язаними та спрямованими на досягнення єдиної мети – створення безпечних умов праці. Це досягається шляхом інтеграції безпеки праці у загальну систему управління підприємством. Зокрема, на всіх рівнях управління – від робочих місць до стратегічних рішень – впроваджуються стандарти і процедури, які регулюють виконання функцій охорони праці.

Основою управління охороною праці є організація процесу збору й аналізу інформації щодо умов праці. Це дозволяє виявляти відхилення від встановлених стандартів, оцінювати ризики та розробляти заходи для їх мінімізації. Такий підхід включає методи організаційно-розпорядчого, економічного, соціально-психологічного характеру, які спрямовані на досягнення безпеки на всіх рівнях.

Державне регулювання також є важливою складовою охорони праці. Державні органи інформують суспільство про виконання національних програм з охорони праці, рівень виробничого травматизму та причини аварійності, а також про вжиті заходи для підвищення безпеки праці. Статистична звітність щодо умов праці ведеться централізовано, що забезпечує можливість моніторингу загального стану безпеки в галузі.

Керуючий орган системи управління охороною праці (УОП) координує діяльність усіх підрозділів підприємства, що відповідають за створення

безпечних умов. Об'єктами управління виступають робочі місця, ділянки та цехи. Завдання служби охорони праці включають прогнозування заходів, збір та аналіз первинної інформації, розробку впливових заходів і стимулювання дотримання правил безпеки. Служба охорони праці, яка підпорядковується безпосередньо керівнику підприємства, виконує контроль та організаційно-методичну підтримку всіх заходів у цій сфері.

Ієрархічна структура УОП забезпечує багаторівневий підхід до вирішення завдань охорони праці. На рівні підприємств створюються спеціалізовані служби, які впроваджують заходи з автоматизації виробничих процесів, усунення ручної праці, покращення вентиляції, профілактики професійних захворювань. На рівні галузі впроваджуються стандартизовані підходи до управління безпекою праці, координується проведення науково-дослідних робіт та розробка галузевих планів.

Контроль за дотриманням умов охорони праці є ключовим елементом забезпечення безпеки. Він дозволяє виявляти порушення, оцінювати ефективність заходів і відповідність нормативам. Методи контролю включають перевірку якості виробничих процесів, технічного стану обладнання, моніторинг параметрів шкідливих факторів. Результати оцінок використовуються для вдосконалення системи охорони праці.

Фінансування заходів з охорони праці здійснюється за рахунок спеціальних фондів, які створюються на підприємствах, у галузях і на державному рівні. Ці фонди спрямовуються на реалізацію національних програм, розвиток науково-дослідної бази, стимулювання колективів і працівників за досягнення у сфері охорони праці [22].

Ефективна система управління охороною праці на підприємстві сприяє зниженню рівня травматизму, покращенню умов праці та підвищенню загальної продуктивності. Впровадження морального та матеріального стимулювання працівників за дотримання правил безпеки дозволяє створити культуру безпеки,

де кожен співробітник розуміє важливість свого внеску в забезпечення безпечного виробничого середовища.

Охорона праці на виробництві є ключовим аспектом забезпечення безпечної та ефективної роботи підприємства. Важливим компонентом управління є використання планування, прогнозування та аналізу даних, що дозволяє ідентифікувати ризики та своєчасно впроваджувати заходи щодо їх мінімізації. Наприклад, постійний моніторинг умов праці, оцінка технічного стану обладнання та аналіз факторів ризику допомагають визначити слабкі місця в системі безпеки. Завдяки цьому підприємства можуть розробляти інноваційні програми з охорони праці, що враховують сучасні виклики та потреби.

Однією з важливих функцій управління охороною праці є забезпечення відповідності чинному законодавству та стандартам. У цьому контексті роль державних органів є надзвичайно важливою, оскільки вони не лише контролюють дотримання норм, але й надають рекомендації щодо впровадження новітніх технологій і стандартів. Наприклад, державні інспекції регулярно здійснюють перевірки, результати яких використовуються для вдосконалення внутрішніх процесів підприємств. Це дозволяє запобігти виникненню аварійних ситуацій, знизити рівень травматизму та захворювань серед працівників.

Розвиток системи охорони праці передбачає активне впровадження механізації та автоматизації виробничих процесів. Зменшення обсягу ручної праці та впровадження сучасних технологій дозволяють не лише підвищити продуктивність праці, але й знизити рівень впливу шкідливих виробничих факторів на працівників. Наприклад, автоматизація важких та небезпечних операцій дозволяє мінімізувати ризик травмування. Крім того, вдосконалення систем вентиляції, освітлення та робочого простору забезпечує комфортні умови праці, що позитивно впливає на здоров'я та мотивацію працівників.

Не менш важливим аспектом є інформування та навчання працівників. Регулярні інструктажі, навчальні програми та перевірка знань дозволяють

підвищити рівень обізнаності працівників щодо правил безпеки. Освітні заходи допомагають працівникам зрозуміти важливість дотримання правил і відповідальність за безпечну поведінку. Відповідно, добре підготовлений персонал може оперативно реагувати на можливі загрози та приймати ефективні рішення в критичних ситуаціях.

Фінансування є ще одним важливим компонентом системи охорони праці. Створення фондів охорони праці дозволяє акумулювати ресурси для реалізації програм безпеки. Ці кошти спрямовуються на вдосконалення технологічного обладнання, проведення наукових досліджень, розвиток нових підходів до забезпечення безпеки праці. Окрім того, фонди використовуються для стимулювання працівників і колективів, які демонструють високу відповідальність та ініціативність у сфері охорони праці.

Інтеграція всіх перелічених елементів у єдину систему управління охороною праці сприяє формуванню культури безпеки на виробництві. Завдяки системному підходу підприємства можуть не лише знижувати рівень травматизму, але й підвищувати загальну ефективність діяльності. Це є критично важливим для створення умов сталого розвитку, що враховують інтереси працівників, суспільства та економіки.

Розвиток культури охорони праці на виробництві потребує постійного вдосконалення управлінських підходів, що охоплюють всі рівні організації. Одним із ключових елементів є інтеграція управління охороною праці у стратегічне планування підприємства. Це передбачає розробку довгострокових програм, спрямованих на покращення умов праці, впровадження сучасних технологій та мінімізацію ризиків. Стратегічний підхід дозволяє враховувати можливі зміни в умовах ринку, регуляторних вимогах та технічних стандартах, що забезпечує адаптивність системи охорони праці.

Особливу роль у забезпеченні безпеки праці відіграє система моніторингу. Використання сучасних технологій, таких як датчики, системи

відеоспостереження та автоматизовані платформи аналізу даних, дозволяє отримувати актуальну інформацію про стан робочих місць у режимі реального часу. Це дає змогу оперативно реагувати на відхилення від норм, виявляти потенційні небезпеки та впроваджувати превентивні заходи. Таким чином, система моніторингу стає основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері охорони праці.

Розробка й впровадження технологій автоматизованого управління є наступним кроком у розвитку охорони праці. Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання у процеси управління дозволяє прогнозувати ризики, оптимізувати розподіл ресурсів і автоматично адаптувати заходи безпеки до змінних умов. Наприклад, використання алгоритмів для аналізу великих обсягів даних допомагає ідентифікувати приховані ризики та формувати рекомендації для зменшення їхнього впливу на працівників. Такі підходи стають особливо важливими для великих підприємств із комплексними виробничими процесами.

Мотивація працівників залишається важливою складовою культури охорони праці. Система морального та матеріального стимулювання, що враховує внесок працівників у покращення умов праці, сприяє підвищенню відповідальності та активності персоналу. Наприклад, регулярне заохочення за дотримання правил безпеки чи участь у проєктах з підвищення продуктивності формує позитивне ставлення до заходів охорони праці. Це не лише підвищує рівень безпеки, але й сприяє формуванню здорової корпоративної культури.

Впровадження міжнародних стандартів у сфері охорони праці є ще одним важливим напрямком розвитку. Використання таких стандартів, як ISO 45001, дозволяє забезпечити єдиний підхід до управління безпекою праці на підприємствах, що працюють у глобальній економіці. Це створює можливості для покращення внутрішніх процесів, підвищення конкурентоспроможності та формування позитивного іміджу підприємства. Завдяки дотриманню

міжнародних стандартів компанії можуть забезпечити високий рівень безпеки праці, що відповідає сучасним світовим вимогам.

5.2 Система захисту населення і територій в умовах надзвичайних ситуацій

Захист населення і територій у разі виникнення надзвичайних ситуацій є одним із ключових завдань національної безпеки. Він охоплює комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, інфраструктури та довкілля під час техногенних, природних, соціально-політичних чи військових подій, що загрожують життю і здоров'ю людей або завдають значної шкоди економіці.

Основою системи захисту є концепція, затверджена законодавством, яка визначає загальні цілі, завдання та механізми реагування. Основними принципами цієї концепції є своєчасне виявлення загроз, координація між органами державної влади та місцевого самоврядування, максимальна мобілізація ресурсів для запобігання або мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій. В Україні такі заходи регулюються відповідними законами та указами, які визначають порядок і структуру системи цивільного захисту.

Класифікація надзвичайних ситуацій є важливим елементом концепції, що дозволяє систематизувати підходи до їхньої ліквідації. Залежно від походження подій, надзвичайні ситуації поділяються на техногенні, природні, соціально-політичні та військові. Техногенні ситуації включають аварії на промислових підприємствах, транспортні катастрофи, вибухи та пожежі. Надзвичайні ситуації природного характеру охоплюють стихійні лиха, зокрема повені, землетруси, пожежі в екосистемах. Соціально-політичні ситуації виникають унаслідок терористичних актів, заворушень чи конфліктів. Воєнні ситуації є результатом застосування зброї масового ураження чи руйнування важливих об'єктів інфраструктури.

Для кожного типу надзвичайних ситуацій визначено заходи з підготовки, реагування та відновлення. Підготовка включає розробку планів дій, навчання населення, створення резервів ресурсів. Реагування передбачає оповіщення населення, евакуацію, надання першої допомоги та ліквідацію наслідків. Відновлення зосереджується на відбудові зруйнованих об'єктів, компенсації збитків та реабілітації постраждалих.

Особливе місце в концепції займає система моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій. Використання сучасних інформаційних технологій дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози, оцінювати масштаби їхнього впливу та розробляти сценарії реагування. Наприклад, моніторинг метеорологічних умов допомагає прогнозувати природні явища, такі як повені чи сильні шторми. Аналіз промислових об'єктів дозволяє оцінити ризики аварій із викидом небезпечних речовин.

Евакуація населення є одним із найважливіших заходів у разі виникнення надзвичайної ситуації. Для цього розробляються детальні плани, які включають маршрути евакуації, розміщення пунктів тимчасового перебування, забезпечення транспортом і продовольством. Ефективність евакуації залежить від організації системи оповіщення, яка повинна бути швидкою, надійною та доступною для всіх категорій населення.

Важливим компонентом є забезпечення медичної допомоги. У концепції передбачено створення мобільних медичних підрозділів, які можуть оперативно реагувати на події та надавати необхідну допомогу постраждалим. У разі великих надзвичайних ситуацій залучаються регіональні та національні медичні ресурси, включаючи лікарні, спеціалізовані центри та резервні запаси медикаментів.

Екологічний аспект захисту є ще одним важливим елементом концепції. Надзвичайні ситуації, особливо техногенного та природного характеру, можуть мати значний вплив на довкілля. Для мінімізації екологічних наслідків

проводяться заходи з локалізації розливу небезпечних речовин, очищення водних ресурсів, рекультивації земель. Крім того, оцінка екологічних ризиків дозволяє розробляти стратегії запобігання.

Фінансування заходів із захисту населення здійснюється за рахунок державних, місцевих бюджетів і спеціальних фондів. Ці кошти спрямовуються на придбання обладнання, підготовку персоналу, проведення навчань і створення матеріальних резервів. Ефективне управління фінансовими ресурсами дозволяє забезпечити готовність системи до реагування на будь-які надзвичайні ситуації [23].

Міжнародна співпраця є важливою складовою концепції. Україна бере участь у міжнародних програмах і проектах, спрямованих на обмін досвідом, розробку нових технологій і спільне реагування на глобальні виклики. Це дозволяє використовувати найкращі практики та інтегрувати національну систему захисту населення в міжнародну спільноту.

Реалізація концепції захисту населення та територій у разі надзвичайних ситуацій забезпечує готовність держави до ефективного реагування на загрози. Вона сприяє зменшенню людських і матеріальних втрат, підвищенню стійкості суспільства до кризових ситуацій і формуванню культури безпеки серед населення. Це є важливою умовою для забезпечення сталого розвитку та стабільності країни в сучасних умовах.

Ефективне управління системою захисту населення і територій у разі надзвичайних ситуацій потребує активної участі органів влади всіх рівнів, спеціалізованих служб і громадських організацій. Координація дій є критично важливою для забезпечення швидкого реагування на події та мінімізації їхніх наслідків. Для цього створюються спеціалізовані координаційні центри, які відповідають за організацію заходів на національному, регіональному та місцевому рівнях. У таких центрах здійснюється збір і аналіз інформації,

планування дій, контроль за їх виконанням та взаємодія між усіма задіяними сторонами.

Важливим компонентом є система оповіщення, яка забезпечує своєчасне інформування населення про загрози. Використовуються різні канали зв'язку, включаючи радіо, телебачення, мобільний зв'язок, системи гучномовців. Сучасні технології дозволяють інтегрувати автоматизовані системи оповіщення з моніторинговими платформами, що дозволяє оперативно передавати інформацію про надзвичайну ситуацію та рекомендації щодо дій населення. Наприклад, сповіщення про необхідність евакуації або укриття може здійснюватися одночасно через кілька каналів, що мінімізує ризик пропуску повідомлень.

Реалізація заходів із забезпечення громадської безпеки включає підготовку населення до дій у разі надзвичайних ситуацій. Для цього проводяться навчання, тренування, створюються навчальні матеріали та проводиться просвітницька робота. Особлива увага приділяється підготовці дітей, літніх людей і осіб із обмеженими можливостями, які можуть потребувати додаткової підтримки в екстремальних умовах. Наприклад, у школах і на підприємствах регулярно проводяться навчальні евакуації, інструктажі та практичні заняття з основ надання першої допомоги [24].

Система підготовки персоналу спеціалізованих служб також має важливе значення. Рятувальники, медичні працівники, інженери та інші фахівці проходять спеціалізовані навчання, які включають як теоретичну підготовку, так і практичні вправи. Це дозволяє їм діяти злагоджено та ефективно в умовах обмеженого часу і підвищеного ризику. Крім того, створюються резерви техніки, обладнання та матеріалів, які можуть бути швидко мобілізовані у разі потреби.

Інфраструктура укриттів і захисних споруд є ще одним важливим елементом концепції. Укриття забезпечують фізичний захист населення від впливу небезпечних факторів, таких як вибухи, хімічне або радіаційне

забруднення. Розробка планів розташування таких споруд, їхнє оснащення та підтримка у належному стані є пріоритетом для органів місцевого самоврядування та відповідних служб.

Окремо варто виділити питання відновлення після надзвичайних ситуацій. Відновлювальні заходи включають ремонт пошкодженої інфраструктури, забезпечення житлом постраждалих, надання психологічної допомоги та відновлення економічної діяльності. Для цього розробляються спеціальні програми, які передбачають координацію зусиль урядових і неурядових організацій, використання місцевих і міжнародних ресурсів.

Економічна складова захисту також потребує уваги. Інвестиції у систему захисту дозволяють значно знизити втрати від надзвичайних ситуацій у майбутньому. Наприклад, витрати на зміцнення дамб і мостів, модернізацію технологічного обладнання, вдосконалення систем моніторингу є виправданими, оскільки вони мінімізують ризик великих руйнувань. Крім того, існують спеціальні фонди, кошти яких спрямовуються на підтримку постраждалих, компенсацію втрат та фінансування заходів із запобігання катастрофам.

Міжнародна співпраця у сфері захисту населення від надзвичайних ситуацій дозволяє обмінюватися досвідом, залучати новітні технології та підходи, а також отримувати підтримку у кризових ситуаціях. Наприклад, Україна бере участь у міжнародних програмах, таких як Механізм цивільного захисту ЄС, що дозволяє отримувати допомогу від партнерів у разі великих надзвичайних ситуацій.

Завдяки інтеграції різних елементів системи захисту в єдину концепцію держава може забезпечити ефективну готовність до реагування на надзвичайні ситуації. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив катастроф, зберегти життя і здоров'я населення, забезпечити економічну стабільність і захист довкілля. Формування культури безпеки серед громадян, розвиток технологій і

міжнародної співпраці створюють основу для подальшого вдосконалення системи захисту населення в сучасних умовах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Робота демонструє комплексний підхід до проектування, моделювання та оптимізації електропривода для електромобілів, що забезпечує високу енергоефективність, надійність та екологічність у сучасному транспорті. В результаті виконання роботи можна виокремити наступні висновки:

1. Тенденції розвитку ринку електромобілів у світі та Україні свідчать про стрімке зростання попиту на екологічний транспорт, зумовлене глобальними ініціативами щодо зменшення викидів CO₂, зростанням енергоефективності, а також державними програмами підтримки. У розвинених країнах частка електромобілів на ринку досягає 20–80% залежно від регіону, тоді як в Україні ринок перебуває на початковій стадії розвитку, демонструючи позитивну динаміку.

2. Проведено класифікацію тягових двигунів електромобілів, включаючи двигуни постійного струму, асинхронні, синхронні реактивні, синхронні з постійними магнітами та комбіновані. Детально описано конструкцію, принцип роботи, переваги й недоліки кожного типу. На основі аналізу встановлено, що синхронні реактивні двигуни із постійними магнітами є оптимальними для електромобілів завдяки високому ККД, компактності та стабільності роботи.

3. Розроблено математичну модель P_{Ma}-SynRM та трифазного інвертора. Описано основні електромагнітні процеси, включаючи взаємозв'язок між струмами, напругами та моментом. Це забезпечує точність у прогнозуванні поведінки електропривода та дозволяє ефективно налаштовувати системи керування.

4. Проведено порівняння Model-Based Control (MBC) і Model-Free Control (MFC). Встановлено, що MFC є більш перспективним для систем із невідомими або змінними параметрами завдяки його адаптивності та низьким обчислювальним витратам. Це робить MFC оптимальним вибором для сучасних електромобілів.

5. Розроблено каскадну систему керування для PМа-SynRM на основі MFC, яка включає внутрішній контур керування струмом і зовнішній контур керування швидкістю. Математично описано закони керування і принципи роботи контролера. Це забезпечує стабільність, точність і ефективність керування електроприводом у різних режимах роботи.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2021: Accelerating Ambitions Despite the Pandemic. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
2. Guzzella, L., & Sciarretta, A. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. Springer, 2013.
3. Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. CRC Press, 2017.
4. Høyer, K. G. The History of Alternative Fuels in Transportation: The Case of Electric and Hybrid Cars. *Energy Policy*, 36(3), 2008, pp. 1019–1032.
5. Міронов Д.В. Конспект лекцій з дисципліни «Електричні та гібридні транспортні засоби» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» денної та заочної форми навчання / Укл.: Д.В. Міронов – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 154 с.
6. Vagati, A., & Pastorelli, M. SynRM: A New Challenge for High-Performance Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4), 2002, pp. 917–925.
7. Krings, A., & Monissen, C. Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE International Conference on Electrical Machines*, 2020, pp. 1–8.
8. Wang, Y., & Liu, R. Trends in Traction Motor Technologies: From DC to Advanced AC Drives. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(3), 2019, pp. 1203–1214.
9. Morimoto, S., & Sanada, M. High-Power-Density Permanent Magnet-Assisted SynRM for EV Applications. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 49(5), 2013, pp. 1308–1315.

10. Міронов Д.В. Електричні та гібридні транспортні засоби. Методичні вказівки до виконання практичних робіт / Д.В. Міронов, Тесля В.О. – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 65 с.
11. Bizon, N., & Thounthong, P. Modeling and Control of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors. *MDPI Sustainability*, 14(5), 2022, Article 5423.
12. Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. *Design of Rotating Electrical Machines*. Wiley, 2013.
13. Fang, Z., & Yuan, X. Dynamic Modeling of PMA-SynRM with Consideration of Saturation Effects. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(2), 2020, pp. 563–571.
14. Capecchi, E., & Guglielmi, P. Modeling of Synchronous Reluctance Motors for High Efficiency Applications. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 53(6), 2017, pp. 5204–5213.
15. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Titova, L., Hryniv, A., Mironov, D., Volianskyi, M., Rogatynskyi, R., Solomka, O., Lysenko, S. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (127)), 37–46.
16. Fliess, M., & Join, C. Model-Free Control: From Theory to Applications. *International Journal of Control*, 86(12), 2013, pp. 2228–2252.
17. Міронов Д.В. Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / Д.В. Міронов – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 62 с.
18. Precup, R.-E., & Radac, M.-B. Sliding Mode Control in Model-Free Context: Algorithms and Experiments. *Information Sciences*, 381, 2017, pp. 176–192.

19. Tranco, E., & Ibarra, E. Model Predictive Control for PМа-SynRM Drives: Performance Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(10), 2020, pp. 8356–8364.
20. Lin, C.-K., & Agustin, C. A. Modulated Model-Free Predictive Control for SynRM Drive Systems. *IEEE Access*, 9, 2021, pp. 162984–162995.
21. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»: навч. посібник / В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.
22. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська. К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2017. — 369 с.
23. Безпека в надзвичайних ситуаціях : навч. посібник для студентів ЗВО України : у 2 ч. Ч. 1: Надзвичайні ситуації / М. Л. Лисиченко, В. В. Вамболь, С. О. Вамболь, М. М. Кірієнко, І. А. Черепньов, В. М. Власовець ; за ред. М. Л. Лисиченка ; ХНТУСГ. – Харків : ТОВ “ПромАрт”, 2021. – 202 с.
24. Охорона праці на автомобільному транспорті : навчальний посібник / Пістун І. П., Хом'як Й. В., Хом'як В. В. - 2-ге вид., стер. - Суми : Університетська книга, 2015. - 374 с.