

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

Електронні інформаційні системи

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Ігор Тарасенко

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

програми Електронні інформаційні системи

(назва програми)

на тему: **Розробка засобів удосконалення керування технологічними системами електроприводу**

Здобувача (ки) групи ЕІс3-91к Тарсенко Ігор Олегович

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Ігор Тарасенко

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант¹⁾ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є силові агрегати, електричні двигуни, системи електроприводу.

Предмет дослідження є удосконалення керування технологічними системами електроприводу

Обґрунтуванням актуальності теми є те що засоби удосконалення керування технологічними системами електроприводу являється пріоритетом в всіх галузях промисловості, оскільки це рушійна сила.

Мета роботи полягає у вивченні типів, принципу роботи, та розробка засобів удосконалення керування технологічними системами електроприводу

Відповідно до мети, вирішувалися такі задачі:

- огляд сучасних систем керування електроприводом;
- розробка самої системи керування електроприводу.

Ця робота представляє огляд останніх досліджень і технічного прогресу систем електродвигунів і електричних силових агрегатів для нових транспортних засобів. Завдяки аналізу та порівнянню двигуна постійного струму, асинхронного двигуна та синхронного двигуна виявлено, що синхронний двигун із постійним магнітом має кращу загальну продуктивність, у порівнянні з перетворювачами з IGBT на основі кремнію виявлено, що перетворювачі з SiC MOSFET показують значно вищу ефективність і збільшують пробіг на одному заряді. Крім того, демонструються переваги та недоліки різних стратегій та алгоритмів керування. Різні електричні силові агрегати, гібридні силові агрегати, і електричні системи з розширеним радіусом дії також докладно описані їх переваги та недоліки.

Робота викладена на 35 сторінках, у тому числі включає 4 рисунки та 8 таблиць, список цитованої літератури із 28 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕХНОЛОГІЯ, ЕЛЕКТРОПРИВІД, ЗВОРОТНІЙ ЗВ'ЯЗОК, СИСТЕМА, ДИНАМІКА, ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ.

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 РОЗРОБКА ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ NEV	5
1.1 Класифікація та характеристика тягового двигуна НЕВ	5
1.2 Дослідження НЕВ ПМСМ.....	8
1.3 Розвиток технології PMSM	9
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ NEV MOTOR CONTROL	12
2.1 Технології керування двигунами	12
2.2 Поточні стратегії контролю (CCS).....	16
2.3 Алгоритми керування	17
2.4 ШІМ керування.....	21
2.5 Силові електронні пристрої в управлінні.....	22
РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	25
3.1 Порівняння систем приводу BEV	25
3.2 Технічні інновації та прогноз розвитку систем електроприводу NEV .	27
3.3 Інновації силової електроніки	29
3.4 Інноваційна система двигуна та трансмісії.....	30
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	33

ВСТУП

Порівняно з промисловими двигунами [1,2], тягові двигуни NEV повинні бути адаптовані до жорстких умов експлуатації. Їхні режими роботи часто перемикаються між двигуном і генератором. Часті пуски та зупинки, висока швидкість прискорення та уповільнення, високий крутний момент на низькій швидкості та висока потужність під час підйому транспортного засобу на високій швидкості, висока питома потужність, велика високоефективна робоча зона, низький рівень вібрації та шуму, висока надійність та висока продуктивність до- співвідношення ціни вимагає автомобільна промисловість.

Тягові двигуни та електронні контролери потужності двигуна є основними частинами для перетворення електромеханічної енергії в NEV.

Системи електричної трансмісії, інтегровані в механізми, зчеплення та інші механічні компоненти з тяговими двигунами та контролерами двигунів, також є незамінною системною частиною NEV. Конструкція транспортного засобу та силовий механізм значно спрощені в e-powertrain, чия топологія значно впливає на продуктивність NEV [3].

Таким чином, вимоги до систем електроприводу в NEV в основному включають такі аспекти: висока щільність крутного моменту та хороша здатність контролю крутного моменту для динамічних характеристик автомобіля, надійність і довговічність для необхідної безпеки та життя автомобіля, висока ефективність у діапазоні операцій і високе співвідношення продуктивності та вартості для економії енергії та капіталовкладень користувачів.[1,2]

Узагальнено технології тягових двигунів, їх силових електронних контролерів та електроприводів. Обговорюються переваги та недоліки існуючих технологій, їх перспективи та розвиток, що є довідковим матеріалом для дослідників та інженерів у галузі систем трансмісії NEV.

РОЗДІЛ 1

РОЗРОБКА ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ NEV

1.1 Класифікація та характеристика тягового двигуна НЕВ

Тягові двигуни в NEV в основному включають двигуни постійного струму (DCM), асинхронні двигуни (IM), двигуни з постійними магнітами (PMM) і реактивні двигуни (SRM). Серед них PMM поділяється на PM двигун постійного струму (PMDCM), PM синхронний двигун (PMSM), PM brushless DC двигун (PM-BLDCM) і PM гібридний двигун збудження (PM-HEM). Щоб зменшити залежність від матеріалів ПМ, на транспортних засобах також встановлюється синхронний двигун збудження, як показано на рисунку 1.1 .

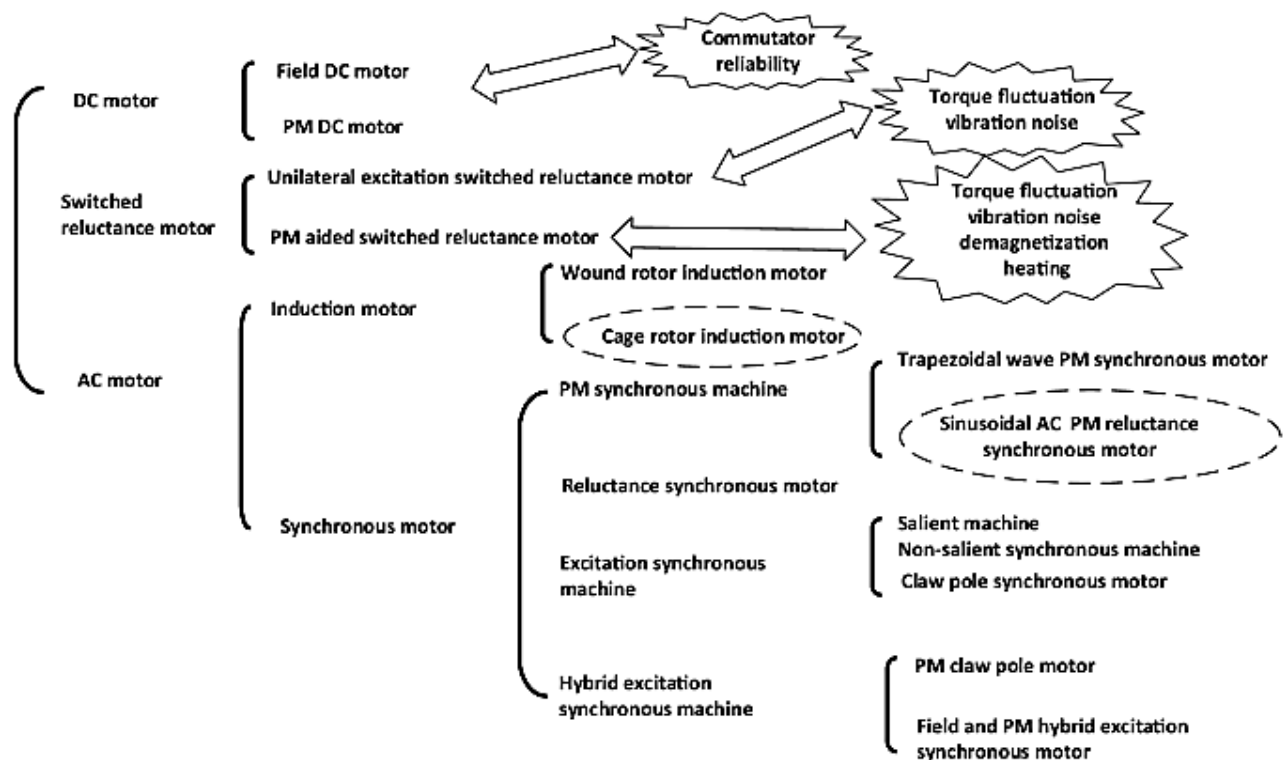


Рис.1.1 Огляд і розробка систем електричних двигунів і електричних силових агрегатів для транспортних засобів з новою енергією [4]

Двигун постійного струму. DCM використовується як тяговий двигун в електромобілях (EV) з кінця дев'ятнадцятого століття через його просте регулювання швидкості. Однак низька ефективність, велика маса та низька надійність через щітки та комутатори роблять DCM більше непридатними для високошвидкісних NEV. Вони використовуються лише в низькошвидкісних електромобілях, таких як візки для логістичних вантажів, що переміщуються всередині заводів, і маршрутні автобуси в мальовничих місцях.

Реактивний двигун. Статор і ротор SRM складаються з кремнієвих сталевих ламінатів і мають структуру з помітними полюсами. На роторі немає обмоток, контактних кілець і ПМ, а на статорі встановлені тільки прості зосереджені обмотки. Конструкція ротора забезпечує просту, надійну, недорогу та високу швидкість роботи SRM. Крім того, надійна топологічна структура його інвертора запобігає коротким замиканням. Висока ефективність і простота управління - переваги SRM. Однак коливання крутного моменту, шум і вібрація серйозно перешкоджають його застосуванню в NEV.

Асинхронний двигун. ІМ широко використовуються в NEV. Їх статор і ротор складаються з ламінованих листів кремнієвої сталі, а трифазні обмотки вставляються всередину пакета ламінування статора, а алюмінієві або мідні шини в пази ротора з кільцями на обох кінцях. ІМ характеризуються простою і міцною конструкцією, низькою вартістю, високою надійністю, малими пульсаціями крутного моменту, низьким рівнем шуму та не потребують обслуговування. ІМ можна легко запускати на високій швидкості понад 15 000 обертів на хвилину з широким постійним діапазоном потужності. Однак схема керування ІМ є складною, а їх ефективність і щільність потужності відносно низькі порівняно з PMSM, що призводить до все меншої частки ринку в усьому світі [4]

Двигун з постійними магнітами. Двигун постійного струму з постійним магнітом. Коли обмотки збудження та магнітні полюси звичайних DCM замінюються на ПМ, встановлюється PM-DCM. PM-DCM показують вищу щільність потужності та ефективність, але вони потребують більшого

обслуговування та мають низький термін служби та коливання крутного моменту через комутатор і систему щіток; це все ще проблеми, які потрібно вирішити для додатків EV.

Синхронний двигун з постійними магнітами. У PMSM його статор із трифазними обмотками такий самий або схожий на IM або статор синхронного двигуна, а PMs замінюють обмотку збудження традиційних синхронних двигунів. Відповідно до положення PMSM на або в роторі, PMSM можна розділити на поверхневий PMSM (SPM) і внутрішній вбудований тип (IPM). Добре сконструйовані IPM відрізняються високим опорним моментом, високою ефективністю, високим коефіцієнтом потужності, низьким нагріванням, простою конструкцією, невеликим корпусом і низьким рівнем шуму. З розвитком стратегії управління силовою електронікою IPM стали домінуючими в застосуваннях тягових двигунів. Крім того, завдяки повністю закритій конструкції IPM, не потребуючи технічного обслуговування, демонструють низькі втрати на тертя від вітру та низький шум від вітру.

Безщітковий двигун постійного струму з постійним магнітом. PM-BLDCM структурно та теоретично є спеціальним PMSM, але його обмотки сконцентровані нормально, а форма хвилі струму статора є трапецієподібною, а не синусоїдальною в SPM. Колекторно-щіткова система не потрібна. Однак коливання крутного моменту та шум з'являються під час електричної комутації, і важко досягти максимальної швидкості, що перевищує подвійну базову швидкість. Порівняння продуктивності вищезгаданих двигунів показано в таблиці 1.1

Гібридний двигун збудження з постійним магнітом. Додавши обмотки збудження до PMSM, двигун має як PM, так і обмотки збудження і стає гібридним двигуном із збудженням, тобто PM-HEM. Цей двигун має мінімальний витік потоку, високу щільність потоку в повітряному зазорі, високу щільність потужності та хороші характеристики момент-швидкість. Однак його топологія та керування є відносно складними через два окремих збудження.

Таблиця 1.1 Порівняння продуктивності двигунів [4]

Таблиця 1.1

Індекс	DCM	IM	IPM	SRM
Ефективність	●	●●	●●●	●
швидкість	●	●●●	●●	●●●
Розмір	●	●●	●●●	●●
Надійність	●	●●	●●●	●●●
Простота керування	●●●	●●	●	●●
Продуктивність	●	●●	●●●	●●

У таблиці 1.1 ●, ●●, ●●● представляють низький (поганий), середній і високий (добрий) індекси відповідно. Таким чином, PMSM, особливо IPM, є найкращим вибором для тягових двигунів NEV.

1.2 Дослідження НЕВ ПМСМ

Новий тип насичених постійним струмом гібридних двигунів збудження був запропонований у роботі. За допомогою введення додаткового збудження поля постійного струму з можливістю насичення постійного струму, магніторезистивний ефект був створений у задньому полюсі Vernier PMSM (CP-VPMSM). У цій топології поєднується двонаправлене керування потоком реактивного двигуна збудження постійного струму статора та хороша щільність крутного моменту в CP-VPMSM. Був запропонований метод проектування, орієнтований на гармоніку повітряного зазору. Було прийнято посилення магнітного потоку, і його характеристики становили $L_d > L_q$, який можна

використовувати в безсенсорних системах керування двигуном. Використовуючи спеціальну конструкцію зубів статора, довжину повітряного зазору на осі q було збільшено, щоб отримати високий крутний момент, хорошу відмовостійкість і високу надійність. Далі було запропоновано метод гібридної схеми для підвищення ефективності намотаних синхронних тягових двигунів. Змінюючи з'єднання між обмотками U , V , W та обмотками X , Y , Z , ефективність на високій швидкості може бути покращена.

Пульсації крутного моменту та зв'язок між внутрішніми/зовнішніми магнітними полями складного збудження РММ зменшуються за допомогою аналізу кінцевих елементів у Ref.

Для PMSM зі складною структурою подвійної помітності, подвійних статорів і подвійних повітряних зазорів для вибору ключових розмірних параметрів використовувався метод оптимізації з кількома чутливими об'єктами. Крім того, оптимізовані геометричні розміри були отримані методом оптимізації поверхні відгуку. Далі обговорювався шестифазний PMSM із зосередженою обмоткою з дробовими пазами з можливістю відмовостійкості.

На основі аналізу гармонік електрорушійної сили магніту була запропонована нова схема узгодження полюсів і пазів для зменшення втрат на вихрові струми ФПМ, викликаних зосередженими обмотками, і для зменшення кількості полюсів ротора, а отже, і втрат в сердечнику статора [6]

1.3 Розвиток технології PMSM

Майбутні технології тягових двигунів для NEV зосереджуються на таких ключових факторах, як висока ефективність, висока швидкість, висока питома потужність, низький рівень вібрації та шуму, краща електромагнітна сумісність (EMC) і низька вартість. У дорожній карті розвитку електромобілів до 2025 року, запропонованій Міністерством енергетики США, двигуни електромоторів спрямовані на досягнення високої ефективності (97%), високої щільності потужності (50 кВт/л) і низької вартості (3,3 \$/кВт). У «Дорожній карті

енергозбереження та нових енергетичних транспортних засобів 2.0» цілі на 2025 рік визначені як питома потужність (співвідношення потужності до маси) 5,0 кВт/кг, щільність потужності (співвідношення потужності до об'єму) 35 кВт/л, а піковий ККД 97% для тягових двигунів. Для досягнення цих цілей глобальні постачальники тягових двигунів NEV та дослідницькі установи співпрацюють, щоб покращити ланцюг інновацій та ланцюжок постачальників, включаючи компоненти та матеріали.

Технології намотування з високим коефіцієнтом заповнення щілин. Використовуючи обмотки з високим коефіцієнтом заповнення пазів із плоскими/прямокутними проводами або шпильковими обмотками, можна значно зменшити нагрівання обмотки, а коефіцієнт використання мідних матеріалів обмотки можна збільшити на 15–20%, що є основним методом покращення щільності крутного моменту, щільності потужності та ефективності. Наприклад, питома потужність 4,6 кВт/кг досягається в двигуні GM VOLT через шпилькові крила.

Технологія високошвидкісного двигуна. Розмір двигуна пропорційний його крутному моменту. Для двигуна з заданою вимогою до потужності його потужність дорівнює крутному моменту, помноженому на швидкість. Збільшуючи робочу швидкість, можна зменшити вимоги до крутного моменту для двигуна, тим самим зменшуючи об'єм і вагу двигуна, а його питома потужність збільшується зі швидкістю. Наприклад, швидкість тягового двигуна 17 900 об/хв використовується в Tesla Model 3, а швидкість двигуна 25 000 об/хв планується досягти до 2035 року в технологічній дорожній карті NEV 2.0 Китаю.

Ефективні технології управління теплом. Охолодження ґрунту, комбіноване охолодження маслом і водою, а також нові топології охолодження використовуються для вдосконалення технологій охолодження та теплопередачі тягових двигунів, і, відповідно, питома потужність двигунів підвищується.

PMSM для NEV досягли постійного прогресу в усьому світі щодо щільності потужності, системної інтеграції, ефективності, максимальної робочої швидкості, процесу виробництва обмоток і технологій охолодження. Технічні показники типових моторних виробів наведені в таблиці 1.2 .

Таблиця 1.2 Показники типових моторних виробів [7]

Таблиця 1.2

Технічні показники	Бренд у Китаї	GM Болт	Німеччина Bosch	Тесла Модель 3
Пікова потужність (кВт)	130	130	150	165
Макс. швидкість (об/хв)	13 200	8810	16 000	17 900
Піковий крутний момент (Н·м)	315	360	310	416
Пікова ефективність (%)	97	97	97	97
Питома потужність (кВт/кг)	4.56	4.60	4.40	4.50
Спосіб охолодження	олія	вода	вода	вода

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ NEV MOTOR CONTROL

2.1 Технології керування двигунами

Сьогодні PMSM вимагає, щоб його стратегії керування мали швидку динамічну реакцію системи, високу динамічну/статичну точність і сильну здатність протидіяти перешкодам.

Однак моделі PMSM є нелінійними; з сильним зв'язком, параметрами, що змінюються в часі, кількома змінними та великими збуреннями, його алгоритми керування є складними. Тому на продуктивність двигунів безпосередньо впливають стратегії керування. Типові стратегії керування включають постійне співвідношення напруга/частота, класичне диференціювання пропорційної інтеграції (PID), орієнтований на поле підхід, прямий крутний момент, змінну структуру режиму ковзання, адаптивне та інтелектуальне керування [8]

Серед технологій керування PMSM метод керування зі змінною напругою та змінною частотою (VVVF) має абсолютні переваги в продуктивності завдяки наступним трьом методам: керування постійною напругою на частоту (тобто $V / F = \text{const}$), яке є відкритим . -контурний тип і базується на моделях двигунів у стаціонарному стані, польовому управлінні (FOC) і прямому крутному моменті (DTC).

Останні два є замкнутими типами і базуються на динамічних моделях двигунів. Порівняння трьох методів управління двигуном представлено в таблиці 2.1 .

Таблиця 2.1 Порівняння продуктивності трьох технологій керування двигуном [9]

Таблиця 2.1

Технологія контролю	Структурна складність	Стійкість до збурень параметрів	Початок виконання	Пульсації крутного моменту	Діапазон швидкостей
V/F управління	просто	Низький	Грубий	Високий	вузькі
FOC	Комплекс	Високий	Плавно	Високий	Широкий
DTC	Комплекс	Високий	Плавно	Відносно високий	Широкий

Регулювання постійного співвідношення V / F , також відоме як керування постійним потоком, може отримати постійний потік, гарантуючи, що напруга статора на частоту залишається постійною. Контроль за станом зі зворотним зв'язком був прийнятий у системі координат NT, і був запропонований новий безсенсорний метод керування V / F для PMSM. Коли двигун працював на низькій швидкості, струм осі T використовується для підтримки високої стабільності системи. Для стабільної роботи двигуна на середніх і високих частотах додається петля стабільності швидкості, а для компенсації витягується компонент активної потужності [10].

V / F керування є відносно поширеним методом керування швидкістю ІМ з перевагами простоти, ефективності та високої стійкості до зміни параметрів. Однак, оскільки це керування з відкритим контуром, точність керування, динамічний відгук і навантажувальна здатність систем знижуються через дрейфи швидкості та потоку в управлінні з відкритим контуром V/F , що призводить до поганої можливості запуску, висока пульсація крутного моменту

та вузький діапазон швидкості. Тому елементи керування V / F рідко використовуються в управлінні тяговим двигуном автомобіля.

FOC був запропонований Blaschke у 1970-х роках. Струм статора було розділено на компонент крутного моменту та намагнічено під постійним потоком ротора в спеціальній системі координат $dq0$, і керування двигунами змінного струму (АС) може бути еквівалентним керуванню двигуном постійного струму без збудження. FOC може досягти плавного запуску, низьких коливань крутного моменту та широкого діапазону швидкості, що підходить для високої динамічної реакції машин у важких умовах роботи.

Стратегія векторного керування запропонована на основі діаграми «швидкість двигуна — крутний момент — струм». Потреба в електроенергії та енергоспоживання були ефективно зменшені, а запас ходу автомобіля був збільшений. Було запропоновано стратегію керування послабленням потоку за допомогою оцінювача з покращеною невизначеністю та збуреннями. Введено коригуючий коефіцієнт ослаблення потоку для згладжування пульсацій крутного моменту при кутовій швидкості двигуна. Таким чином, міцність у зоні ослаблення потоку підвищується.

Налаштування динамічної моделі двигуна в двофазній обертовій координаті є ключем до успішного FOC, що закладає основу для високої динамічної реакції в суворих умовах роботи.

DTC був запропонований Depenbrock, при цьому петля струму в системі FOC була видалена, і не було потрібно складне перетворення координат. Двобітове керування bangbang використовується для генерації сигналів модуляції ШІМ у двофазній статичній координаті. DTC має такі переваги, як проста структура, швидка динамічна відповідь, низька чутливість до збурень параметрів і висока надійність, тому підходить для застосувань, які вимагають швидкої динамічної реакції та широкого регулювання швидкості. Однак він також має недоліки, пов'язані з пульсаціями струму та крутного моменту на низьких швидкостях і вимогою до високої частоти вибірки. Багато вчених

поєднують широтно-імпульсну модуляцію просторового вектора (SVPWM) і DTC, щоб зменшити ці брижі [13]

Було запропоновано вдосконалену стратегію керування з використанням методу квадратичної оцінки (QEM) і методів усунення гармонічної напруги (HVEM). Отримано кінцевий вектор напруги, що пригнічує гармонічний струм статора; Таким чином, швидка динамічна відповідь і хороша стійка продуктивність залишилися незмінними.

Була запропонована нова багатомашинна надійна схема DTC, заснована на методі прогнозування нелінійної моделі (NMP). Він досягнув функцій регулювання ковзання при прискоренні (ASR) і антиблокувальної гальмівної системи (ABS) чотирьох коліс PMSM, а також покращив водіння та стабільність автомобіля. Пропонується стратегія прогнозування нечіткої моделі DTC (FMP-DTC) для IPM EV.

Коригування вагового коефіцієнта більше не потрібно для вибору оптимального стану перемикача. Були досягнуті миттєва реакція на крутний момент, невеликі пульсації крутного моменту та точне відстеження швидкості. Була запропонована стратегія розподілу вектора напруги, заснована на схемі управління з двопросторовою векторною ШІМ. Вибравши найбільш відповідний режим, частоти перемикання двох інверторів можна збалансувати та зменшити, а також можна отримати розподіл потужності в максимальному діапазоні.

Контроль DTC, хоч і простий, має чудові динамічні та статичні характеристики. Однак він має обмеження щодо збільшення частоти перемикання інвертора [12]

Немає контуру струму, і захист від струму слід виконувати безпосередньо, тому необхідні додаткові вимірювання для обмеження струмів. «Ефект мертвого часу» також очевидний на низькій швидкості, і зміна опору статора призведе до спотворення струму статора та потокозчеплення.

2.2 Поточні стратегії контролю (CCS)

Стратегії керування РМ включають $i_d = 0$, максимальний крутний момент на ампер (МТРА), максимальний крутний момент на вольт (МТРV), керування ослабленням потоку (FWC), одиничний коефіцієнт потужності ($\cos \Phi = 1$). Порівняння ефективності цих поточних стратегій контролю показано в таблиці 2.2 .

Таблиця 2.2 Порівняння ефективності поточних стратегій контролю [13]

Таблиця 2.2

Поточна стратегія контролю	Складність алгоритму	Максимальний крутний момент	Діапазон швидкостей	Міцність	Ефективність	Коефіцієнт потужності
$i_d = 0$	просто	Маленький	Загальний широкий	Високий	Низький	Низький
МТРА	Комплекс	Великий	Широкий	Низький	Високий	Загальний високий
МТРV	Комплекс	Великий	Широкий	Низький	Високий	Загальний високий
FWC	Комплекс	Маленький	Широкий	Низький	Високий	Загальний високий
$\cos \Phi = 1$	просто	Маленький	Широкий	Високий	Високий	Високий

1 $i_d = 0$ Контролі

Перевагами цієї стратегії управління є простота алгоритму, невеликі обчислення та відсутність ефекту розмагнічування, що зазвичай застосовується в сервосистемах малої потужності.

Однак його коефіцієнт потужності низький. Для внутрішнього PMSM цей метод не використовує крутний момент двигуна, що знижує крутний момент двигуна. Таким чином, він використовується лише в двигунах з помірними магнітними полями (SPM) поверхневого монтажу [16]

Стратегія МТРА повною мірою використовує реактивний крутний момент двигуна, тому максимальний крутний момент значно покращується. При однаковому вихідному моменті струм статора цього методу мінімальний, що зменшує втрати міді та підвищує ККД.

Однак ця стратегія управління є складною, а надійність параметрів не дуже висока.

МТРV повною мірою використовують еліпс обмеження напруги та напругу шини постійного струму. За допомогою цього методу можна досягти високої потужності інвертора, максимального вихідного крутного моменту в діапазоні ослаблення потоку та швидкої реакції системи. Однак цей алгоритм керування відносно складний.

FW Controls (FWC). У цьому методі потік двигуна PM зменшується шляхом збільшення струму розмагнічування осі d, що гарантує баланс напруги та покращує діапазон регулювання швидкості. Однак ця стратегія керування чутлива до збурень параметрів двигуна, що призводить до низької надійності.

$\cos \Phi = 1$ керування. Регулювання коефіцієнта потужності одиниці на основі $\cos \Phi = 1$ робить коефіцієнт потужності рівним 1 шляхом керування струмами PMSM по осі d і осі q одночасно без вихідної реактивної потужності.

Ця стратегія управління повністю використовує потужність інвертора двигуна, але його максимальний крутний момент знижується.

2.3 Алгоритми керування

Крім ПД-регулювання, представлено багато інших вдосконалених алгоритмів керування. Порівняння кількох методів контролю наведено в таблиці 2.3 .

Таблиця 2.3 Порівняння методів контролю [15]

Таблиця 2.3

Метод контролю	Переваги	Недоліки
PID	Простота, легкість у швидкості, сильна застосовність	Довгий час відгуку, погана стабільна продуктивність
Адаптивний контроль	Самокоригування параметрів, висока міцність	Сильна залежність від точності моделі, слабкі динамічні характеристики
керування H_{∞}	Сильна міцність, стійкість до перешкод	Складний процес вирішення
ADRC	Плавний відгук, сильна стійкість до перешкод	Затримка в процесі апроксимації, кілька параметрів
ГДК	Проста конструкція, швидкий динамічний відгук	Складність, сильна залежність від точності моделі
NNC	Зручне налаштування параметрів, сильна здатність до самонавчання	Повільне зближення, коливання
FLC	Простий дизайн, незалежність від моделі, висока відмовостійкість	Низька систематичність проектування нечітких правил
SMC	Проста конструкція, легкість конструкції, висока міцність	Сингулярність, балакучі явища

Класичний метод ПД-регулювання стабільний, надійний, зручно регулюється та просто структурований, що робить його хорошим методом для лінійних та стаціонарних об'єктів. Однак PMSM є сильним і нелінійним об'єктом, де параметри змінюються та взаємодіють складно. Щоб покращити продуктивність регулювання швидкості двигуна, ПД-регулювання поєднується з іншими методами керування, такими як адаптивний PI, нейронна мережа PI та нечіткі PI-регулювання [18]

Однак, з точки зору точності відстеження крутного моменту двигуна, швидкості відгуку, придушення пульсацій крутного моменту та стійкості параметрів, наведені вище алгоритми не є ефективними для досягнення відмінних динамічних і статичних характеристик. Тому пропонується кілька інших вдосконалених алгоритмів керування.

Алгоритм адаптивного керування справляється з невизначеністю системи, регулюючи параметри контролера в режимі он-лайн, маючи таким чином високу стійкість. Серед них найбільш поширеним є модельне еталонне адаптивне керування. Його система складається з еталонної моделі, регульованої системи та адаптивного механізму. Однак дизайн еталонної моделі та регульованої системи спирається на точну модель двигуна, на яку серйозно впливають збурення параметрів двигуна.

H_{∞} Контроль. Як типовий метод надійного керування (RC), алгоритм керування H_{∞} спрямований на мінімізацію чутливості невизначеностей контролера для підтримки ефективності керування системою. Його надійність і захист від перешкод є сильними, але процес вирішення складний [19]

Активний контроль завод (ADRC). ADRC використовує спостерігача збурень для оцінки невизначеності системи, а потім вводить відхилення завод у сигнали керування для компенсації невизначеностей. ADRC забезпечує сильне придушення завод. Однак його конструктивні параметри спостерігача численні, процес апроксимації затримується, і існує певна похибка стаціонарного стану, яка впливає на точність керування двигуном.

Модель прогнозованого керування (MPC). MPC проста по конструкції і має швидкий динамічний відгук. Його дія заснована на розв'язанні задачі оптимального керування розімкнутим контуром у кінцевій часовій області в кожен момент вибірки. Однак цей алгоритм керування складний і залежить від параметрів моделі двигуна.

Контроль нейронної мережі (NNC). Метод NNC може досягти плавного запуску, невеликих коливань крутного моменту, широкого діапазону швидкості та високої міцності завдяки простому налаштуванню параметрів, сильній здатності до самонавчання та низькій чутливості параметрів двигуна. Однак структура NNC є відносно складною, і онлайн-ітераційні обчислення призводять до низької продуктивності в реальному часі. Таким чином, він більше підходить для автономної ідентифікації параметрів.

Нечітке логічне керування (FLC). FLC має просту структуру, хорошу міцність і незначний вплив на запуск двигуна. Це добре застосовується в конструкції системи керування серводвигуном змінного струму. Однак у практичних застосуваннях його конструкція покладається на досвід і експертні знання.

Керування ковзним режимом (SMC). Алгоритм SMC, будучи незмінним до зовнішніх збурень, має просту структуру, низьку чутливість до внутрішніх збурень параметрів і високу точність керування. Він підходить для керування нелінійними невизначеними системами, але має високу пульсацію моменту. Балаканина, сингулярність і неузгоджена невизначеність обмежують його застосування. Удосконалені алгоритми SMC були запропоновані для придушення тремтіння і навіть його усунення шляхом зменшення посилення перемикачів та частоти та шляхом згладжування керуючих сигналів [20]

Була запропонована спільна оптимізація системи керування PMSM осьовим потоком. Нечітке керування покращило пульсації крутного моменту, а SMC покращив динамічні характеристики двигуна, ефективно підвищивши запас ходу та прискорення електромобілів. Було запропоновано змінний регулятор SMC на основі контуру швидкості. Він поєднав МТРА для керування

ІРМ і отримав значну надійність керування та ефективність послаблення потоку.

2.4 ШІМ керування

Серед численних методів ШІМ найпоширенішими є просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція (SVPWM), синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція (SPWM) і шестиступенева напруга (SSV). Порівняння їх продуктивності показано в таблиці 2.4. Для заданої вхідної напруги шини постійного струму та здатності фазного вихідного струму використання високої напруги шини постійного струму може допомогти двигуну видавати більше потужності на поворотній швидкості та після неї (тобто в діапазоні ослаблення потоку).

Таблиця 2.4 Порівняння продуктивності методів модуляції [19]

Таблиця 2.4

Метод модуляції	Структурна складність	Гармонійна складова	Пульсації крутного моменту	Міцність
SVPWM	Комплекс	Низький	Низький	Високий
SPWM	просто	Високий	Високий	Низький
SSV	просто	Високий	Високий	Низький

SVPWM дозволяє двигуну отримувати кругове магнітне поле з постійною амплітудою. У порівнянні з SPWM можна досягти на 15,47% більшого використання напруги шини постійного струму, що дозволяє видавати більше потужності при високій швидкості роботи. Також можна досягти низького спотворення форми хвилі струму або невеликого обліку гармонійних

компонентів струму. Крім того, обертове магнітне поле ближче до кола, що значно покращує продуктивність двигуна. Таким чином, SVPWM є домінуючою модуляцією в управлінні двигуном.

SPWM фокусується на вирішенні проблеми трифазної симетричної синусоїдальної напруги регулювання частоти та напруги з точки зору джерела живлення двигуна. Однак його сумарне гармонійне спотворення більше, ніж у SVPWM, що негативно впливає на продуктивність керування. Більш суворо, амплітуда основної фазної напруги може становити лише 1/2 напруги шини постійного струму, яка може використовуватися лише в діапазоні низьких [20]

SSV може регулювати потужність, керуючи амплітудою напруги, потоком і крутним моментом, що може забезпечити найвищий коефіцієнт використання напруги шини постійного струму, що сприяє більшій вихідній потужності на швидкостях, що перевищують кутову швидкість двигуна. Однак його гармоніки багаті фазним струмом і магнітним полем повітряного проміжку, що призводить до гармонік п'ятого та сьомого порядку з більшою амплітудою.

2.5 Силові електронні пристрої в управлінні

Міжнародні постачальники компонентів, такі як Infineon, Fuji, Mitsubishi та Renesas, випустили нове покоління чіпів із біполярним транзистором із ізольованим затвором (IGBT) для NEV. Наприклад, IGBT Infineon засновані на 8-дюймовому. або 12-дюймовий. технологічної платформи, тоді як IGBT виготовляються на 6-дюймовій. або 8-дюймовий. вафлі в Китаї. Тим не менш, все ще є деякі прогалини в показниках продуктивності пристрою, ключових технологічних процесах, контролі якості виробництва та вартості. Упаковка модулів IGBT зі стандартом автомобіля (еквівалентна імпортованим модулям, таким як HP1, HP2 і HP Drive) близька до середнього міжнародного рівня продуктивності та надійності, і їх широкомасштабне застосування в автомобільній промисловості тільки почалося в Китаї.

Порівняно з традиційними кремнієвими пристроями, пристрої живлення з широкою забороненою зоною (WBG), представлені SiC і GaN, демонструють значні переваги щодо напруги, робочої температури, частоти перемикавання та втрат при перемиканні, що робить їх більш придатними для інверторів NEV, які вимагають стійкості до високих температур, високої напруги, високу частоту та високу щільність потужності. Порівняння властивостей матеріалів Si, SiC і GaN показано на рисунку 2.1.

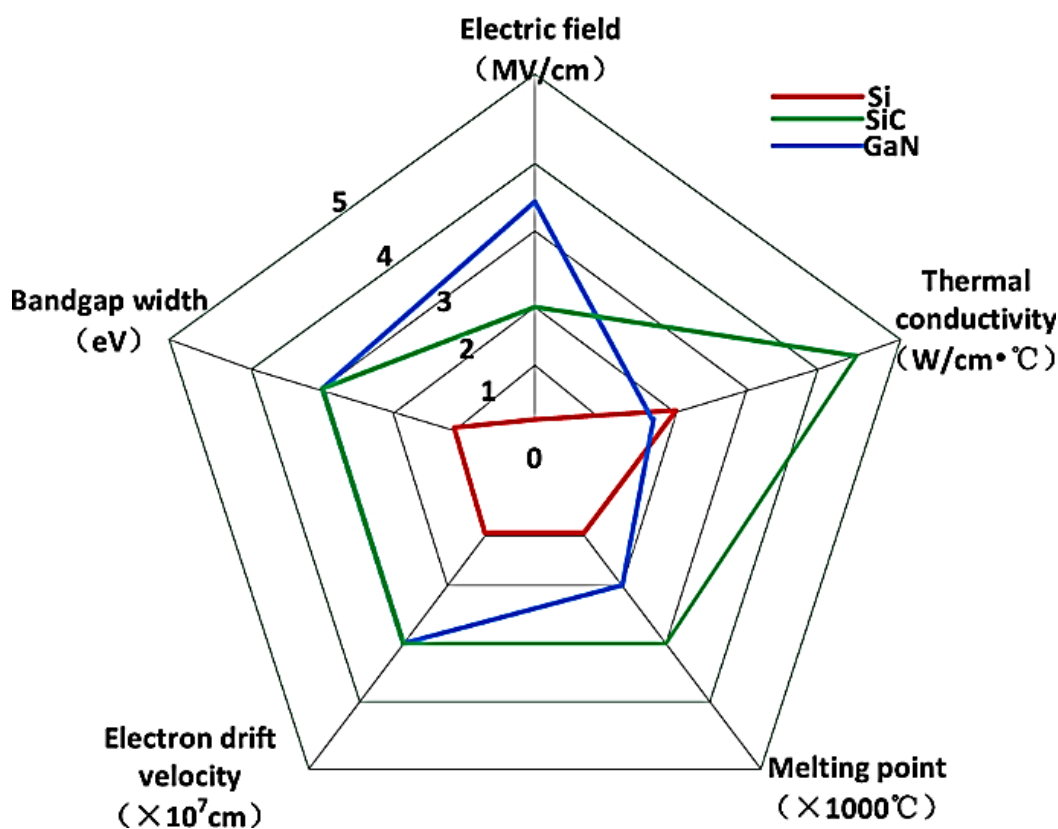


Рис.2.1 Порівняння властивостей матеріалів Si, SiC і GaN [21]

Застосування пристрою WBG досліджується в системах електричного приводу. Коли питома потужність контролера двигуна перевищує 25 кВт/л, напівпровідник WBG можна використовувати для зменшення нагрівання завдяки низьким втратам провідності під час високочастотної операції перемикавання. Прототип понижувального перетворювача з силовим модулем SiC був створений для тривалої роботи при високій температурі. Високу

продуктивність модуля SiC все ще можна знайти при температурі його з'єднання 225 °C. Для створення трифазного повного мостового інвертора використовувався інтегрований рейтинг низької напруги модуля GaN, що призвело до зменшення не тільки ваги та об'єму інвертора, але й опору пристрою та втрат на провідність. Однак, якщо частоту перемикання пристрою WBG було збільшено до 50–100 кГц, вплив електромагнітної сумісності, викликаний його високим dv/dt на ефективність, був би більш помітним.

Рівні електромагнітних перешкод (EMI) пристроїв SiC і Si зі схожою топологією порівнювалися за однакових робочих умов. Результати показали, що ефект Міллера, викликаний паразитними параметрами в пристроях SiC JFET, був основною причиною високих електромагнітних перешкод. Ізольована металева підкладка була встановлена на розділі інвертора приводу двигуна з SiC JFET для обмеження синфазного режиму (CM) та EMI.

Було показано, що LCL-фільтр третього порядку має кращу продуктивність, ніж LCL четвертого порядку. Блукаюча індуктивність між силовою електронікою та виходом перетворювача була використана як фільтр у поєднанні з додатковим RC-ланкою для високочастотного інвертора 100–1 МВт із SiC. Тест показав, що навіть для вимірюваного значення 47 кВ/мкс вихідний сигнал інвертора dv/dt можна обмежити 7,5 кВ/мкс.

Для обробки струму «земля-сток», електромагнітних перешкод CM (CMEMI) і підшипникового струму в інверторі двигуна з пристроями WBG була запропонована нова концепція компенсації напруги CM через топологію балансуєчого інвертора та структуру статора з подвійною обмоткою. У тесті, заснованому на GaN, хоча паразитна ємність у випадку асиметричних обмоток обмежує компенсацію CM, амплітуду струму землі можна було зменшити на 90%, а випромінювання CMEMI провідності можна було зменшити в середньому на 20 дБ без використання будь-яких фільтр.

Стандартну схему драйвера було використано шляхом додавання простої схеми зв'язку для керування двома послідовно з'єднаними польовими транзисторами SiC метал–оксид–напівпровідник (SiC MOSFET).

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1 Порівняння систем приводу BEV

Основними перевагами централізованої моторної системи є простота керування та відносно низька вартість досліджень і розробок (НДДКР). Однак низька ефективність є його очевидним недоліком. Розподілена система має найменшу кількість механізмів механічної передачі та найвищу ефективність передачі. Однак останній містить кілька двигунів і включає більш складну електронну технологію керування, яка досі не має масового виробництва.

Для системи EREV, завдяки наявності АРU, відстань руху на одній зарядці збільшується. Однак багато місця в системі займають передавальні структури, а ефективність роботи не дуже висока. Переваги та недоліки систем приводу BEV наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Переваги та недоліки систем приводу BEV [22]

Таблиця 2.1

Показники ефективності	Централізована система	Розподілена система	Система присадок
Структурна складність	Комплекс	просто	Комплекс
Витрати на НДДКР	Низький	Середній	Високий
Ефективність системи	Низький	Високий	Середній
Пробіг за одну зарядку	Короткий	Середній	Довго
Складність контролю	Низький	Високий	Середній

Порівняння гібридних силових агрегатів. Переваги та недоліки різних гібридних силових агрегатів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Переваги та недоліки різних гібридних силових агрегатів [23]

Таблиця 3.2

Показники ефективності	Серія гібридної системи	Паралельна гібридна система	Складена гібридна система
Структурна складність	просто	просто	Комплекс
Економія палива	Бідний	добре	Бажано
Відповідний робочий стан	Інтенсивний рух	Міжміське/шосе	Підходить для між міста
Робоча точка двигуна	Завжди найкращий	Важко бути найкращим	Пристає до найкращого
Складність контролю	Низький	Середній	Високий

Переваги серійної конфігурації в основному відображаються в простій конструкції, відносно легкому управлінні та оптимальній робочій точці двигуна. Основними перевагами паралельної конфігурації є хороша економія палива та відносно проста структура.

Послідовно-паралельна складена конфігурація поєднує в собі характеристики як послідовної, так і паралельної конфігурацій, тому її можна адаптувати до різноманітних умов водіння. Однак система складна, а контроль складний.

3.2 Технічні інновації та прогноз розвитку систем електроприводу NEV

Технічна архітектура системи електроприводу NEV показана на рисунку 3.1. В основному він включає силові агрегати, основні вузли, ключові матеріали, компоненти та базову підтримку.

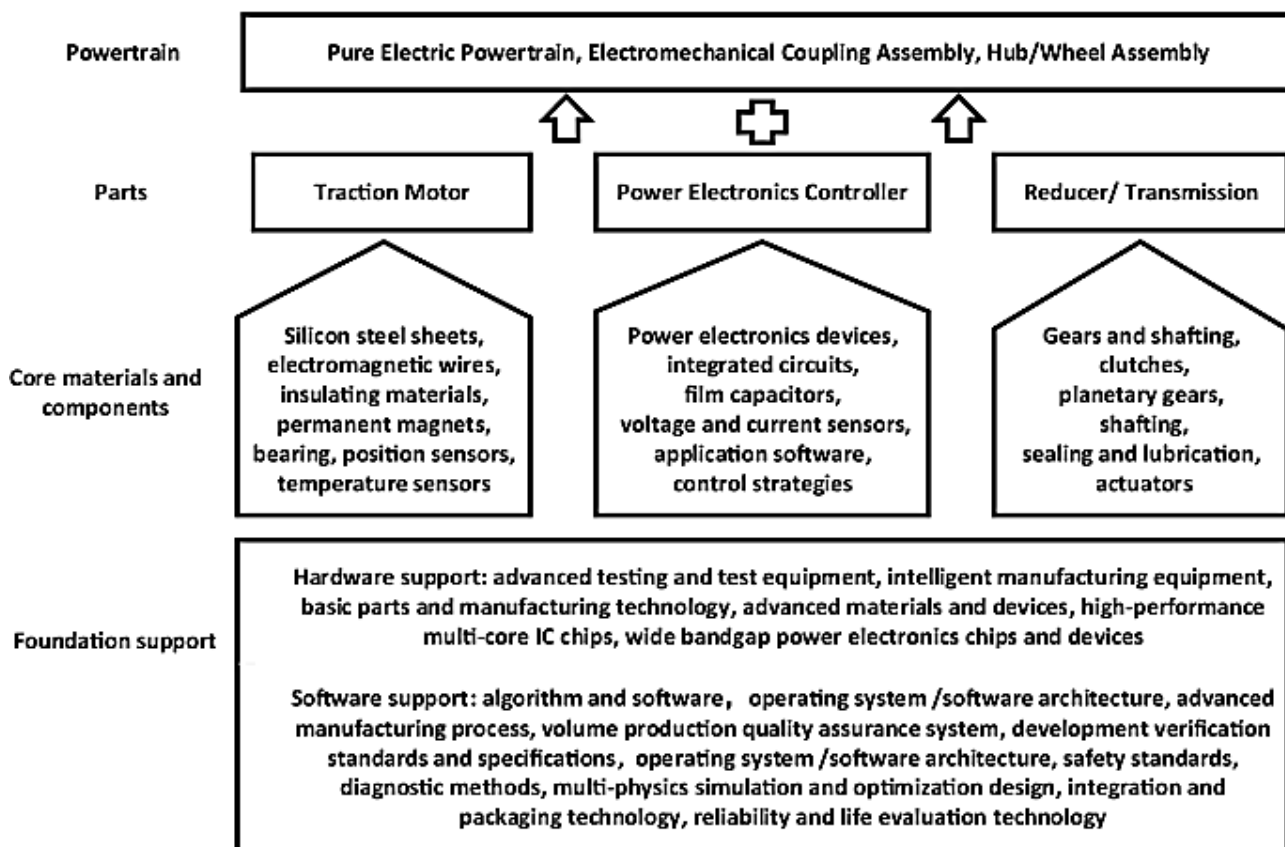


Рис.3.1 Технічна архітектура системи електроприводу NEV [24]

Інноваційну технологію системи електроприводу NEV можна підсумувати як загальне вдосконалення всієї технології ланцюга постачальників від матеріалів, деталей/компонентів і систем двигуна до силових агрегатів.

У системі електроприводу розробка рідкоземельних РМ матеріалів сприяє розвитку PMSM. Експлуатаційні характеристики магніту були значно покращені, такі як добуток магнітної енергії, магнітне відхилення,

синусоїдальна намагніченість, розщеплення та з'єднання магнітних блоків, використання легких рідкоземельних елементів, покриття поверхні та вимірювання РМ. РМ класу вище N50UH Nd-Fe-B виробляється масово, і його залишковий магнетизм близький до 90% від теоретичної межі сполуки $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Однак коерцитивна сила все ще нижча за 30% від теоретичної межі, тому є багато можливостей для вдосконалення.

Технології дифузії та модуляції границь зерен важких рідкісноземельних елементів можуть бути використані для майбутнього розвитку, як показано на рисунку 3.2.

Ці технології можуть значно скоротити використання важких рідкоземельних матеріалів, таких як диспрозій та/або тербій, і покращити продуктивність і якість магнітів.

Крім того, деякі змішані РМ матеріали (включаючи ферит) використовуються для часткової заміни матеріалів Nd-Fe-B деякими OEM-виробниками, такими як Toyota і GM.

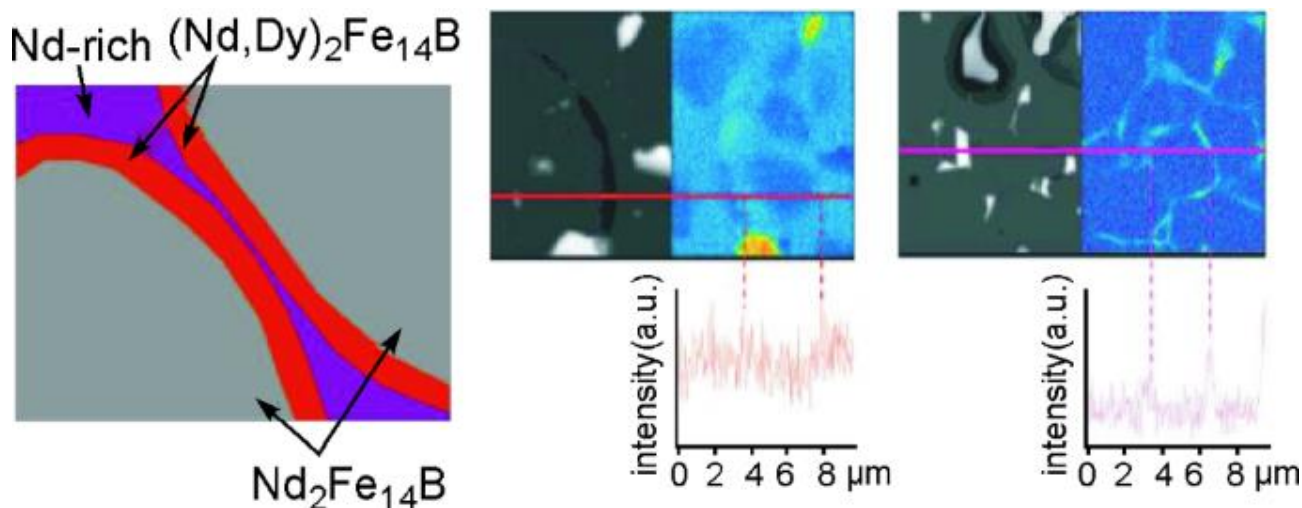


Рис.3.2 Технології дифузії та модуляції границь зерен важких рідкісноземельних елементів [25]

Таким чином, окрім матеріалів РМ, ізоляційні матеріали захисту від корони, електромагнітні дроти, високоефективні магнітні матеріали та виробнича обробка привернули велику увагу в промисловості електродвигунів.

Ізоляційним матеріалам та конструкції їх ізоляції, що забезпечує високу продуктивність, високу надійність, тривалий електричний і тепловий термін служби, високу теплопровідність, захист від коронного розряду та масляну сумісність, також приділяється значна увага, оскільки високошвидкісний двигун і високочастотний інвертор є тенденція розвитку [26]

3.3 Інновації силової електроніки

У системі електричного приводу силова електроніка відіграє важливу роль у системі тягового двигуна та продуктивності електричної трансмісії. У майбутньому промисловість NEV зосередиться на наступних дослідженнях силової електроніки.

Технологія траншей стала основною технологією IGBT-чіпів для транспортних засобів. Це може підвищити здатність інжекції електронів і зменшити втрати включення, вимикання та провідності.

З розвитком технології канавок уточнення канавок відіграє ключову роль у покращенні загальної продуктивності мікросхем IGBT для електромобілів.

Швидко товсте епітаксійне зростання та технологія перевірки матеріалів привертають велику увагу до чіпів SiC MOSFET.

Підготовка та перевірка пластин, а також упаковка модулів SiC або GaN з низькою чутливістю та високою щільністю безпосередньо пов'язані з успішним застосуванням NEV на силових напівпровідниках WBG третього покоління.

Основна увага приділяється вдосконаленню функціональної інтеграції однокристальних мікросхем, зменшенню складності системи, збільшенню щільності потужності та підвищенню надійності мікросхем і пакетів силової електроніки.

IGBT або SiC МОП-транзистори та діоди SiC інтегровані в одну мікросхему для покращення щільності струму модуля живлення.

Датчики струму та температури інтегровані в мікросхему електронного перемикача живлення для виявлення перехідних вихідних струмів і коливань температури перехідних переходів, таким чином підвищуючи надійність і щільність потужності пакетних модулів [27]

Технології мідного зв'язувального дроту, прямого з'єднання мідних терміналів, склеювання ременя та гнучкого з'єднання прийняті для заміни традиційної технології зв'язування алюмінієвого дроту.

Площа контакту кремнієвої пластини збільшена для рівномірного розподілу термоелектричної напруги в частині силового контакту, зниження пікової температури кремнієвої пластини та покращення циклу живлення модуля.

Двостороннє зварювання, одностороннє/двостороннє охолодження та інтегрований тепловідвід можуть зменшити термічний опір мікросхеми, покращити здатність розсіювання тепла та підвищити надійність циклу живлення, що стало новою тенденцією в упаковці. технології наступного покоління IGBT і SiC MOSFET модуля.

3.4 Інноваційна система двигуна та трансмісії

На внутрішньому ринку пасажирських силових агрегатів BEV продукти інтеграції електроприводів 3-в-1 і багато-в-1 знаходяться на тому ж рівні, що й у світових постачальників.

Інтегрована конструкція Tesla відносно просунута і базується на новому дизайні електричного шасі та передових дослідженнях. Питома потужність двигунів у всьому світі перевищує 4–4,6 кВт/кг.

Однак на момент запуску продукту переваги першого учасника не є. Щоб підвищити ефективність приводу, SiC MOSFET інвертори з дискретними

пристроями були виведені на комерціалізацію раніше за інші, і їх найвищий ККД системи електроприводу 3-в-1 становить приблизно 94%.

Порівняно з системою приводу двигуна на основі Si, силові агрегати на основі SiC забезпечили вищу пікову та робочу ефективність під час циклів руху автомобіля.

У майбутньому слід зосередити увагу на систематичній інтеграції та інноваціях у ланцюзі постачальників електричних силових агрегатів NEV та їхніх ключових компонентів, які включають:

- технологія конфігурації вузла електромеханічної муфти;
- ущільнення (конденсація), розсіювання тепла та змащення високоінтегрованих електромеханічних систем зчеплення;
- ключові частини та компоненти, такі як вал із шестернями, муфта, планетарні шестерні та приводи;
- двигун ступиці прямого приводу, система електроприводу ступиці колеса нового типу та інноваційна технологія дизайну гальмівної системи;
- технологія NVH, придушення, виявлення та оцінки шуму;
- стандарти валідації та специфікації для електромеханічних з'єднувальних пристроїв [28]

ВИСНОВКИ

1. Поточний стан систем двигуна NEV і технологій трансмісії систематично переглядається, детально підсумовано технологічні інновації та застосування в матеріалах, пристроях і силових агрегатах, і порівнюються різні алгоритми керування. Незважаючи на те, що продуктивність тягових двигунів і силових агрегатів значно покращилася, необхідні додаткові дослідження та розробки для більш інноваційних технологій, таких як оптимізація конструкції двигуна та алгоритми керування, багатофізичний аналіз симуляції, дизайн надійності, системна інтеграція разом із двигунами, контролерами та редукторами.

2. Показано, що трансмісії, система двигуна наступного покоління на основі пристроїв SiC, двигуни з магнітними магнітними магнітами з меншим вмістом важких рідкісноземельних твердих металів або без них, ефективні методи охолодження двигунів, а також розробка та застосування нових матеріалів.

3. Встановлено що динамічні характеристики автомобіля, функції енергозбереження, безпека та комфорт в основному підсумовуються системами електричного приводу. Технічні дорожні карти електричних силових агрегатів, систем тягового двигуна, ключових компонентів і матеріалів узагальнено з точки зору часових рамок 2025, 2030 і 2035 років, які можуть використовуватися як довідкові дослідники та інженери виробників оригінального обладнання та постачальників галузі NEV. мереж, державних службовців або інвесторів для стратегій інвестування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цейтлин Л.С. Электропривод, электрооборудование и основы управления: Учебник для уч-ся техникумов. – М.: Высш. школа, 1985. – 192 с.
2. Методичні вказівки по виконанню курсовий роботи з ТАУ. КПТ, 2000. /Васильєв В.І.
3. Лі, З., Кхаджепур, А., Сонг, Дж.: Комплексний огляд ключових технологій для чисто електричних транспортних засобів. Енергія 182 , 824–839 (2019)
4. Цзоу, Ю., Вей, С., Сун, Ф., Ху, Х., Шиао, Ю.: Масштабне розгортання електричних таксі в Пекіні: аналіз реального світу. Енергія 100 , 25–39 (2016)
5. Ду, Дж., Лі, Ф., Лі, Дж., Ву, Х., Сонг, Дж., Цзоу, Дж., Оуян, М.: Оцінка технологічної еволюції акумуляторних електричних автобусів: приклад Китаю. Енергія 176 , 309–319 (2019)
6. Sun, X., Li, Z., Wang, X., Li, C.: Технологічний розвиток електромобілів: огляд. Енергії 1 (13), 90 (2020)
7. Ду, Дж., Оуян, М., Ву, Х., Мен, Х., Лі, Дж., Лі, Ф., Сонг, З.: Прогнозування технологічного напрямку для електричного автобуса на акумуляторах під впливом нової схеми субсидування Китаю. Ж. Чистий. Виробник 222 , 267–279 (2019)
8. Кумар, РР, Алок, К.: Прийняття електричних транспортних засобів: огляд літератури та перспективи сталого розвитку. Ж. Чистий. Виробник 253 , 119911 (2020)
9. Китайська асоціація виробників автомобілів: Економічні показники автомобільної промисловості в листопаді 2019 року (2020-05-25). <http://www.autostats.org.cn/ReadArticle.asp?NewsID=10672>
10. Лопес, І., Ібарра, Е., Маталлана, А., Андреу, Дж., Кортабаррія, І.: Электроприводи нового покоління для силових систем HEV/EV: технологія, тенденції та виклики. Відновити. Систейн. Energy Rev. 114 , 109336 (2019)
11. Zhu, ZQ, Howe, D.: Електричні машини та приводи для

електричних, гібридних транспортних засобів і автомобілів на паливних елементах. *Proc. IEEE* 4 (95), 746–765 (2007)

12. Салем, А., Нарімані, М.: Огляд багатофазних приводів для автомобільної тяги. *IEEE Trans. трансп. Електрифікація*. 4 (5), 1329–1348 (2019)

13. Томас, В.Дж., Мен, Е.: Стратегії виходу на ринок для нових електромобілів в автомобільній промисловості — уроки Tesla Motors. *Ж. Чистий. Виробник* 235, 653–663 (2019)

14. Lee, W., Li, S., Han, D., Sarlioglu, B., Minav, TA, Pietola, M.: Огляд інтегрованого моторного приводу та широкозонної силової електроніки для високопродуктивних електрогідростатичних приводів. *IEEE Trans. трансп. Електрифікація*. 3 (4), 684–693 (2018)

15. Чау, К.Т., Чан, Ч.І., Лю, К.: Огляд безщіткових приводів на постійних магнітах для електричних і гібридних електромобілів. *IEEE Trans. Пром Електрон.* 6 (55), 2246–2257 (2008)

16. Чан, СС: Сучасний стан електричних, гібридних автомобілів і автомобілів на паливних елементах. *Proc. IEEE* 4 (95), 704–718 (2007)

17. Wang, S., Deng, C.: Дослідження технологій електромоторів для електромобілів. *Мікромотор (технологія сервоприводу китайською)* 39 (8), 83–85 (2006)

18. Ян, З., Шан, Ф., Браун, І. П., Крішнамурті, М.: Порівняльне дослідження внутрішніх постійних магнітів, індукційних і реактивних електроприводів для додатків EV і HEV. *IEEE Trans. трансп. Електрифікація*. 3 (1), 245–254 (2015)

19. Uglielmi, P.: Порівняння індукційних і РМ синхронних двигунів для застосування EV, включаючи приклади конструкції. *IEEE Trans. Пром.* 6 (48), 2322–2332 (2012)

20. Zeraouia, M., Benbouzid, MEN, Diallo, D.: Проблеми вибору приводу електродвигуна для силових систем HEV: порівняльне дослідження. *IEEE Trans. Вех. технол.* 6 (55), 1756–1764 (2006)

21. Zhao, X., Niu, S., Zhang, X., Fu, W.: Нова верньєрна машина збудження

з гібридним розвантаженням і насиченням постійного струму для стартерного генератора HEV. IEEE Trans. Пром Електрон. 8 (67), 6342–6353 (2020)

22. Zhu, X., Jiang, M., Xiang, Z., Quan, L., Hua, W., Cheng, M.: Розробка та оптимізація двигуна з постійним магнітом із модуляцією потоку на основі конструкції, орієнтованої на гармоніку повітряного зазору методологія. IEEE Trans. Пром Електрон. 7 (67), 5337–5348 (2020)

23. Ча, К. С., Кім, Д. М., Юнг, Ю. Х., Лім, Е. С.: Синхронний двигун з намотуванням поля з гібридною схемою для тяги електромобілів у сусідстві, покращуючи економію палива. апл. Енергія 263 , 114618 (2020)

24. Сю, К., Сун, Дж., Ян, Ю., Тао, Т., Цуй, С.: Електромагнітна оптимізація конструкції двигуна з постійними магнітами складної конструкції для гібридного електромобіля. пер. China Electrotech. Соц. т.1 (35), 126–135 (2020)

25. Чен, Ю., Чжу, Х., Куань, Л., Хан, Х., Хе, Х.: Конструкція оптимізації чутливості параметрів і аналіз продуктивності машини з подвійним виступаючим постійним магнітом і подвійним статором. Transa. China Electrotech. Соц. 8 (32), 160–168 (2017)

26. Zheng, P., Lei, Y., Wu, F., Sui, Y., Wang, P.: Аналіз та проектування шестифазної відмовостійкої машини РМ, яка використовується для електромобілів. Електр. мах. Контроль 6 (17), 29–36 (2013)

27. Tu, W., Xiao, G., Suo, C., Yang, K.: Конструкція безсенсорного приводу синхронного двигуна з постійним магнітом на основі V/f керування. 2017 20-та Міжнародна конференція з електричних машин і систем (ICEMS). 2017 р. С. 1–5

28. Гу, Л., Чжан, Х.-Л., Ван, З.: Покращена стратегія керування послабленням потоку на основі UDE для IPMSM. Енергії 12 , 4077 (2019)

29. Ну, J., Jia, M., Xiao, F., Fu, C., Zheng, L.: Векторне керування двигуном на основі карти швидкості-крутного моменту-струму. апл. Sci. 10 , 78 (2019)

30. Лі, Г., Ху, Дж., Лі, Ю., Чжу, Дж. Г.: Покращена модель прогнозу стратегії прямого керування крутним моментом для зменшення гармонійних

струмів і пульсацій крутного моменту п'ятифазних синхронних двигунів з постійними магнітами. IEEE Trans. Пром Електрон. 66 , 5820–5829 (2018).