

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З АКСІАЛЬНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ В АВІАЦІЇ ТА НА ТРАНСПОРТІ

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Семенюк О.С., аспірант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. Аксиальні електродвигуни (англ. axial flux motors) – це електричні машини, у яких магнітний потік проходить вздовж осі обертання, паралельно до напрямку обертання ротора. Така конструкція (рис. 1 та рис. 2) є відмінною від традиційних радіальних електродвигунів, де магнітний потік проходить перпендикулярно до осі обертання.

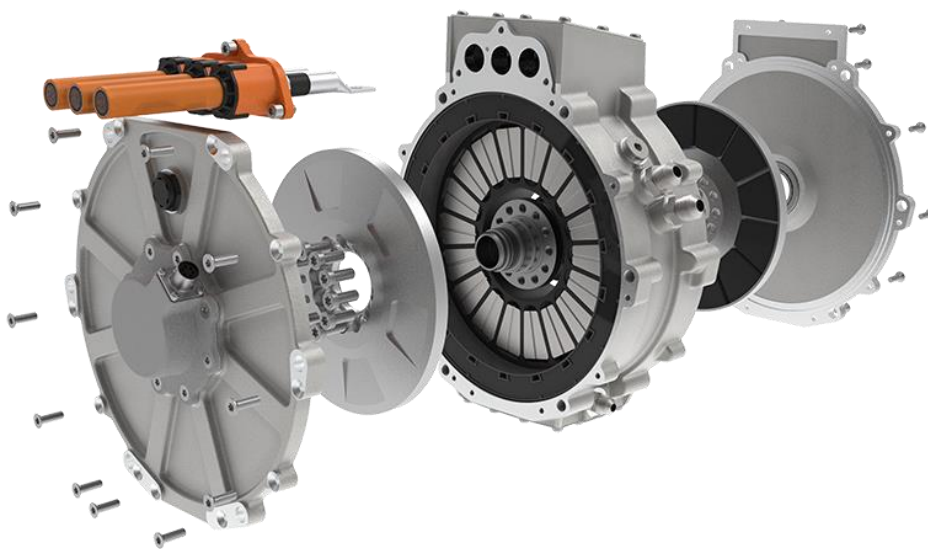


Рисунок 1 – Конструкція аксіального електродвигуна

Результати аналізу літературних джерел [1-10] свідчить, що електродвигуни з аксіальним магнітним потоком мають ряд суттєвих переваг перед традиційними двигунами, зокрема: значно більшу питому потужність; менші габарити конструкції; збільшену енергоефективність, тощо.

У конструкціях двигунів з аксіальним магнітним потоком зазвичай використовують високоефективні постійні магніти і передові системи охолодження, що дозволяє їм витримувати високі навантаження без перегріву і забезпечує їх стабільну роботу в інтенсивних умовах.

Аксиальний електродвигун, як і двигун традиційної конструкції, має частину, що обертається – ротор та нерухому частину – статор. Як правило, аксіальні двигуни мають по два ротори на яких розміщені потужні постійні магніти. На статорах таких двигунів зазвичай розміщують концентричні котушки намотані навколо феромагнітних осердь. На рис. 2 показані складові електродвигуна з аксіальним магнітним потоком компанії YASA (Великобританія). Ці електродвигуни ще часто називають «млинцевими двигунами» через їхню плоску дископодібну структуру.

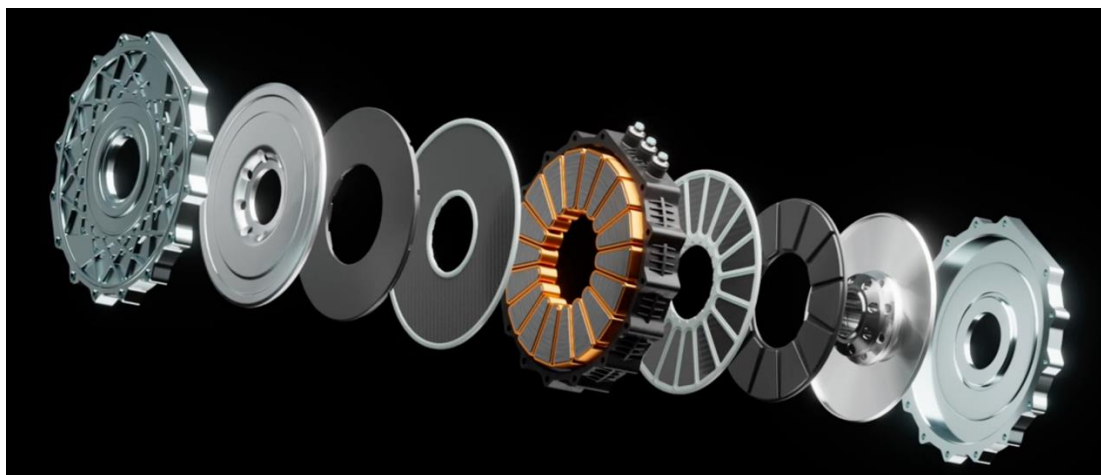


Рисунок 2 – Аксіальний електродвигун компанії YASA

Радіальні двигуни, які наразі домінують на ринку, мають магнітний потік, що проходить від центру ротора до країв статора. Однак аксіальні двигуни мають кілька ключових переваг:

- *Щільність потужності.* Завдяки коротшому магнітному шляху, аксіальні двигуни забезпечують більшу питому потужність (кількість потужності на одиницю маси) – до 10 кВт/кг при тривалій роботі і до 40 кВт/кг при пікових короткочасних перевантаженнях. Це робить їх перспективними для використання в умовах обмеженого простору.

- *Енергоефективність.* Аксіальні двигуни демонструють вищу ефективність через менші магнітні та електричні втрати втрати, що сприяє меншому нагріву навіть в умовах високих навантажень.

- *Модульність.* Конструкція дозволяє легко змінювати кількість полюсів та змінювати інші елементи. Це забезпечує більшу гнучкість у проектуванні для різних застосувань, таких як авіація, транспорт або промислові машини.

Зазначені ключові переваги аксіальних двигунів, особливо надзвичайно висока питома потужність, зумовлюють перспективи їх використання в тих пристроях де для розміщення електродвигунів виділяється обмежений простір та/або вимагається низька їх вага. Найбільш очевидною сферою використання аксіальних двигунів є електротранспорт причому як наземний так і водний, а також різноманітні літальні апарати.

На момент написання статті основними виробниками електродвигунів з аксіальним магнітним потоком є: YASA Limited (Великобританія), Emrax (Словенія) і Magnax BV (Бельгія).

Нижче наведені приклади практичного застосування аксіальний двигунів, що відомі на даний час.

1. Авіація та літальні апарати. Для електричних літаків, наприклад, літальних таксі або дронів, аксіальні двигуни стають ідеальним вибором через їхні компактні розміри і високу енергоефективність. На рис. 3 показано пілотований літальний апарат Apis EA2 з електродвигуном компанії Emrax.



Рисунок 3 – Пілотований літальний апарат Apis EA2

За необхідності забезпечення більшої потужності ніж розвиває окремий двигун, є можливість компонувати їх по декілька штук. На рис. 4 показана компоновка з трьох електродвигунів YASA для літака.

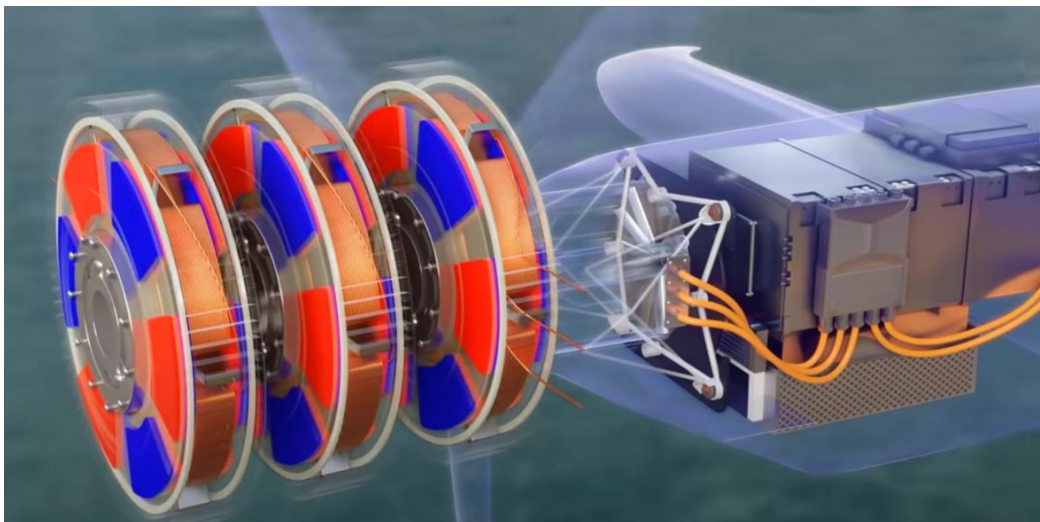


Рисунок 4 – Компоновка з трьох електродвигунів YASA для літака

На сьогодні відомо, що такі компанії, як Rolls-Royce, Pipistrel, Hundai та ін., розробляють електричні літаки, які використовують аксіальні двигуни. Наприклад, проект літаків з електричним вертикальним зльотом і посадкою (eVTOL), які пропонується використовувати як повітряне таксі. Аксіальні двигуни з високим крутним моментом і легкою конструкцією добре підходять для eVTOL, допомагаючи цим літальним апаратам досягати вертикального підйому і ефективного польоту. Компактний розмір дозволяє конструкторам більш гнучко розміщувати двигуни всередині літака, оптимізуючи аеродинаміку. На рис. 5 показаний проект безпілотного повітряного таксі компанії Hundai.

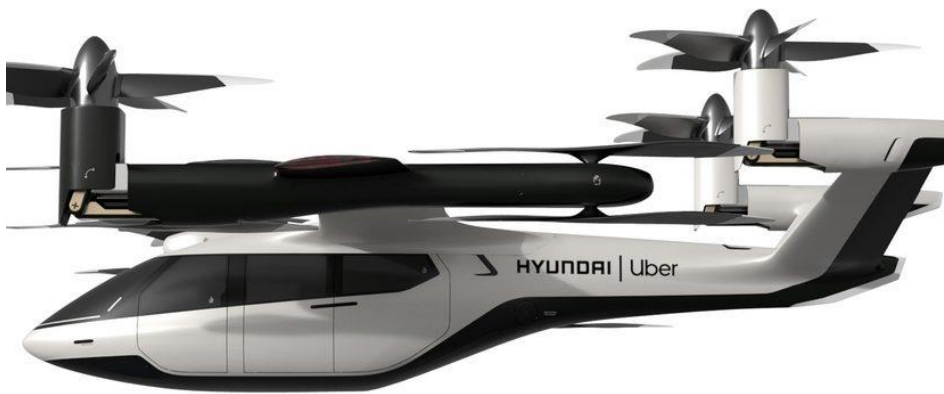


Рисунок 5 – Безпілотний літальний апарат для міського перевезення

Аксіальні двигуни також доцільно використовувати в складі гібридних авіаційних силових установок, які поєднують традиційні двигуни внутрішнього згоряння з електродвигунами. Висока питома потужність дозволяє аксіальним електродвигунам слугувати в якості допоміжних, забезпечуючи додаткову тягу під час зльоту або польотних маневрів, не додаючи значної ваги.

2. Водний транспорт. Водний транспорт – це ще одна сфера, де двигуни з аксіальним магнітним потоком набувають все більшого поширення. Попит на більш ефективні та екологічні силові установки спонукає до впровадження технології аксіальних електродвигунів в таких пристроях як електричні яхти, пороми, безпілотні морські дрони та ін.

Так, наприклад, в електричних човнах і яхтах завдяки здатності аксіальних двигунів забезпечувати високу потужність при мінімальній вазі, з'являється можливість розмістити більше акумуляторних батарей, збільшуючи тим самим запас ходу і зменшуючи шкідливі викиди. Такі компанії, як Torqeedo, вже використовують аксіальні електродвигуни в своїх рішеннях для електричних суден. На рис. 6 показано аксіальний двигун компанії Emrax, що встановлений на яхту.



Рисунок 6 – Аксіальний електродвигун Emrax 228 встановлений на яхту

Компактність та ефективність аксіальних двигунів робить їх ідеальними для *безпілотних надводних суден (USV)*, що використовуються у військових, дослідницьких та комерційних цілях. Високий крутний момент двигунів дозволяє цим суднам ефективно працювати в складних морських умовах без надмірного споживання енергії.

Розробники електричних поромів також зацікавились використанням аксіальних двигунів в складі силових установок, оскільки їх ефективність і компактні розміри дозволяють використовувати більшу ємність акумуляторів, що робить можливим здійснення поромних перевезень на більші відстані без необхідності постійної підзарядки або використання пального.

3. Електромобілі та гібридні автомобілі. Електромобілі є однією з найочевидніших сфер де аксіальні двигуни мають чудову перспективу впровадження. Менші розміри та нижча, порівняно з традиційними електродвигунами, вага дозволяє збільшити відстань, яку електромобіль чи гібридний автомобіль може проїхати на одному заряді акумулятора. Саме тому такі відомі автовиробники як, наприклад, Mercedes-Benz, Tesla і Rimac, зацікавлені у впровадженні таких технологій, щоб покращити ефективність своїх транспортних засобів. Про це говорить те, що 22 липня 2021 року компанія YASA Limited, один з найбільших виробників електродвигунів з аксіальним магнітним потоком, була придбана компанією Mercedes-Benz [11].

На рис. 7 зображено гібридний суперкар Lamborghini Temerario, який оснащений бітурбованим двигуном внутрішнього згоряння V8 в поєднанні з трьома електродвигунами з аксіальним магнітним потоком компанії YASA Limited.



Рисунок 7 – Гібридний суперкар Lamborghini Temerario з аксіальними електродвигунами YASA

Висновки. Електродвигуни з аксіальним магнітним потоком мають значні переваги перед традиційними електродвигунами. Тому такі двигуни готові відігравати трансформаційну роль в розвитку майбутніх транспортних засобів –

від високопродуктивних електромобілів до електричних літаків і морських суден. Висока питома потужність, компактні розміри та енергоефективність роблять їх ідеальними для цілого ряду застосувань, де традиційні двигуни мають недостатні характеристики. Оскільки світ рухається до більш компактних та ефективних транспортних рішень, двигуни з аксіальним магнітним потоком матимуть величезну перспективу впровадження в транспортних засобах на суші, морі та в повітрі.

Перелік посилань

1. Kim, K., Kang, S., & Choi, S. (2022). "Design and Performance Analysis of High Power Density Axial Flux Motors for Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(1), 66-74.
2. Parviainen, A., & Niemelä, M. (2021). "Axial Flux Motors in Electric Transportation: A Technical and Economic Analysis." *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 13(3), 256-272.
3. Gieras, J. F., & Wang, R. J. (2020). "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines for Electric Transportation Applications." *Renewable Energy*, 145, 1772-1780.
4. Fleischer, K., & Mertens, A. (2021). "Thermal Management Strategies for Axial Flux Electric Motors in High-Power Applications." *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 243-254.
5. El-Refaie, A. M., & Soong, W. L. (2019). "High-Performance Electric Machines for Electric Vehicles: Axial Flux Motor Design." *IEEE Electrification Magazine*, 7(1), 40-49.
6. Fodorean, D., & Popescu, M. (2023). "Prospects of Axial Flux Motors in Electric and Autonomous Transportation." *Journal of Advanced Transportation*, 57(4), 1185-1198.
7. Jahns, T. M., & Ma, S. (2020). "Emerging Trends in Axial Flux Machine Applications for EVs." *Journal of Electrical Engineering and Automation*, 37(5), 230-242.
8. Morimoto, S., & Takeda, Y. (2022). "Comparative Analysis of Radial and Axial Flux Motors in High-Density Transport Applications." *Energies*, 15(8), 2984.
9. Boschert, F., & Maier, T. (2021). "Performance Improvement in Axial Flux Electric Motors for Lightweight Transportation." *Journal of Mechatronics and Automation*, 12(2), 150-162.
10. Hwang, J., & Chun, Y. (2023). "Next-Generation Axial Flux Motors: Applications in Urban and Aerial Electric Transport." *Journal of Future Transportation Technologies*, 14(3), 188-199.
11. https://en.wikipedia.org/wiki/YASA_Limited