

ТЯГОВІ ДВИГУНИ З АКСІАЛЬНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ ДЛЯ ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ. КОНСТРУКЦІЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

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

Вступ. Електродвигуни з аксіальним магнітним потоком (англ. axial flux motors) або, як їх ще називають, **аксіальні двигуни** – це електричні машини, у яких магнітний потік проходить вздовж осі обертання, паралельно до напрямку обертання ротора. Така конструкція є відмінною від традиційних радіальних електродвигунів, де магнітний потік проходить перпендикулярно до осі обертання. Аксіальна конструкція сприяє значному зменшенню габаритів двигуна, збереженню високої щільності потужності та підвищенню енергоефективності, що робить їх привабливими для застосувань, де обмеження ваги та простору мають критичне значення, таких як електромобілі, авіація та високопродуктивні машини.

Аксіальні двигуни мають специфічну конструкцію (рис. 1), яка забезпечує високий крутний момент завдяки паралельному розташуванню ротора і статора, що збільшує площу взаємодії магнітного потоку з електричними обмотками. Крім того, зменшений повітряний зазор між ротором і статором дозволяє знижувати втрати енергії, що додатково підвищує ефективність роботи.



Рисунок 1 – Конструкція двигуна з аксіальним магнітним потоком компанії MAGNAX

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.

Аксіальний двигун складається з таких компонентів:

Ротор – обертова частина двигуна, яка має постійні магніти. На даний момент найчастіше використовується конструкція з двома роторами.

Статор – нерухома частина двигуна, на якій розміщені концентричні котушки намотані навколо феромагнітних осердь.

Наразі на ринку домінують традиційні електродвигуни з радіальним магнітним потоком, який проходить перпендикулярно осі обертання ротора, тобто, умовно, від центру ротора до країв статора. Однак аксіальні двигуни мають кілька ключових **переваг** [1-7]:

1. **Компактність.** Одна з найбільших переваг аксіальних двигунів – компактний розмір. Вони займають менше місця, ніж радіальні аналоги, що робить їх ідеальними для встановлення у місцях, де простір обмежений, зокрема на транспортних засобах. Це, в свою чергу, дозволяє інженерам звільнити більше місця для акумуляторів або інших компонентів, підвищуючи загальну ефективність транспортного засобу.

2. **Висока питома потужність.** Основною перевагою аксіальних двигунів для транспорту є їхня висока питома потужність – співвідношення потужності до ваги двигуна. Для транспорту, такого як електромобілі або літальні апарати, кожен кілограм має значення. Легші двигуни дозволяють знизити загальну вагу транспортного засобу, що в свою чергу збільшує його запас ходу.

3. **Підвищена енергоефективність.** Ці двигуни можуть досягати вищих показників ефективності, таких як ККД, ніж їх традиційні аналоги з радіальним магнітним потоком.

4. **Простота обслуговування і модульність.** Аксіальні двигуни часто мають простішу конструкцію, ніж їхні радіальні аналоги. Тому обслуговування таких двигунів спрощується. Модульна структура таких двигунів дозволяє швидше ремонтувати або замінювати окремі компоненти.

Зазначені переваги обумовлюють очевидну сферу застосування аксіальних двигунів – транспорт. Зокрема:

- **Електромобілі.** Зменшення ваги двигуна допомагає підвищити загальну ефективність автомобіля та збільшити відстань, яку можна проїхати на одному заряді.

- **Авіація.** Завдяки високому співвідношенню потужності до маси, аксіальні двигуни можуть використовуватися у літаках та безпілотниках, де критично важлива вага.

- **Водний транспорт.** Човни та яхти також можуть виграти від високої потужності та компактності аксіальних двигунів, що допомагає зменшити використання акумуляторних батарей.

Застосування в електромобілях. Електромобілі є однією з основних сфер де аксіальні двигуни можуть значно вплинути на майбутні розробки. Так компанія YASA активно впроваджує свої аксіальні двигуни в автомобільну промисловість. Наприклад, вони використовуються в моделях Ferrari SF90 Stradale (рис. 2), що дозволяє значно підвищити потужність автомобіля без збільшення ваги.



Рисунок 2 – Ferrari SF90 Stradale з аксіальними електродвигунами YASA

Електродвигуни з аксіальним магнітним потоком компанії YASA Limited (рис. 3) відомі тим, що у них значення питомої потужності сягають від 5 до 10 кВт/кг. Їх запатентована конструкція має компактну і масштабовану архітектуру. Наприклад, YASA 750 R пропонує до 790 Нм крутного моменту і 200 кВт потужності при вазі двигуна всього 27 кг.



Рисунок 3 – Конструкція аксіального електродвигуна компанії YASA Motors

Ще одним відомим виробником електродвигунів з аксіальним магнітним потоком є словенська компанія Emrax Motors. Аксіальні електродвигуни цієї компанії також пропонують конкурентоспроможну питому потужність від 4 до 9 кВт/кг, залежно від моделі. Двигуни Emrax особливо популярні в авіації та морській техніці. Наприклад, Emrax 228 забезпечує до 100 кВт потужності і 240 Нм крутного моменту, але при цьому важить всього 11 кг.

Для підвищення питомої потужності в аксіальних двигунах як правило застосовують:

- *Механізми рідинного охолодження.* Багато аксіальних двигунів, включаючи конструкції YASA, оснащені системами рідинного охолодження. Ці системи дозволяють підвищити густину струму в обмотках двигуна без перегріву, що збільшує вихідну потужність двигуна без збільшення його маси.

- *Високоєфективні матеріали.* У двигунах з аксіальним потоком використовуються передові матеріали, такі як високоєфективні постійні магніти та легкі сплави для зменшення загальної ваги. Ці матеріали дозволяють виробникам досягти такої ж, або навіть більшої, вихідної потужності при мінімізації маси двигуна.

Незважаючи на перелічені переваги, впровадження електродвигунів з аксіальним магнітним потоком відбувається досить повільними темпами. Причиною, зокрема, є відносно висока виробнича собівартість подібних двигунів. Сучасні матеріали, такі як потужні магніти або м'які магнітні композити (SMC), а також спеціалізовані технології виробництва, призводять до збільшення собівартості.

Наразі аксіальні двигуни виробляються у відносно невеликих обсягах, орієнтовані на нішеві застосування у високопродуктивних транспортних засобах та спеціалізованих галузях промисловості. Такі компанії, як YASA Limited, Emrax і Magnax, працюють над нарощуванням виробничих потужностей, але знадобиться час, перш ніж осьові двигуни можна буде виробляти в масштабах, необхідних для широкого використання.

Висновки. Електродвигуни з аксіальним магнітним потоком мають значні переваги для сучасних транспортних систем. Завдяки високому ККД, компактним розмірам та адаптивності, вони добре підходять для приводів наступного покоління електромобілів, літаків та морських суден. Оскільки промисловість надає все більшого значення сталому розвитку, впровадження аксіальних двигунів, ймовірно, прискориться, прокладаючи шлях до більш енергоефективного та екологічно чистого транспорту.

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. Fodorean, D., & Popescu, M. (2023). "Prospects of Axial Flux Motors in Electric and Autonomous Transportation." *Journal of Advanced Transportation*, 57(4), 1185-1198.
5. 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.
6. Morimoto, S., & Takeda, Y. (2022). "Comparative Analysis of Radial and Axial Flux Motors in High-Density Transport Applications." *Energies*, 15(8), 2984.
7. Boschert, F., & Maier, T. (2021). "Performance Improvement in Axial Flux Electric Motors for Lightweight Transportation." *Journal of Mechatronics and Automation*, 12(2), 150-162.