

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛЕГКОВИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Д. А. Івлєв¹, В. Д. Косенков², О. Ф. Винаков¹, Цзян Хайлун¹

¹Державний університет «Одеська політехніка»

²Хмельницький національний університет

Анотація. Розглянуті конструкції сучасних тягових двигунів легкових електромобілів. Показано, що через зростаючу ціну на постійні магніти до 2030 року використання двигунів з магнітоелектричним збудженням стане економічно недоцільним. Розглянуті альтернативні конструкції й зроблений висновок про необхідність розробки нових типів електричних машин з електромагнітним збудженням.

Ключові слова: тягова характеристика, постійні магніти, рідкісноземельні метали, коефіцієнт корисної дії, ротор, статор.

Вступ

Електромобілебудування – молода галузь машинобудування, що бурхливо розбудовується. Тільки в 2014 році вперше в світі був подоланий рубіж в 100 тисяч проданих екземплярів електромобілів (модель Nissan Leaf). За оцінками агентства Bloomberg, в 2021р в світі налічуватиметься понад 230 різних моделей електромобілів, а до 2024г продажі електромобілів в США пер евищать мільйон екземплярів. Настільки велика різноманітність моделей говорить про те, що в галузі ще не вироблені стандарти проектування основних систем електромобілів. Тому досить важливо розглянути перспективи розвитку тягових двигунів електромобілів, що дозволяє конструкторам не розпорозувати зусилля при розробці нових типів тягових двигунів.

Мета роботи - на основі аналізу закордонних публікацій показати тенденції розвитку тягових двигунів легкових автомобілів.

Матеріали досліджень.

1. Електричні двигуни тягового електроприводу

Будь-який двигун електротранспорту повинен забезпечувати тягову характеристику яка має дві характерні області: постійного моменту в діапазоні $n=0 \div n_{ном}$ і постійної потужності в діапазоні $n=n_{ном} \div n_{мах}$. Як приклад можна розглянути дану характеристику у двигуна електромобіля BMW i3 (Рис.1), світові продажі якого почалися в 2016 році [1].

© Д. А. Івлєв, В. Д. Косенков, О. Ф. Винаков,

Цзян Хайлун., 2021

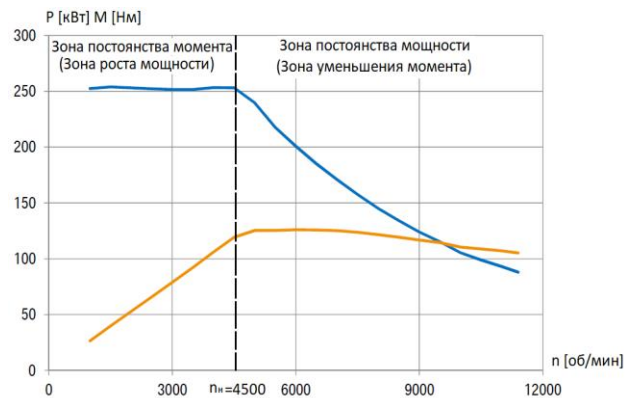


Рис. 1. Тягова характеристика BMW i3.

Наведену тягову характеристику можна розглядати в якості стандартної для сучасних електромобілів. Сьогодні номінальна швидкість обертання тягового двигуна електромобіля $n_{ном}=4000-5000$ об/хв, а максимальна $n_{мах}=10000-11000$ об/хв. У цей час в електромобілях в основному використовуються наступні типи тягових двигунів.

1.1. Синхронні двигуни з інкорпорованими постійними магнітами

Двигуни (СДПМ) (IPMSM - Interior permanent-magnet synchronous motors) (Рис.2). експлуатуються в електромобілях Toyota Prius, Toyota Camry, Nissan Leaf, Hyundai Sonata, Chevrolet Volt, Lexus RX, Honda Accord, Tesla Model 3 і т.і [2, 3].

Достоїнством СДПМ є забезпечення постійної потужності в широкому діапазоні швидкостей, мала маса, високі надійність і коефіцієнт корисної дії (ККД).

Одним з основних недоліків СДПМ є неможливість регулювання магнітного потоку, створеного постійними магнітами, і неможливість його вимикання при аварійних

режимах роботи двигуна (короткому замиканні, перевантаженнях і т. д.).



Рис. 2. Синхронний двигун з інкорпорованими постійними магнітами.

При обертанні ротора СДПМ із коротким замиканням фаз або міжгілковим замиканням у електричному колі двигуна буде наводитися електрорушійна сила, яка викличе гальмовий момент, перегрів обмоток і, в остаточному підсумку, пожежу. Для рішення цієї проблеми СДПМ проєктують із великою фазною індуктивністю, завдяки чому величина струму короткого замикання не перевищує номінальне значення. Однак якщо в результаті несправності зовнішнє рідинне охолодження двигуна буде ушкоджено, складно гарантувати повну пожежну безпеку такого режиму роботи. Навіть якщо загоряння не відбудеться, висока температура може призвести до деградації постійних магнітів.

Крім цього, існує небезпека виникнення помилок керування інвертором під час роботи двигуна на максимальних обертах. У цьому випадку виникає неконтрольована рекуперація й підвищена напруга у колі постійного струму інвертора, у результаті чого воно може вийти з ладу. Таких наслідків можна уникнути, якщо коло постійного струму підключене до акумуляторної батареї, однак при цьому транспортний засіб, що рухається з високою швидкістю, починає екстремне гальмування. Так, у статті «Electrical defects cause priuses to stall; toyota may be bra cing for a legal fight as safety worries grow» (Електричні дефекти приводять до зупинки prius; toyota може готуватися до судового позову, оскільки побоювання із приводу безпеки ростуть) [4], опублікованої в 2018 р. у газеті Los Angeles Times, описується випадок, що відбувся в 2017 р. Тоді електромобіль prius, що рухався по завантаженому шосе на швидкості 88км/год, через проблеми з інвертором почав різко знижувати швидкість, що призвело до створення аварійної ситуації на дорозі й травми водія.

Для збільшення швидкості обертання СДПМ вище номіналу (емуляція режиму

ослаблення поля) по осі d двигуна створюється додатковий реактивний струм, магніторушійна сила якого спрямована проти потоку постійних магнітів, що послабляє поле магнітів, але при цьому призводить до збільшення втрат в обмотці статора й зменшенню ККД [5].

Таким чином, проблеми аварійної роботи СДПМ вирішуються шляхом ускладнення конструкції двигуна й установки додаткових систем захисту двигуна й інвертора, що очікуване приводить до збільшення вартості всього електропривода.

Крім цього, на вартість електропривода впливає й висока ціна на постійні магніти, по оцінках експертів їх вартість становить від 30 до 60% від усієї вартості активних матеріалів електродвигуна [6,7].

Високі ціни на постійні магніти пов'язані з домінуючим положенням Китаю (90% світового виробництва) на ринку рідкісноземельних металів (РЗМ). Найбільш затребувані в цей час постійні магніти NdFeB (неодим-залізо-бор) містять у собі 20% неодиму й 5-10% диспрозію, який використовується для збереження магнітних властивостей матеріалу при високих температурах [8].

В 2011 році Китай обмежив поставки РЗМ на світовий ринок, у результаті чого ціни на неодим і диспрозій піднялися, відповідно, в 15 і 25 раз [6]. І хоча в цей час ціни на РЗМ значно знизилися немає ніяких гарантій, що ця ситуація не повториться знову.

Більше того, у своєму підсумковому звіті за 2019г [9] компанія Adamas Intelligence, що спеціалізується на аналізі ринку РЗМ, фіксує тенденцію на перевищення глобального річного попиту на РЗМ над їхнім глобальним річним виробництвом (Рис.3). Така тенденція може призвести до вичерпання накопичених запасів РЗМ та їх дефіциту вже до 2030 р.

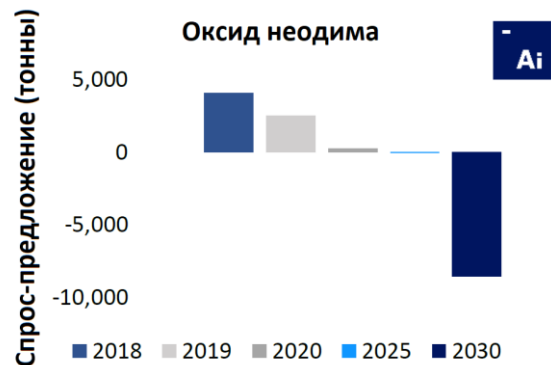


Рис. 3. Попит та пропозиція на неодим

Рішенням проблеми відмови від рідкісноземельних металів у постійних магнітах

у цей час займається цілий ряд великих державних і приватних наукових центрів [10,11,12,13].

Так, в 2016 році компанія Honda разом з Daido Steel [14] почали випуск неодимові магніти, виготовлені за технологією гарячої деформації (Hot-deformed Magnets), що дозволило відмовитися від використання в них диспрозю, зберігши високі термостійкі властивості магнітів.

Незважаючи на багатообіцяючі результати лабораторних досліджень по створенню постійних магнітів без використання неодиму, наприклад, магнітів з нітриду заліза (Fe_16N_2) [8], поки немає визначеності ні по складності технологічного процесу їх виготовлення, ні за остаточною ціною готового продукту.

Одним зі шляхів вирішення проблеми РЗМ є застосування у електромобілях електричних двигунів з мінімальним змістом постійних магнітів або зовсім без них. У цей час цим шляхом ідуть такі компанії, як BMW, Renault, Bentley і Audi.

1.2. Гібридний синхронний двигун

Конструктори BMW застосували в моделі BMW і3 (Рис.4) синхронний реактивний двигун з підмагнічуванням (СРДПМ) (Permanent-magnet assisted synchronous reluctance motor Pma-synrm), інша назва гібридний синхронний двигун (Hybrid synchronous motor HSM).

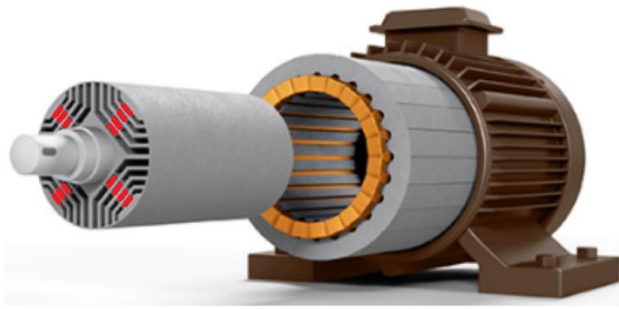


Рис. 4. Синхронний реактивний двигун з підмагнічуванням

Синхронні реактивні двигуни (СРД) мають високий ККД, вони компактні й надійні, мають низьку інерційність завдяки відсутності обмотки в роторі, але мають і істотний недолік – низький коефіцієнт потужності, що призводить до необхідності використання перетворювача частоти більшої потужності. Для збільшення коефіцієнта потужності в ротор СРДП додатково встановлюються постійні магніти, але при цьому

знову виникає проблема неможливості відключення магнітного поля.

1.3. Синхронні двигуни з електромагнітним збудженням(СДЕЗ)

Конструктори Renault при розробці електромобілів традиційно віддають перевагу двигунам з електромагнітним збудженням. Сучасні моделі Berlingo і Zoe оснащуються синхронними двигунами з електромагнітним збудженням (Рис.5) [15].



Рис. 5. Синхронний двигун BMW іх3 з електромагнітним збудженням

Незважаючи на наявність ковзного контакту, додаткових втрат в обмотці збудження й інших недоліків, властивих даному типу двигунів, можна виділити наступні переваги даного підходу:

- можливість регулювання магнітного потоку;
- відсутність дорогих постійних магнітів;
- відносно невеликі втрати в сталі при високих обертах двигуна (у чотириполюсного двигуна Renault при $n=11000$ об/хв $f = 380$ Гц, а у дванадцятиполюсного двигуна BMW і3 при тих же обертах частота $f = 1140$ Гц);
- можливість підвищити потік збудження при роботі двигуна з максимальним моментом, тим самим знизивши величину струму й номінал IGBT транзисторів, понизивши вартість інвертора;
- відсутність додаткових систем захисту двигуна й інвертора і т.д. роблять його більш кращим для розроблювачів Renault.

Крім Renault цим шляхом пішли й в BMW. Новий BMW іх3, випуск якого почався в 2020 році, оснащений синхронним тяговим двигуном з електромагнітним збудженням [16].

У серпні 2020 р. Bentley оголосив про участь у програмі OSTOPUS по створенню нового силового агрегату електромобіля без використання постійних магнітів [17].

1.4. Асинхронні двигуни

Конструктори Audi використовують у моделі e-tron два асинхронні двигуни (АД) (ASM - asynchronous machine (induction machine)) (Рис.6).

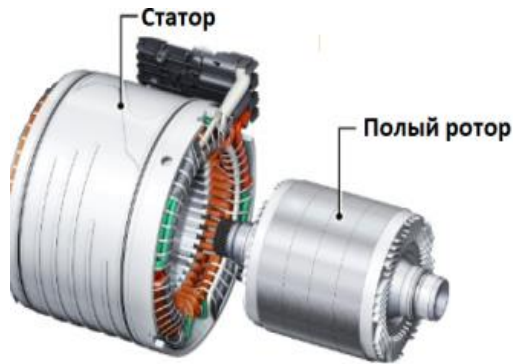


Рис. 6. Асинхронний двигун Audi e-tron.

У своїй статті «Нова електрична трансмісія Audi e-tron» (The new full electric drivetrain of the Audi e-tron) [18] автори обґрунтовують вибір Audi рядом переваг асинхронного двигуна над різними типами синхронних двигунів. Зокрема, це відсутність у конструкції АД постійних магнітів і дешевина АД в порівнянні із синхронними аналогами. Однак у асинхронного двигуна є й свої недоліки:

- необхідність організації відводу тепла від ротора, що приводить до ускладнення конструкції двигуна (порожній ротор) і збільшенню його габаритів (Рис.7.);

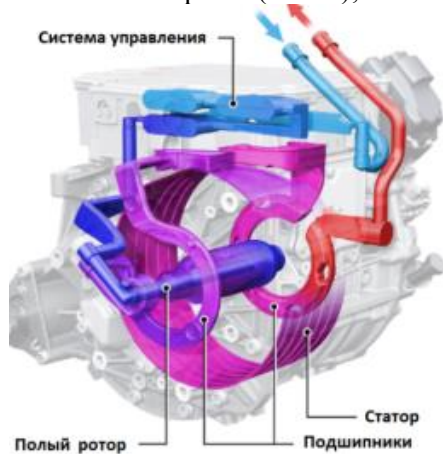


Рис. 7. Система охолодження асинхронного двигуна Audi e-tron.

- значне зменшення моменту й ККД АД через вплив індуктивності розсіювання на високих швидкостях, що приводить до необхідності збільшення потужності інвертора й двигуна.

1.5. Порівняння характеристик

На рис. 8. представлено порівняння характеристик розглянутих вище електричних двигунів однакової потужності [1].

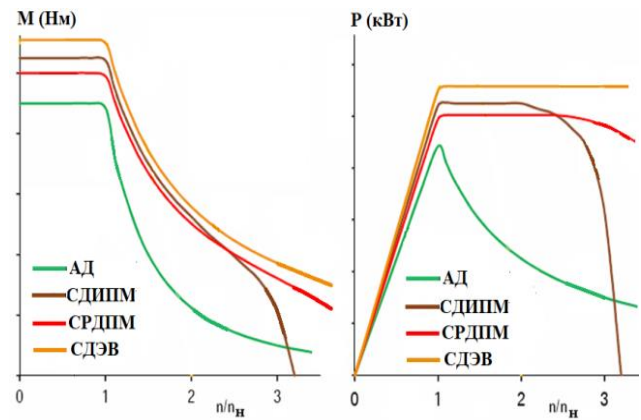


Рис. 8. Порівняння тягових характеристик двигунів електромобілів

Як видно з аналізу характеристик, із усіх представлених двигунів синхронний двигун з електромагнітним збудженням є найбільш ефективним, хоча й має, у порівнянні з іншими двигунами, найбільшу масу і габарити, що й обмежує сферу його застосування.

Однак порівняння буде неповним, якщо не порівнювати вартість даних електричних машин. У своїй статті « Electric vehicle traction motors without rare earth magnets» [5] автори приводять вартісної аналіз тягових двигунів, представлений у табл.1.

Таблиця 1
Порівняння вартості тягових двигунів

Двигун	СДПМ	АД	СДЕЗ
Пікова потужність	55кВт	50кВт	50кВт
Пікова ефективність	98%	96%	96%
Вартість активних матеріалів	242\$	144\$	144\$

2. Перспективи розвитку тягових двигунів

Очевидно, що якщо найближчим часом не буде вирішена проблема з використанням рідкісноземельних металів у постійних магнітах, вартість СДПМ суттєво зросте. Відповідно, різко скоротиться сфера застосування даних двигунів. Як видно, у найближчому майбутньому варто очікувати відродження інтересу до двигунів з електромагнітним збудженням,

причому не тільки змінного, але й постійного струму.

У зв'язку із цим великий інтерес викликають конструкції синхронних електричних машин індукторного типу, цінністю яких є безобмотковий ротор й можливість створення конструкцій з великим числом полюсів. Приклади конструкцій електричної машини постійного струму з магнітною системою індукторного типу вже існують [19].

Додатковим плюсом для синхронних машин з електромагнітним збудженням є можливість створення на їхній основі самосенсорних (без застосування датчика положення або швидкості) систем керування. Принцип роботи самосенсорних систем полягає у підмішуванні високочастотного сигналу (напруги) у статорні обмотки й аналіз відгуку струму в них же для визначення поточної магнітної геометрії машини, що є, функцією положення ротора.

Такий метод визначення положення не опирається на вимір електрорушійної сили і застосовується, починаючи з мінімальних швидкостей. Але для цього електрична машина повинна мати велику магнітну анізотропію. Конструкція СДЕЗ з явними полюсами відповідає цим вимогам, а асинхронний двигун ні.

Висновки

Електромобілебудування - молода галузь у якій ще не сформовані загальногалузеві стандарти застосування тягових двигунів. Очевидно, що донедавна де факто таким стандартом був синхронний двигун з постійними магнітами. Його достоїнством є великі ефективність і надійність, малі маса й об'єм, однак зростаюча вартість постійних магнітів зводить нанівець усі ці переваги. Таким чином, перед конструкторами знову виникає завдання створення нових високоефективних тягових двигунів з електромагнітним збудженням.

У зв'язку з цим великий інтерес викликають індукторні електричні машини. Вони надійні, тому що всі обмотки нерухомі та відсутній ковзний контакт, малоінерційні, тому що мають безобмотковий ротор, оптимізовані для роботи з великими частотами перемагнічування та не мають постійних магнітів.

Список використаної літератури

1. Merwerth J. The hybrid synchronous machine of the new bmw i3 i8 [Electronic Resource] / J. Merwerth // BMW. – 2014. – Режим доступу до ресурсу:

http://hybridfordonscentrum.se/wpcontent/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf

2. Agamloh, E., von Jouanne, A., Yokochi, A. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. [Electronic Resource] / E. Agamloh, F. von Jouanne, A. Yokochi, // – 2020. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/340841920_An_Overview_of_Electric_Machine_Trends_in_Modern_Electric_Vehicles/fulltext/5ea04174299bf1f16571d8af/An-Overview-of-Electric-Machine-Trends-in-Modern-Electric-Vehicles.pdf

3. Sarlioglu, B., T. Morris, C., Han, D., Li, S. Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. [Electronic Resource]. / B. Sarlioglu, C. T. Morris, D. Han, S. Li // –2016. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7426993>

4. Vartabedian, R.. Electrical defects cause Priuses to stall; Toyota may be bracing for a legal fight as safety worries grow. [Electronic Resource]. / R. Vartabedian, // –2018. Retrieved from <https://www.latimes.com/local/california/la-fi-toyota-prius-investigation-20180423-story.html>

5. Widmer, J., Martin, R., Kimiabeigi, M.. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. [Electronic Resource]. / J. Widmer, R. Martin, M. Kimiabeigi // –2015 Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2015.02.001>

6. Burress, T. Non-Rare Earth Motor Development. [Electronic Resource]. / T. Burress // –2015. Retrieved from https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062_burress_2015_o.pdf

7. Dorrell, D., Knight, A., Popescu, M., Evans, L., Staton, D. Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. [Electronic Resource]. / D. Dorrell, A. Knight, M. Popescu, L. Evans, D. Staton // –2010 Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/5618318/>

8. Guyonnet, D., Lefebvre, G., Menad, N. Rare earth elements and high-tech products. [Electronic Resource]. / D. Guyonnet, G. Lefebvre, N. Menad // –2018. Retrieved from https://www.cec4europe.eu/wp-content/uploads/2018/09/Chapter_3_3_Guyonnet_et_al_Rare_earth_elements_and_high_tech_products.pdf

9. Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook (Free Report). [Electronic Resource]. – 2019. Retrieved from <https://www.adamasintel.com/rare-earth-market-issues-and-outlook/>

10. Rare Earth Alternatives in Critical Technologies. [Electronic Resource]. – 2011.

Retrieved from <https://arpa.e.energy.gov/technologies/programs/react>

11. Coey, J. Perspective and Prospects for Rare Earth Permanent Magnets. [Electronic Resource]. / J. Coey // –2020. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991830835X>

12. Cui, J., Kramer, M., Zhou, L., Liu, F., Gabay, A., Hadjipanayis, G. et al. Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. [Electronic Resource]. / J. Cui, M. Kramer, L. Zhou, F. Liu, A. Gabay, G. Hadjipanayis // –2018. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645418305858>

13. Mohapatra, J., Liu, J. Rare-Earth-Free Permanent Magnets: The Past and Future. [Electronic Resource]. / J. Mohapatra, J. Liu // –2018. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567271918300015>

14. Daido Steel and Honda Adopt World's First Hybrid Vehicle Motor Magnet Free of Heavy Rare Earth Elements – Honda Freed, on sale this fall will be the first hybrid vehicle to adopt new magnet – | DAIDO STEEL. [Electronic Resource]. –2016. Retrieved from https://www.daido.co.jp/en/event/160712_freemag_hevmotor.html

15. Torregrossa, M. Renault R240 - A la découverte du moteur électrique "made in Cléon." [Electronic Resource]. / M. Torregrossa // –2015. Retrieved from <https://www.automobile-propre.com/renault-r240-decouverte-moteur-electrique-made-in-cleon/>

16. Specifications of the BMW iX3, valid from 07/2020. [Electronic Resource]. –2020. Retrieved from <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0314265EN/specifications-of-the-bmw-ix3-valid-from-07/2020?language=en>

17. Bentley motors. Bentley motors looks to the future of electric drive. – 2020. Retrieved from <https://www.bentleymedia.com/en/newsitem/1128-bentley-motors-looks-to-the-future-of-electric-drive#images>.

18. Liebl, J. Der Antrieb Von Morgen. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. [Text]. / J. Liebl // –2019.

19. Івлєв Д. А. Низькошвидкісний генератор постійного струму з безобмотковим ротором для вітроенергетичної установки [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук :

спец. 05.09.01 "Електричні машини і апарати" / Івлєв Дмитро Анатолійович – Одеса, 2019. – 21 с.

References

1. Merwerth J. (2014) The hybrid synchronous machine of the new bmw i3 i8 BMW.

http://hybridfordonscentrum.se/wpcontent/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf

2. Agamloh, E., von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2020). An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/340841920_An_Overview_of_Electric_Machine_Trends_in_Modern_Electric_Vehicles/fulltext/5ea04174299bf1f16571d8af/An-Overview-of-Electric-Machine-Trends-in-Modern-Electric-Vehicles.pdf

3. Sarlioglu, B., T. Morris, C., Han, D., & Li, S. (2016). Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7426993>

4. Vartabedian, R. (2018). Electrical defects cause Priuses to stall; Toyota may be bracing for a legal fight as safety worries grow. Retrieved from <https://www.latimes.com/local/california/la-fi-toyota-prius-investigation-20180423-story.html>

5. Widmer, J., Martin, R., & Kimiabeigi, M. (2015). Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2015.02.001>

6. Burrell, T. (2015). Non-Rare Earth Motor Development. Retrieved from https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/edt062_burrell_2015_o.pdf

7. Dorrell, D., Knight, A., Popescu, M., Evans, L., & Staton, D. (2010). Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/5618318/>

8. Guyonnet, D., Lefebvre, G., & Menad, N. (2018). Rare earth elements and high-tech products. Retrieved from https://www.cec4europe.eu/wp-content/uploads/2018/09/Chapter_3_3_Guyonnet_et_al_Rare_earth_elements_and_high_tech_products.pdf

9. Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook (Free Report). (2019). Retrieved from <https://www.adamasintel.com/rare-earth-market-issues-and-outlook/>

10. Rare Earth Alternatives in Critical Technologies. (2011). Retrieved from <https://arpa.e.energy.gov/technologies/programs/react>

11. Coey, J. (2020). Perspective and Prospects for Rare Earth Permanent Magnets. Retrieved from

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209580991830835X>

12. Cui, J., Kramer, M., Zhou, L., Liu, F., Gabay, A., & Hadjipanayis, G. et al. (2018). Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645418305858>

13. Mohapatra, J., & Liu, J. (2018). Rare-Earth-Free Permanent Magnets: The Past and Future. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567271918300015>

14. Daido Steel and Honda Adopt World's First Hybrid Vehicle Motor Magnet Free of Heavy Rare Earth Elements – Honda Freed, on sale this fall will be the first hybrid vehicle to adopt new magnet – | DAIDO STEEL. (2016). Retrieved from https://www.daido.co.jp/en/event/160712_freemag_hevmotor.html

15. Torregrossa, M. (2015). Renault R240 - A la découverte du moteur électrique "made in Cléon."

Retrieved from <https://www.automobile-propre.com/renault-r240-decouverte-moteur-electrique-made-in-cleon/>

16. Specifications of the BMW iX3, valid from 07/2020. (2020). Retrieved from <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0314265EN/specifications-of-the-bmw-ix3-valid-from-07/2020?language=en>

17. Bentley motors. (2020). Bentley motors looks to the future of electric drive. Retrieved from <https://www.bentleymedia.com/en/newsitem/1128-bentley-motors-looks-to-the-future-of-electric-drive#images>.

18. Liebl, J. (2019). Der Antrieb Von Morgen 2019. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

19. Ivlev D. A. (2019) Low-speed DC generator with windingless rotor for wind power plant: author's ref. dis. for science. degree of Cand. tech. Science: special. 05.09.01 "Electric machines and devices" Odessa, 21 p.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF TRACTION ENGINES OF PASSENGER ELECTRIC VEHICLES

D. Ivliev¹, V. Kosenkov², O. Vynakov¹, Jiang Hailong¹

¹Odessa Polytechnic State University

²Khmelnytskyi National University

Abstract. Analysis of the history of the development of electric passenger cars shows that large-scale industrial production of electric transport began relatively recently, about 20 years ago. Given that the life cycle of a passenger car average of 10-15 years, it becomes possible to assess the advantages and disadvantages of operating various types of traction engines for electric vehicles.

Analysis of the articles shows that most of the large manufacturers prefer to equip their electric vehicles with permanent magnet synchronous traction engines. This engine most fully meets the main criteria for a traction drive, such as small dimensions, high efficiency, and reliability. However, 20 years of operation have revealed several technical and economic problems associated with this engine.

The main technical problem is the impossibility of regulating the magnetic flux and the impossibility of turning it off during the emergency operation of the engine. In modern synchronous traction engines with magnetolectric excitation, this drawback had been nearly eliminated, but an analysis of the articles shows that over time the reliability of its control system begins to decline.

An economic problem is associated with the constant growth of the cost of permanent magnets. Thus for the last 20 years, it has increased significantly.

All this stimulates manufacturers to look for alternatives to this engine. They consider the synchronous reluctance engine with magnetization, the synchronous engine with electromagnetic excitation, and an asynchronous engine as such alternatives. Comparative analysis shows that these engines are cheaper than a permanent magnet engine, but they are inferior to it in compare to weight and dimensions, and reliability. The works on this matter will be continued in the coming years, that is why a revival of interest in DC traction engine and synchronous inductor motors can be expected. Also of great interest is the work on the creation of self-sensing (without the use of a position or speed sensor) control systems.

Key words: traction characteristic, permanent magnets, rare earth metals, efficiency, rotor, stator.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕГКОВЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Д. А. Ивлев¹, А. Ф. Винаков¹, В. Д. Косенков², Цзян Хайлун¹

¹Государственный университет «Одесская политехника»

²Хмельницкий национальный университет

Аннотация. Рассмотрены конструкции современных тяговых двигателей легковых электромобилей. Показано, что из-за растущей цены на постоянные магниты к 2030 году использование двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением станет экономически нецелесообразным. Рассмотрены альтернативные конструкции и сделан вывод о необходимости разработки новых типов электрических машин с электромагнитным возбуждением.

Ключевые слова: тяговая характеристика, постоянные магниты, редкоземельные металлы, коэффициент полезного действия, ротор, статор.

Отримано 25.04.2021



Івлєв Дмитро Анатолійович, державний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічної інженерії. Пр. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: ivlevd@opu.ua, тел.: 0934133405

Dmytro Ivliev, Odessa Polytechnic State University, Doctor of Philosophy, Associate professor Department of Electromechanical Engineering, av. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, E-mail: ivlevd@opu.ua, tel: 0934133405

ORCID ID: 0000-0002-9938-9321



Винаков Олександр Федорович, державний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічної інженерії. Пр. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: afvinakov@opu.ua. тел.: 0639437358

Oleksandr Vynakov, Odessa Polytechnic State University, Doctor of Philosophy, Associate professor Department of Electromechanical Engineering, av. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, E-mail: afvinakov@opu.ua. tel.: 0639437358

ORCID ID: 0000-0002-6630-8986



Косенков Володимир Данилович, Хмельницький національний університет, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики та електротехніки. вул. Інститутська, 11, Хмельницький, Україна E-mail: fpkts@khnu.km.ua

Volodymyr Kosenkov, Khmelnytskyi National University, Doctor of Philosophy, Professor, Head of the Department of Physics and Electrical Engineering, str. Instytut's'ka, 11, Khmelnytskyi, Ukraine, E-mail: fpkts@khnu.km.ua

ORCID ID: 0000-0021-7463-3028



Цзян Хайлун, державний університет «Одеська політехніка», студент гр. ЕП-161, кафедри електромеханічної інженерії. Пр. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: jiang.9224981@stud.opu.ua, тел.: 0930314358

Jiang Hailong, Odessa Polytechnic State University, student EP-161, Department of Electromechanical Engineering, av. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, E-mail: jiang.9224981@stud.opu.ua, tel.: 0930314358

ORCID ID: 0000-0003-4738-4163