

4.Багач Р. В. (2024). Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму (Doctoral dissertation, Харківський національний автомобільно-дорожній університет).

5.Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Багач Р. В., Гнатова Г.А., Тарасова В. В., Ручка О. О. Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. Х.: ХНАДУ, 2021. № 20.– С. 17-26.

6.Zhang, Z., Pang, H., Georgiadis, A., & Cecati, C. (2019). Wireless Power Transfer—An Overview. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66(2), 1044-1058.

7.Латвинський, В. Д., & Багач, Р. В. (2024). Дослідження роботи станцій швидкої зарядки електромобілів на сонячній енергії. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: збірка матеріалів ІХ Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції* (21–22 листопада 2024 р.). – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет. (с. 109–111).

8.Fang, J., Li, S., Tang, Y., & Wang, H. (2020). Systematic Review of Dynamic Wireless Charging for Electric Vehicles: Technologies, Limitations, and Future Trends. IEEE Access, 8, 193984-194007.

9.Багач, Р. (2024). Підвищення електромагнітної сумісності і енергоефективності зарядної станції електромобілів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (25), 53–62.

УДК 621.31

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОННИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Латвинський Владислав Дмитрович, асистент кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: latvin2000@gmail.com, ORCID: [0009-0002-4891-2925](https://orcid.org/0009-0002-4891-2925)

Багач Руслан Володимирович, доктор філософії (PhD), доцент кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, ORCID: [0000-0003-0157-5933](https://orcid.org/0000-0003-0157-5933)

У сучасному світі особливу увагу приділяють скороченню викидів шкідливих речовин та подоланню кліматичної кризи. Одним із найефективніших шляхів розв’язання цих проблем є масштабна електрифікація транспорту. Електромобілі мають простішу конструкцію та обслуговування, однак їх запас ходу поки що поступається традиційним автомобілям із двигунами внутрішнього згорання [1,2].

Проблему обмеженої дальності ходу електромобілів вирішують у кількох напрямках: підвищення ефективності систем накопичення енергії, збільшення

ємності акумуляторних батарей, а також удосконалення електроприводів транспортних засобів [3,4].

Електродвигун, що використовується в електроприводі транспортного засобу, повинен забезпечувати високу питому потужність і крутий момент, швидку динаміку прискорення та гальмування, можливість роботи з перевантаженням, широкий діапазон частот обертання та високий коефіцієнт корисної дії (ККД) за будь-яких робочих режимів. Найпоширенішими типами електродвигунів у сучасних електромобілях є двигуни постійного струму (ДПС), асинхронні двигуни (АД) та синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) — кожен із них має свої переваги та недоліки.

Однак нестабільність ринку рідкоземельних магнітів спричинила пошук альтернативних технологій. Через перебої в постачанні матеріалів для СДПМ виробники все частіше досліджують можливість використання двигунів без постійних магнітів, які могли б забезпечити подібні експлуатаційні характеристики та знизити залежність від дефіцитних елементів. У цьому контексті значну увагу привернули синхронні реактивні двигуни (СРД) — технологія, відома ще з 1970-х років. Нині провідні виробники, зокрема компанія Tesla, активно впроваджують СРД поряд із традиційними рішеннями на базі СДПМ та АД.

Асинхронні двигуни (АД) мають безмагнітну конструкцію, у якій обертання ротора забезпечується магніторушійною силою. Завдяки простоті, низькій вартості, надійності, стійкості до складних умов експлуатації, добрим динамічним властивостям і широкому діапазону робочих швидкостей, АД є одним із головних претендентів для застосування у тягових приводах електромобілів.

Найвищий ККД асинхронного двигуна спостерігається при високих частотах обертання та менших за номінальні моментах, оскільки за таких умов знижуються втрати у міді та осердях статора і ротора. При низьких швидкостях ефективність зменшується через підвищені втрати в роторі. Порівняно з машинами постійного струму АД мають більшу питому потужність, вищий ККД і нижчу собівартість. Однак у порівнянні з СДПМ вони характеризуються меншими коефіцієнтами потужності та ефективності через наявність втрат у роторі, що зумовлює більші габарити при однакових номінальних параметрах [5].

Недоліками АД є значне нагрівання ротора, що обмежує перевантажувальну здатність і вимагає ефективного охолодження. Для зменшення струму намагнічування повітряний зазор має бути мінімальним, що підвищує вимоги до точності виготовлення та збільшує виробничу вартість. Крім того, асинхронні двигуни мають нижчу питому потужність і вищі вимоги до інвертора порівняно з СДПМ, що призводить до збільшення необхідної ємності акумуляторної батареї. Саме через нижчий ККД і питому потужність у деяких випадках від використання АД в електромобілях відмовляються.

Двигуни з постійними магнітами (СДПМ) сьогодні є основним типом тягових електродвигунів, що застосовуються у більшості сучасних

електромобілів. Їх популярність зумовлена низкою переваг: високим коефіцієнтом корисної дії, значною питомою потужністю та щільністю крутного моменту, високим коефіцієнтом потужності, меншими габаритами і масою, низьким рівнем вібрацій та шуму, а також зменшеним номінальним струмом і низькою інерційністю [6].

Водночас СДПМ мають і певні недоліки. Їх діапазон частот обертання з постійною потужністю обмежений через невелику здатність працювати в режимі ослаблення магнітного поля. Крім того, стійкість роботи при відмові окремих елементів нижча, ніж у асинхронних двигунів, а перевагантажувальна здатність визначається властивостями постійних магнітів.

Синхронні двигуни з вбудованими постійними магнітами (СДВПМ) мають явно виражений рельєфний (явно-полюсний) ротор і міцну конструкцію завдяки заглибленню постійних магнітів у тіло ротора. Цей тип машин широко використовується в електромобілях протягом останніх десятиліть.

Завдяки таким характеристикам, як високий ККД, компактність, мала маса, ефективна робота в режимі ослаблення магнітного поля, наявність додаткового реактивного моменту та механічна міцність, СДВПМ вважаються оптимальним типом електродвигуна для електромобілів. Порівняно з СДПМ із поверхневими магнітами, СДВПМ мають вищу перевагантажувальну здатність, більший робочий діапазон за рахунок ослаблення поля та підвищену щільність крутного моменту.

Існує висока ймовірність подальшого обмеження доступності рідкоземельних магнітів і зростання нестабільності їх цін, що може зробити двигуни з постійними магнітами економічно не вигідними. Тому для масового виробництва електромобілів надзвичайно важливими є дослідження та розробка електричних двигунів без магнітів або з їх мінімальним використанням.

Одним із можливих напрямів зниження залежності від рідкоземельних матеріалів є заміна таких магнітів феритовими. Паралельно активно досліджуються топології двигунів без постійних магнітів, здатні забезпечити порівняні з СДПМ характеристики. Серед таких варіантів особливу увагу привертають синхронні реактивні двигуни (СРД), які вирізняються простою і надійною конструкцією, високою перевагантажувальною здатністю та широким робочим діапазоном частот обертання.

Класичний СРД має ротор без постійних магнітів. Принцип його роботи подібний до роботи синхронного двигуна з постійними магнітами, однак ключова відмінність полягає у значній різниці між індуктивностями по осях d і q . Ця різниця створюється завдяки спеціальному розташуванню повітряних бар'єрів у роторі, які обмежують магнітний потік по осі d , тоді як між ними розміщуються феромагнітні секції, що проводять потік по осі q . У результаті СРД працює, використовуючи реактивний момент, який виникає через прагнення ротора встановитися в положенні мінімального магнітного опору.

СРД має низку переваг над асинхронними двигунами. Його ротор не містить стрижнів, що усуває додаткові втрати на опір і нагрів, знижує собівартість виготовлення та підвищує механічну міцність. Відсутність

вихрових струмів (струмів Фуко) дає змогу використовувати суцільні сталеві роторні пакети без тонкої шихтовки, що підвищує крутний момент і зменшує інерційність ротора.

Проте, традиційні СРД мають і недоліки, підвищені пульсації крутного моменту та нижчий ККД порівняно з іншими типами машин. Для мінімізації цих недоліків необхідне застосування високоефективних алгоритмів керування, що забезпечують плавну роботу та високу продуктивність.

Синхронні реактивні двигуни з постійними магнітами (СРДПМ) поєднують переваги СДПМ і класичних СРД. У таких машинах у роторі, поряд із повітряними бар'єрами, розміщуються невеликі постійні магніти, що дозволяє підвищити щільність крутного моменту, ККД і коефіцієнт потужності, а також розширити діапазон роботи в режимі ослаблення поля [7].

На рисунку 1 наведено типову геометрію класичного СРД та СРДПМ у розрізі.

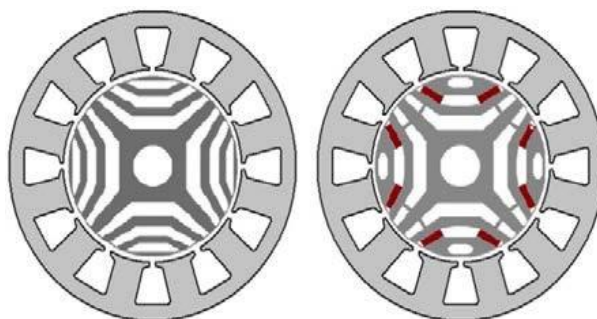


Рисунок 1– Геометрія СРД та СРДПМ у розрізі: а – СРД; б – СРДПМ

Даний тип двигуна має потенціал стати конкурентоспроможною альтернативою іншим типам електродвигунів, що застосовуються в електромобілях. Це пояснюється тим, що кількість постійних магнітів у СРДПМ є відносно малою завдяки значному реактивному моменту, який забезпечується високим співвідношенням індуктивностей по осях d і q (L_d/L_q). У поєднанні з внеском постійних магнітів це забезпечує високий ККД і щільність крутного моменту.

Подібно до класичного СРД, двигуни СРДПМ відзначаються простою, надійною та недорогою конструкцією. За умови правильного підбору кількості магнітів і оптимізації системи керування їхні характеристики можуть бути порівнянні з показниками синхронних двигунів із вбудованими постійними магнітами (СДВПМ). При цьому СРДПМ є менш чутливими до перегріву й розмагнічування, що є характерною проблемою для СДВПМ.

Висновки

Завдяки вдосконаленим методам електромагнітного та теплового проектування, а також сучасним технологіям виробництва, СРД і СРДПМ здатні відповідати вимогам, які висуваються до тягових електроприводів електромобілів, забезпечуючи ефективність, надійність і зниження залежності від рідкоземельних матеріалів.

Література

- 1.Багач РВ Відновлювана енергетика електротранспорту. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р., Держ. біотехнологічний ун-т. Харків: ДБТУ, 2024. С. 60-61.
- 2.Багач Р. В. (2024). Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму (Doctoral dissertation, Харківський національний автомобільно-дорожній університет).
- 3.Гнатов, А., Аргун, Щ., Багач, Р., Гнатова, Г., Тарасова, В. ., & Ручка, О. (2021). Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (20), 17–26.
- 4.Багач, Р. В. Підвищення енергетичної ефективності зарядних станцій для електромобілів / Р. В. Багач, В. Д. Латвинський // Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорт : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. до Дня автомобіліста та дорожника, 22–23 жовт. 2024 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2024. – С. 221–225.
- 5.Mercorelli, P. (2023). Control of Permanent Magnet Synchronous Motors for Tracking Problems: A Review. *Electronics*, 12(15), 3285.
- 6.Горященко, К. Л. (2023). Моделювання та випробування синхронних двигунів з постійними магнітами. Електронний науковий архів Хмельницького національного університету (ELAR).
- 7.Gauthey, T., Gangl, P., & Hage Hassan, M. (2021). Multi-Material Topology Optimization with Continuous Magnetization Direction for Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motors. arXiv preprint arXiv:2107.04825.

УДК 621.311

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ІЄРАРХІЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖАМИ У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Нечаус Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедра АЕ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: nechaus@ukr.net, ORCID: [0000-0001-8833-0802](https://orcid.org/0000-0001-8833-0802)

Оснащення систем електропостачання окремих промислових або комунальних об'єктів, в тому числі тих, які включають зарядні станції електромобілів, альтернативними відновлюваними джерелами електричної енергії у вигляді вітрових або сонячних електростанцій, є критерієм їх асоціації з мікромережами – в цьому випадку з'являється можливість їх автономної роботи окремо від державної електричної системи. Світова зацікавленість у подібному підході до вирішення екологічних та економічних проблем,