

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТЯГОВИХ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЕЛЕКТРО- ТА ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛЯХ

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Грицаєнко А.В., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. У зв'язку з розвитком промисловості, сільськогосподарського сектору, ліфтового господарства та гібридних і електричних автомобілів, виникає необхідність у створенні все більш різноманітних електродвигунів, які підходили б під все більш індивідуальні чи специфічні умови використання.

Саме таким чином інженери знов згадали про синхронні двигуни з постійними магнітами. Не дивлячись на те, що такий тип двигунів відомий вже дуже давно, він не отримав своєї популярності оскільки асинхронні двигуни та двигуни постійного струму виявились дешевші та простіші у керуванні і зручніші у використанні.

З розвитком же технологій керування електродвигунами, а також новими дослідженнями, інженери знайшли спосіб використовувати СДПМ у повсякденному житті. Не дивлячись на недоліки такого типу двигунів, вони легко компенсуються найкращими масогабаритними характеристиками та показниками споживання енергії, у порівнянні з двигунами інших типів.

1. Розвиток електромобілів та гібридів. Тема екологічності та захисту навколишнього середовища на сьогодні є однією з найбільш актуальних та гострих. Все більше країн приймають закони, поправки та впроваджують все більш жорсткі вимоги до викидів від заводів, фабрик, електростанцій будь-якого типу і звісно ж транспорту.

Прикладом таких вимог та законів є прийняття Великобританією, Норвегією, США і деякими іншими країнами законів про заборону випуску бензинових та дизельних автомобілів вже у 30-х роках нашого сторіччя. Відтак, активного розвитку зазнали електромобілі та гібриди. Цьому розвитку також сприяють державні фонди та виплати.

Маючи з одного боку законодавчий тиск, а з іншого фінансову підтримку та вигоду, кожен виробник автомобілів додав у свою лінійку електричний та гібридний транспорт. Також, почали з'являтися виробники суто електричних автомобілів. Найуспішнішим та найяскравішим представником таких виробників є, звісно, Tesla [1]. Черга замовлень зі слів компанії заповнила усі її заводи на місяці вперед, навіть враховуючи будівництво нових потужностей.

Найбільшим виробником автомобілів у світі у 2021-2022 роках стала компанія Тойота [2]. Не дивлячись на те, що у компанії з'являються електричні моделі, свою ставку вона робить на гібриди та водневі двигуни. Саме тому для

дослідження обрано електродвигун гібридної установки автомобілю Тойота Пріус, а не, наприклад, електродвигун якоїсь з моделей Тесла.

2. СДПМ у приводі електромобілів та гібридів. Цікавим є той факт, що два найбільших виробники автомобілів та електромобілів відповідно, Тойота та Тесла, не дивлячись на розбіжності у їх поглядах на майбутнє автомобільної промисловості, зробили вибір на користь цілковити однакових конструкцій електродвигунів.

Так, Тойота Пріус та Тесла Модел 3 використовують СДПМ з внутрішнім розміщенням магнітів типу «ластівчин хвіст».

Нам відомо, що електродвигун у гібридній установці автомобілю тесла має 8 полюсів та 3 виводи. Його потужність складає 50 кВт, а напруга живлення може доходити до 500 В [3]. Реальне зображення двигуна можна побачити на рис. 1.



Рисунок 1 – СДПМ у гібридній установці автомобілю Тойота Пріус

2.1 Ефективність СДПМ у губридній установці Тойота Пріус. Аналізуючи лабораторні дослідження Національного інституту Оак Рідж проведені для Департаменту Енергії Об'єднаних Штатів, приведені у таблиці 1, стало можливим створити графік ефективності електродвигуна (рис. 2).

Ефективність роботи двигуна у цьому випадку обраховано відношенням моменту двигуна до швидкості обертання його валу. Кольоровий спектр допомагає краще зрозуміти числові значення наведені у %: синій колір відповідає ефективності двигуна нижче 82%; поступово збільшуючи значення спектр переходить до теплих кольорів, де червоний і темніші його відтінки відповідають значенню в 92% і більше.

Таблиця 1 – Результати лабораторних замірів роботи СДПМ Тойота Пріус

Швидкість обертання осі, об/хв	Частота обертання вала двигуна, об/хв	Крутний момент на осі, Нм	Частота, Гц	Зворотня ЕРС, середньоквадратичне значення	Зворотня ЕРС, пікове значення
122	502	8	33.8	42	75
243	1000	8.4	66.5	85.7	150
365	1502	9.3	99.8	132.3	225
486	1999	10.2	134.4	181.6	300
608	2501	10.8	168.1	221.8	350
729	2999	11.3	200.2	269.3	425
851	3501	12	233.9	315.7	500
972	3999	12.6	265.4	354.6	575
1094	4501	13.1	295.7	405.5	625
1215	4999	13.6	333	440.4	700
1337	5500	14.6	366.3	503.4	775
1458	5998	15.6	401.3	539.8	850

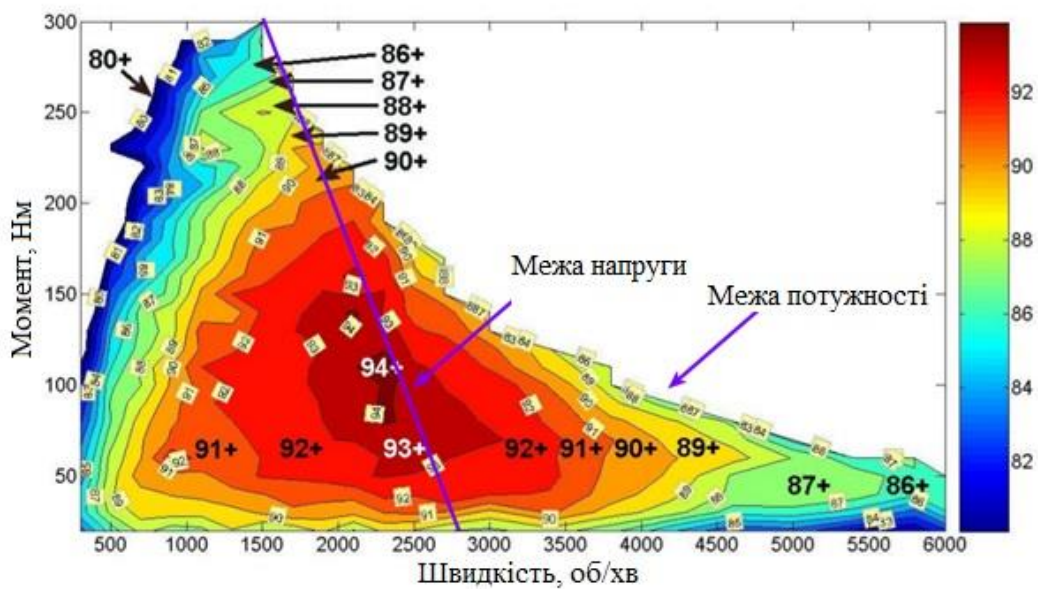


Рисунок 2 – Ефективність роботи СДПМ у гібридній установці автомобілю Тойота Пріус

Варто зазначити, що ці дослідження проводились з блокування обертання деференційних передач, а температура масла приблизно дорівнювала кімнатній температурі.

2.2 Втрати у металі СДПМ у гібридній установці автомобілю Тойота Пріус. Знаючи що товщина пластин ламінованої елекромагнітної сталі у цьому двигуні складає 0,35 мм, а зазначена марка М19-29G, використано каталог одного з виробників такої сталі для отримання приблизних характеристик.[4] Для отримання

даних було взято сталь марки М270-35А, як аналог використаної у електродвигуні гібридної установки.

М270-35А має наступні характеристики:

- Товщина: 0,35 мм
- Максимальна питома загальна втрата при 50 Гц: $J = 1,5 \text{ Т} - 2,70 \text{ Вт/кг}$,
- Мінімальна магнітна поляризація при 50 Гц:
 $H = 2500 \ 5000 \ 10000 \text{ А/м}$
 $B = 1,49 \ 1,60 \ 1,70 \text{ Т}$
- Умовна щільність: 7,65 кг/дм³
- Питомий опір: 52 мкОм см
- Провідність: 1/питомий опір = 1923100 См/м

Для обрахунку втрат в металі СДПМ використано формулу Штейнмеца:

$$P \text{ [W/kg]} = K_h \times f \times B^2 + K_c \times f^2 \times B^2 + K_e \times (f \times B)^{1,5},$$

де

K_h – коефіцієнт втрат на гістерезис;

K_c – класичний коефіцієнт втрат на вихрові струми;

K_e – коефіцієнт надмірних втрат, який враховує надмірні втрати, не враховані у K_h і K_c

Провівши розрахунки, наносимо для наглядності їх на графік (рис. 3), опублікований самим виробником. Пунктирна лінія відповідає оригінальній сталі М19-29G, суцільна – підібраному аналогу М270-35А.

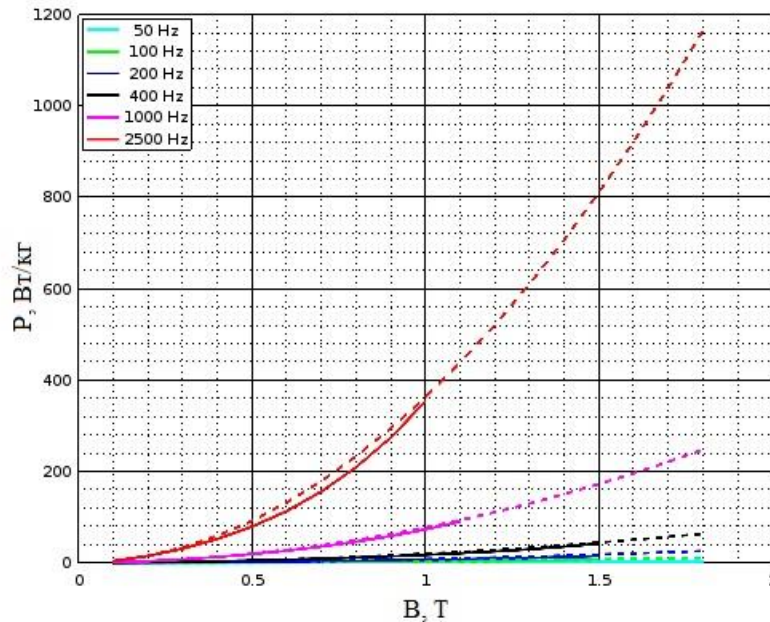


Рисунок 3 – Порівняння втрат у металі оригінальної марки сталі та підібраного аналога

Виходячи з графіку, бачимо що аналог підібраний майже ідеально, що дозволяє нам спиратись на характеристики сталі М270-35А для будь-яких майбутніх розрахунків. Відтак, можемо побудувати повну криву залежності В, Т від Н, А/м (рис. 4).

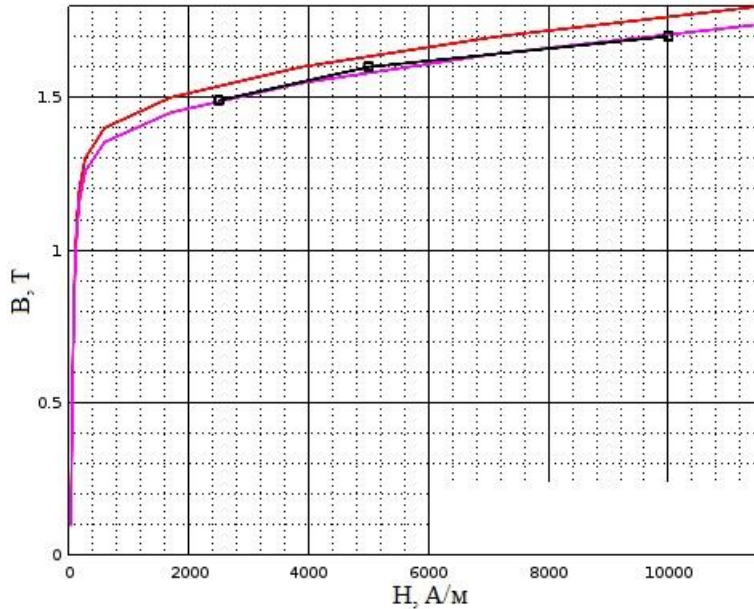


Рисунок 4 – Крива В-Н для сталі марки М270-35А

3. Аналіз СДПМ з внутрішнім розміщенням магнітів. Щоб краще зрозуміти переваги та недоліки конструкції СДПМ з внутрішнім розміщенням магнітів типу «ластівчин хвіст», пропонуєть провести порівняння його з іншими варіаціями СДПМ.

При порівнянні різних варіантів двигунів для електричного транспорту їх ККД та власна маса є одним з вирішальних факторів, оскільки типові тягові акумуляторні батареї, що застосовуються в даний час, мають обмежений запас енергії і значну масу.

Синхронні двигуни з ПМ мають ряд переваг, серед яких можна назвати більшу щільність потужності та високу ефективність. Оскільки витрати на виробництво та вартість матеріалів швидко зростають, вартість СДПМ також є значною перевагою.

Для керування синхронними двигунами з постійними магнітами також необхідний частотно-регульований привід. Але аналіз показників витрат і результатів показує, що СДПМ кращі в порівнянні з альтернативними типами двигунів, що можуть бути використані у транспорті різних сфер.

Розглянемо кілька основних конструкцій роторів СДПМ, які мають найкращі енергетичні показники. Це ротор колекторного типу, конструкція із вбудованими магнітами та конструкція ротора з «явнополюсним» розміщенням магнітів (рис. 5).

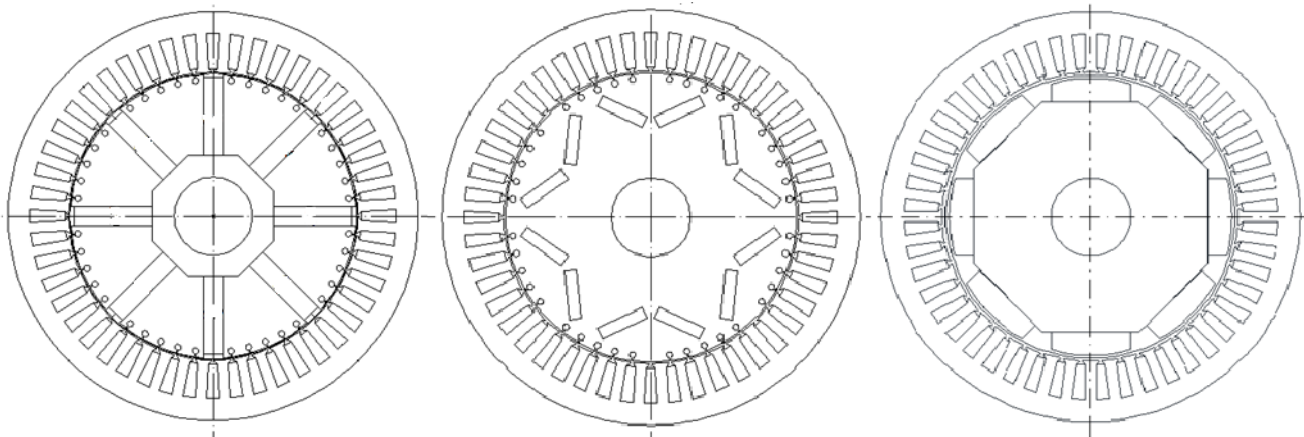


Рисунок 5 – СДПМ з ротором колекторного типу (ліворуч); ротором з вбудованими магнітами (в центрі); ротором з явнополюсним розміщенням магнітів

3.1 Колекторна конструкція ротору СДПМ. В колекторній конструкції ефективним буде використання всіх висококоерцетивних магнітів. Додатковим достоїнством цієї конструкції є можливість концентрації магнітного потоку не тільки зміною числа полюсів, але і виконанням довжини ротора, що помітно виступає за статор.

Основний недолік такої конструкції – складність забезпечення достатньої механічної міцності, особливо на високих частотах обертання.

Ця конструкція ротора вважається найбільш прийнятною для використання в роторі тягових двигунів важкого транспорту, оскільки дозволяє реалізувати велику потужність в малому активному обсязі.

3.2 Конструкція ротору СДПМ з внутрішнім розміщенням магнітів. Порівняно з колекторною конструкцією, монтаж такого типу ротора легше. До переваг також відносять відсутність бандажного кільця навколо ротора та нижчі вимоги до точності виготовлення постійних магнітів. Конструкція ротора із вбудованими постійними магнітами вважається однією з найбільш економічних і дозволяє суттєво знизити собівартість СДПМ.

Але така конструкція ротора досить складна у виготовленні. Це викликано ускладненим технологічним процесом монтажу постійних магнітів за допомогою запресування, так як магнітні матеріали є досить крихкими і схильними до механічних пошкоджень. У разі обрання скріплення ротора посекційно ми стикаємося зі складними конструктивними рішеннями.

Завдяки наявності моменту магнітного опору новий двигун може розвивати досить високий обертовий момент, при відносно малому струмі на виході тягового інвертора і обмеженій напрузі холостого ходу.

3.3 Явнополюсна конструкція ротору СДПМ. В порівнянні з колекторною конструкцією, явнополюсна конструкція дозволяє значно знизити пульсації електромагнітного моменту, але при цьому вимагає великих грошових витрат у зв'язку зі збільшенням застосовуваних магнітів.

При цьому, монтаж магнітів на кістяк ротора у цього типу конструкції є найлегшим, оскільки магніти розташовані поверх кістяка. Таке розташування виключає складні конструкторські рішення щодо монтажу постійних магнітів.

Висновки:

1) Для такого легкого за вагою транспорту як сучасні електромобілі та гібриди, використання найдешевшого та найменшого за розмірами рішення є найкращим.

2) З огляду на поточний стан розвитку акумуляторних батарей для електротранспорту, можливість отримати високий обертовий момент за мінімальних струмів при обмеженій напрузі стає суттєвою перевагою для використання СДПМ у електромобілях та гібридах. Саме тому компанії Тойота і Тесла зупинили свій вибір на такому типі двигуна.

3) За сукупністю показників найоптимальнішою конструкцією СДПМ виглядає СДПМ де ротор має вбудовані магніти розміщені по схемі «ластівчиний хвіст».

Перелік посилань

1. *Investing.com*: Сайт з новинами, економічними дослідженнями, вебінарами та навчальними матеріалами з інвестування та фінансові показники світових компаній та брендів. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.investing.com/academy/statistics/tesla-facts/>

2. *Global Toyota*: Офіційний сайт виробника автомобілів Тойота. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://global.toyota/en/company/profile/production-sales-figures/202203.html>

3. C. W. Ayers, J. S. Hsu, L. D. Marlino, C. W. Miller, G. W. Ott, Jr., C. B. Oland Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System Interim Report – OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Oak Ridge, Tennessee 37831

4. *Cogent Online Catalogue*: Онлайн каталог виробника електричної сталі. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>