

ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВИХ PMASR ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОБУСІВ

Дмитро ЛЮБАРСЬКИЙ¹, Олег НІКОНОВ², Борис ЛЮБАРСЬКИЙ³

¹*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID 0003-3535-9809, e-mail: dizas005@ukr.net*

²*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, ORCID 0000-0002-8878-4318, e-mail: nikonov.oj@gmail.com*

³*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут, Харків, Україна, ORCID 0002-2985-7345, e-mail: lboris1911@ukr.net*

Зменшення використання приватного транспорту є важливим кроком у поліпшенні екологічної сталості та енергоефективності транспортної системи в містах. Цю мету можна досягти шляхом впровадження екологічних видів транспорту, зокрема електробусів, які є однією з найбільш ефективних альтернатив приватному транспорту з ДВЗ.

Електробуси не викидають шкідливих викидів, таких як вуглекислий газ та інші отруйні речовини, які є головними причинами забруднення повітря в містах. Крім того, вони є більш енергоефективними, оскільки для їх руху використовується електроенергія, яка може бути вироблена з відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія.

Проте, для успішного впровадження електробусів потрібно вирішити деякі завдання. Наприклад, необхідно розширити інфраструктуру для зарядки електробусів та забезпечити достатню кількість електробусів для пасажирських перевезень. Крім того, важливо вирішити питання розробки потужного електричного приводу з підвищеними показниками енергоефективності. [1].

Тяговий електричний двигун є ключовим елементом, що визначає енергетичну ефективність тягового приводу електробусу. Один з перспективних типів таких двигунів - це синхронно-реактивний двигун з постійними магнітами (PMASR, Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor). В порівнянні з іншими типами електродвигунів, він має декілька переваг, таких як висока ефективність, високі тягові характеристики та низька вага. Окрім цього, PMASR не потребує додаткових джерел живлення для створення магнітного поля, оскільки в ньому використовуються вбудовані постійні магніти. [2,3].

Для визначення основних характеристик тягового синхронно-реактивного електродвигуна з постійними магнітами широко застосовуються сучасні комп'ютерні

технології. Один із найпоширеніших методів є метод скінчених елементів [4], який дозволяє точно моделювати магнітне поле в середовищі. Крім цього, використовуються спеціалізовані програмні засоби для моделювання електричних і механічних параметрів двигуна, що дозволяє здійснити оптимальний вибір конструктивних параметрів. Використання таких технологій дозволяє значно прискорити процес розробки і випробування тягового двигуна, а також отримати більш точні та надійні результати.

Була розроблена математична модель, яка дозволяє визначити електромагнітний момент синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими або секціонованими постійними магнітами. Для досягнення цієї мети використовується метод скінчених елементів, який дозволяє розрахувати магнітне поле у плоско-паралельній формулюванні задачі. Особливістю цієї моделі є використання адаптивної скінченно-елементної сітки, яка дозволяє більш точно враховувати геометрію ротору та розподіл магнітного поля. [2,3].

Були розроблені методи синтезу оптимальних геометричних розмірів ротору для синхронно-реактивних двигунів з несекціонованими або секціонованими магнітами. Ці методи базуються на розв'язанні задачі умовної оптимізації, де параметри ротору вибираються таким чином, щоб досягти максимального електромагнітного моменту за обмеженнями, що задані.

Для розв'язання задачі оптимізації використовувався метод Нелдера-Міда. Цей числовий метод оптимізації без похідних дозволяє знаходити локальні мінімуми або максимуми функції. Використання методу Нелдера-Міда дозволяє ефективно знаходити оптимальні значення параметрів ротору, які відповідають обмеженням і максимізують геометричні критерії ротору. [5].

Було розроблено програмний код у середовищі MATLAB (США) з використанням комплексу оптимізації optlab (Україна) [5,6], який дозволяє проводити оптимізацію параметрів синхронно-реактивних двигунів з як секціонованими, так і несекціонованими постійними магнітами. Для розв'язання задачі оптимізації, включаючи визначення цільової функції та урахування нерівностей в обмеженнях, використовується середовище скінчено-елементного розрахунку femm [4]. Також були розроблені основні геометричні моделі для моделювання магнітного поля синхронно-реактивних двигунів методом скінчених елементів.

На підставі використання розробленого програмного комплексу для оптимізації параметрів тягових синхронних двигунів з постійними магнітами (PMASR) для електробусів, були отримані такі результати.

- Оптимізація параметрів ротору та статора призвела до покращення електромагнітного моменту. Це означає, що двигун може генерувати більший

крутний момент в заданих умовах роботи, що має важливе значення для забезпечення потужного прискорення та покращення тягових характеристик електробуса.

- Покращення енергоефективності: Оптимізація параметрів дозволила зменшити втрати потужності в двигуні, що сприяє покращенню його енергоефективності. Це означає, що електробус зможе заощаджувати більше електроенергії та мати більшу дальність ходу на одному заряді.

- Зменшення розмірів та маси двигуна: Шляхом оптимізації геометричних параметрів, вдалося зменшити розміри та масу двигуна, при цьому зберігаючи його характеристики. Це призводить до зниження загальної маси електробуса, поліпшення його маневреності та експлуатаційних характеристик.

Шляхом оптимізації параметрів несекціонованого ротору вдалося досягти покращення моменту на 32,2% порівняно зі стандартною конструкцією. Крім того, були встановлені оптимальні геометричні параметри для розташування постійних магнітів, такі як відстань від межі полюсної вісі (0,0195 м), кут нахилу ($35,9^\circ$), повітряний зазор (0,0013 м) та кут навантаження двигуна ($113,62^\circ$ ел.). [2].

В результаті розв'язання задачі синтезу параметрів ротору з секціонованими магнітами було досягнуто зниження об'єму постійних магнітів в 2,27 рази порівняно зі стандартною конструкцією. Це значне зменшення об'єму постійних магнітів сприятиме зниженню витрат на їх виробництво та виготовлення ротору в цілому [2].

Також було встановлено оптимальні геометричні розміри для постійних магнітів, зокрема товщину - 5 мм, 5,2 мм і 5 мм, а також відстань між ними - 17,8 мм та 15,3 мм. Ці оптимальні параметри сприятимуть досягненню покращених характеристик ротору, забезпечуючи оптимальне розподілення магнітних полів та зменшення втрат енергії [3].

Було встановлено оптимальний кут навантаження двигуна, який складає $121,12^\circ$ електричного кута. Цей параметр впливає на роботу двигуна і може бути налаштований для досягнення кращої ефективності та потужності. [3].

Отримані результати можуть мати значущий вплив на розробку тягових систем електробусів та інших транспортних засобів. Покращені характеристики двигуна сприятимуть зниженню споживання енергії та підвищенню загальної ефективності системи. Це має велике значення з погляду економії ресурсів та сталого розвитку.

Отримані результати підтверджують ефективність методики синтезу параметрів ротору, незалежно від наявності секціонування магнітів. Ці результати можуть мати велике значення для розробки тягових систем електричного транспорту. Оптимізовані параметри ротору сприятимуть зменшенню ваги, покращенню енергоефективності та загальної продуктивності системи. Це відіграє важливу роль у покращенні продуктивності електричних транспортних засобів та сприяє сталому

розвитку сучасних міських перевезень.

Список використаних джерел

- [1]. Domanskyi, V., Domanskyi, I., Zakurdai, S., & Liubarskyi, D. (2022). Development of technologies for selecting energy-efficient power supply circuits of railway traction networks. *Technology audit and production reserves*, 4(1 (66)), 47-54.
- [2]. Liubarskyi, B., Iakunin, D., Nikonov, O., Liubarskyi, D. & Yeritsyan, B. 2022, "Optimizing geometric parameters for the rotor of a traction synchronous reluctance motor assisted by partitioned permanent magnets", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 8-116, pp. 38-44.
- [3]. Liubarskyi, B., Iakunin, D., Nikonov, O., Liubarskyi, D., Vasenko, V. & Gasanov, M. 2021, "Procedure for selecting optimal geometric parameters of the rotor for a traction non-partitioned permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 8(114), pp. 27-33.
- [4]. Finite Element Method Magnetics/ David Meeker // Режим доступа: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
- [5]. Severin, V. P. Vector optimization of the integral quadratic estimates for automatic control systems / V. P. Severin // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2005. – Vol. 44. – No 2. – P. 207-216.
- [6]. Nikulina, E. N., Severyn, V. P., & Kotsiuba, N. V. (2018). Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*, (21), 8–13. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2018.21.02>