ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МАСИВУ ХАЛЬБАХА В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Чумак Є.С., магістрант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

Вступ. Протягом всього часу існування електромеханічних перетворювачів енергії, зокрема і електричних машин, одним з найважливіших завдань було і залишається – зменшення питомих маси і габаритів, зниження витрат та покращення якості використаних матеріалів, удосконалення технології виготовлення, що зрештою призводить до зниження вартості кінцевого виробу.

Економія електротехнічної сталі, міді, алюмінію, ізоляції та конструкційних матеріалів є найважливішою вимогою при створенні нової електричної машини. Економія матеріалів пов'язана з безвідходною і маловідходною технологією. Так відомо, що при штампуванні листів електротехнічної сталі статора і ротора в середньому 40% матеріалу йде у відходи, а в деяких випадках 60 ... 70%. У машинах малої потужності за рахунок зміни конструкції і технології виготовлення магнітної системи вдається дещо зменшити відходи електротехнічної сталі.

Вищеокреслені завдання і проблеми стоять і у випадку розробки нових електричних машин з постійними магнітами (ЕМПМ), які в останній час набули широкого розповсюдження. Зокрема ЕМПМ широко застосовуються в сучасних транспортних засобах (сучасні електровози, електромобілі, електровелосипеди, тощо), в системах силового устаткування, в системах автоматики, автономній електроенергетиці (електрогенератори вітряків), побутовій техніці, професійному електрообладнанні, в авіації, космосі, тощо. ЕМПМ мають велике різноманіття типів і варіантів конструктивного виконання, залежно від заданих цілей і умов їх роботи.

В даній роботі розглядається одне з можливих технічних рішень для економії електротехнічної сталі в роторі, що в свою чергу могло б призвести до зменшення маси і моменту інерції ротора та до здешевлення машини в цілому. Цим рішенням є розташування магнітів в роторі по схемі Хальбаха (так званий **масив Хальбаха**). Дане технічне рішення вже використовується в деяких галузях та стрімко набуває своєї популярності.

Мета роботи – аналіз можливості та перспектив використання магнітної збірки Хальбаха.

Масив Хальбаха – це особливе розташування постійних магнітів, при якому з однієї сторони масиву магнітне поле значно підсилюється, а з іншої сторони – майже повністю зникає.

Збірка (масив) була запропонована Клаусом Хальбахом в 1980-х роках для забезпечення потужного випромінювання пучком електронів в прискорювачі.

Сенс збірки полягає в тому, що компенсація магнітного потоку знизу збірки призводить до його підсилення зверху. Для цього вектор намагнічення двох суміжних магнітів в масиві повинен відрізняється на деякий кут.

Збірка Хальбаха заснована на злитті двох комбінацій магнітів:

- ***Перша комбінація*** – поєднання трьох магнітів (рис. 1 *а*). Центральний магніт встановлений північним полюсом вгору, сусідні повернуті на 180 градусів. В цьому випадку силові лінії магнітного поля, що виходять з полюсів магнітів, взаємно підсилюватимуться вгорі і внизу даної комбінації.
- ***Друга комбінація*** – поєднання двох магнітів (рис. 1 *б*), вектори намагнічування яких спрямовані назустріч один одному. Тоді силові лінії поля також утворюють замкнуті кола, але напрямок силових ліній змінюється на протилежний.

В результаті суперпозиції магнітних полів двох зазначених структур виходить структура (рис. 1 *в*) у якої над магнітами силові лінії мають однакову спрямованість і тому взаємно підсилюють один одного, а в нижній частині (під магнітами) вони мають попарно протилежні напрямки, в результаті чого магнітне поле в цій області взаємо компенсується. Креслення, що зображені на рис.1 називаються *кресленнями Меллінсона* [1].

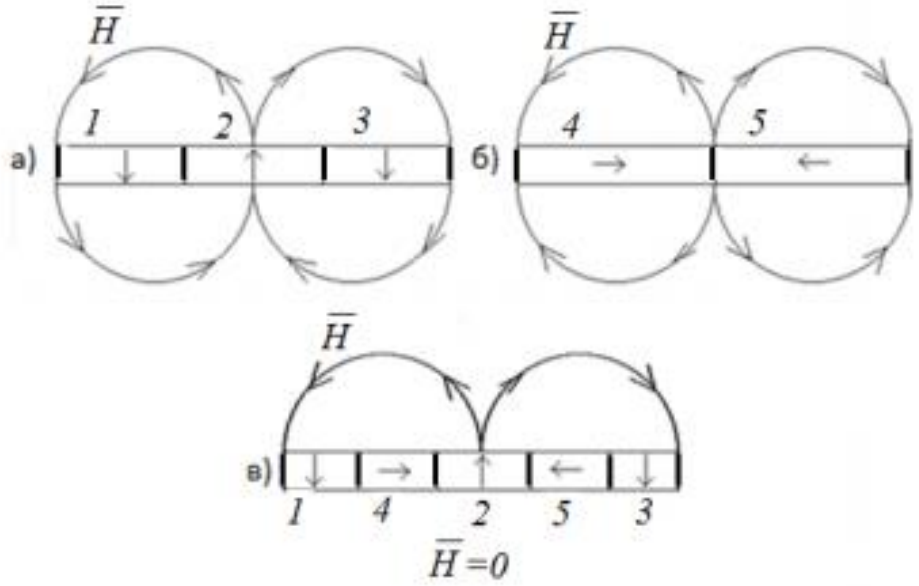

Рисунок 1 – Креслення Меллінсона: *а)* «Перша комбінація»; *б)* «Друга комбінація»; *в)* суперпозиція «першої» і «другої» комбінацій магнітів.

На рис. 2 представлений лінійний масив Хальбаха, що складається з дев'яти магнітів. А на рис. 3 показаний результат моделювання розподілу магнітного поля (магнітної індукції) даного масиву [2].

Рисунок 2 – Лінійний масив Хальбаха

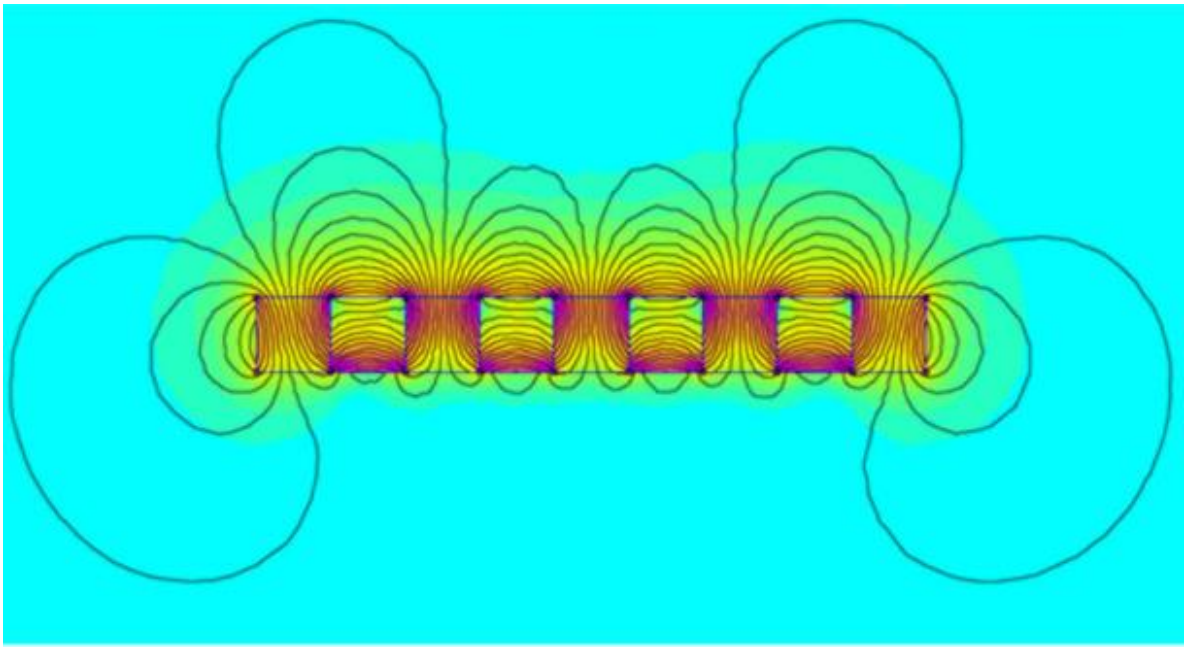

Рисунок 3 – Розподіл магнітного поля навколо елементів масиву Хальбаха

Масиви Хальбаха також можуть мати інші форми, зокрема магніти можуть бути розташовані по колу (рис. 4) [2]. Таким чином можна використовувати кільцеві магніти з багатополюсним намагнічуванням або кільця, що складаються з менших сегментів дуги. Різні конфігурації магніту дадуть різне спрямування і силу магнітного поля.

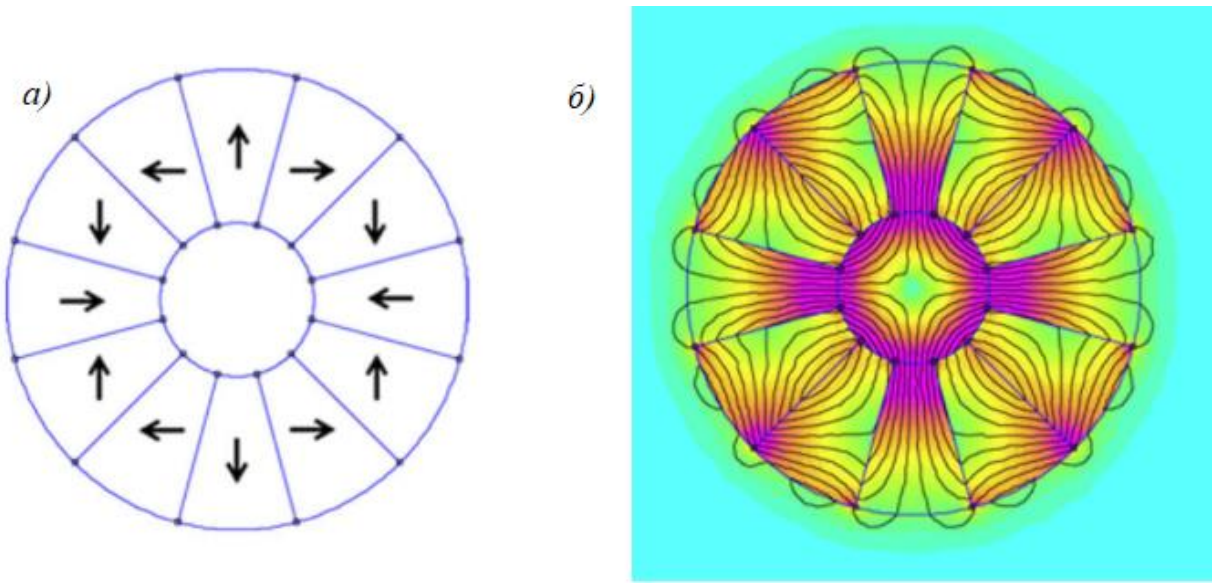

Рисунок 4 – Кільцевий масив Хальбаха: а) напрями намагнічування магнітів; б) розподіл магнітного поля.

З огляду на зазначені характеристики можна припустити наступні перспективи використання масиву Хальбаха в електричних машинах.

По-перше, можна досягти значно більшого значення магнітної індукції в зазорі між статором і ротором, ніж при класичному розміщенні магнітів або, навіть, при використанні концентраторів магнітного потоку.

По-друге, такий масив майже не вимагає використання електротехнічної сталі в якості ярма для замикання потоку. Таке ярмо якщо і потрібне, то з дуже малою висотою. Звичайно, матеріал постійних магнітів занадто крихкий для самостійної передачі значних зусиль, але постійні магніти можна встановити на несучій опорі, яка може бути виконана з більш легкого матеріалу, ніж сталь.

Крім того, якщо масиви Хальбаха формувати не лише з магнітів тільки поздовжнього і поперечного напрямку намагніченості (масив псевдо-Хальбаха), а також додати магніти з проміжними напрямками (поступова зміна намагніченості), то можна сформувати криву індукції в зазорі електричної машини правильної синусоїдальної форми.

Основним недоліком, що може ускладнити широке використання магнітних масивів Хальбаха є складність технології складання і забезпечення механічної міцності. Разом з тим, існує два основних способи виготовлення елементів для магнітного масиву Хальбаха:

- *намагнічування під певним кутом елементів збірки*, після чого вони формують магнітну систему (застосовується дуже рідко, оскільки вимагає складного обладнання для намагнічення);
- *механічне вирізання з постійного магніту кубічної форми* намагніченого радіально або тангенціально, елемента масиву необхідної форми, з потрібним напрямком намагніченості і подальшим формуванням масиву (застосовується значно ширше, оскільки не вимагає складних намагнічуючих систем).

Висновок. Хоч магнітні збірки Хальбаха і були відкриті для застосування в інших сферах теоретичної і прикладної фізики, все ж вони мають величезну перспективу використання в електромеханіці. Зокрема в синхронних машинах, машинах постійного струму, лінійних двигунах, генераторах, магнітних муфтах, тощо. Застосування збірок Хальбаха дозволить значно скоротити використання дорогої електротехнічної сталі, а також зменшити масу і момент інерції ротора, що є дуже корисним для електричних машин систем автоматики.

Перелік посилань

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная_сборка_Халбаха
2. https://ru.magnet-sdm.com/2018/10/30/halbach-array/
3. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material (англ.) // Nuclear instruments & methods – Elsevier, 1980. – Vol. 169, Iss. 1. – P. 1–10. ISSN 0029-554
4. Zhu Z., Howe D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review (англ.) // IET Electric Power Applications – UK: IET, 2001. – Vol. 148, Iss. 4. – P. 299–308. ISSN 1751-8660