

# ЕФЕКТИВНІСТЬ ГЕНЕРУВАННЯ ЕРС В СИНХРОННИХ МАШИНАХ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ РІЗНИХ ТИПІВ РОТОРІВ

Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, Чумак Є.С., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки

**Вступ.** Синхронні машини з постійними магнітами (СМПМ) є одними з найбільш перспективних для застосування в таких галузях як: верстатобудування, вітроенергетика, електричний транспорт, спецтехніка, тощо.

Загалом, електричні машини з постійними магнітами (ЕМПМ) мають велике різноманіття типів і варіантів конструктивного виконання, залежно від заданих цілей і умов їх роботи. В останні роки в світі йде досить інтенсивний процес створення нових та удосконалення існуючих конструкцій ЕМПМ. Показником цього процесу є те, що значна частка нових запатентованих конструкцій електричних машин припадає саме на ЕМПМ.

Постійні магніти (ПМ) в ЕМПМ найчастіше розташовують на роторі, хоча існують конструкції з розміщенням магнітів на статорі, а також – і на статорі і на роторі. В даній роботі розглядалися СМПМ з розміщенням ПМ виключно на роторі.

Розташування ПМ на роторі також має багато різних варіантів, які умовно можна поділити на дві групи:

- **внутрішнє розташування** – ПМ заглиблені в осердя ротора;
- **поверхнєве розташування** – ПМ розташовані на поверхні ротора.

При цьому, якщо розглядати роботу СМПМ в генераторному режимі виникає логічне питання: «А при якому саме розташуванні магнітів на роторі в обмотці статора буде наведена найбільша за значенням і найкраща за формою ЕРС?». Для відповіді на це питання було проведене дане дослідження де засобами математичного моделювання проаналізована ефективність наведення ЕРС в обмотці статора для трьох різних конструкцій ротора:

- 1) **«Колекторна»** конструкція ротора – внутрішнє розташування ПМ з тангенціальним вектором намагнічення (рис.1 а);
- 2) Ротор **типу «зірка»** – класична конструкція явнополюсного ротора СМПМ з поверхневим розташуванням магнітів на місці полюсних наконечників (рис.1 б);
- 3) Поверхнєве розташування магнітів по схемі Хальбаха (**збірка Хальбаха**) (рис.1 в) – особливе розташування магнітів, що збільшує магнітне поле на одній стороні масиву при зменшенні майже до нуля на іншій стороні.

**Мета роботи** – оцінити ефективність генерування ЕРС в обмотці статора у СМПМ з різними конструкціями ротора.

**Матеріали і методи.** В роботі була розроблена та реалізована в програмному пакеті Comsol Multiphysics коло-польова математична модель в СМППМ з наступними даними: номінальна потужність 35кВт; кількість фаз обмотки статора  $m = 3$ , кількість полюсів  $2p = 8$ , матеріал магнітів –  $NdFeB$ , марка магнітів –  $N33U$ . Тип та об'єм магнітів в усіх трьох вищезазначених конструкціях ротора був однаковим.

**Результати та обговорення.** На рис. 1 представлені результати моделювання магнітного поля (магнітної індукції  $B$ ) в поперечному перерізі СДПМ, що працює в генераторному режимі без навантаження (холостий хід).

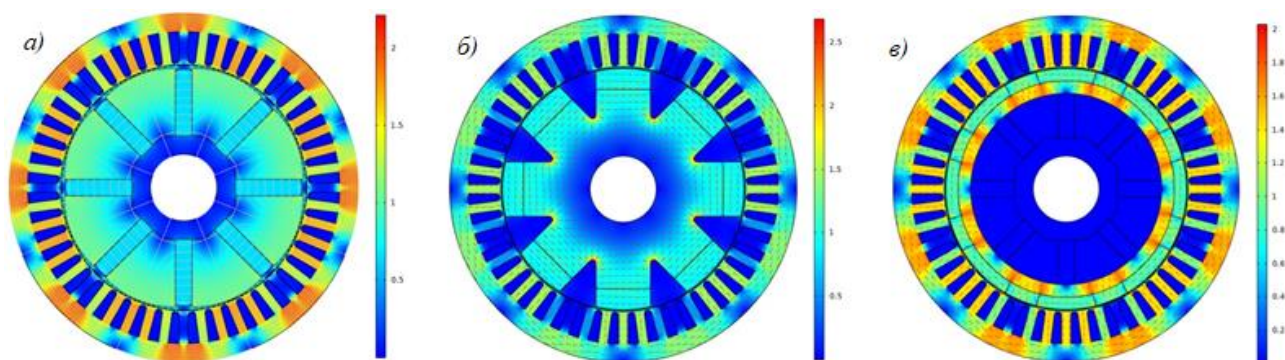


Рисунок 1 – Розподіл магнітної індукції, Тл: а) ротор «колекторної конструкції»; б) ротор «зірка»; в) ротор з масивом Хальбаха.

Як видно з представлених картин поля, в усіх варіантах ротора величина магнітної індукції в магнітному колі не перевищує звичайних для електричних машин меж. Разом з тим, у варіанті з «колекторною» конструкцією ротора, та, особливо, у варіанті з ротором типу «зірка» спостерігається занадто низькі значення індукції у магнітопроводі ротора, що свідчить про недовикористання електротехнічної сталі. Навпаки, у випадку використання збірки Хальбаха величина індукції в ярмі ротора має схоже значення з величиною індукції в ярмі статора, що свідчить про значно краще використання електротехнічної сталі ніж в попередніх варіантах. Пояснюється це тим, що при розташуванні магнітів по схемі Хальбаха над масивом магнітів (в повітряному зазорі) магнітне поле підсилюється, а під масивом (в ярмі) значно послаблюється, що дозволяє суттєво (більш ніж у три рази) зменшити площу поперечного перерізу ярма.

В ході моделювання були обчислені часові залежності ЕРС, яка була наведена в обмотці статора магнітним полем ротору, що обертався. На рис. 2 показаний один період цієї часової залежності.

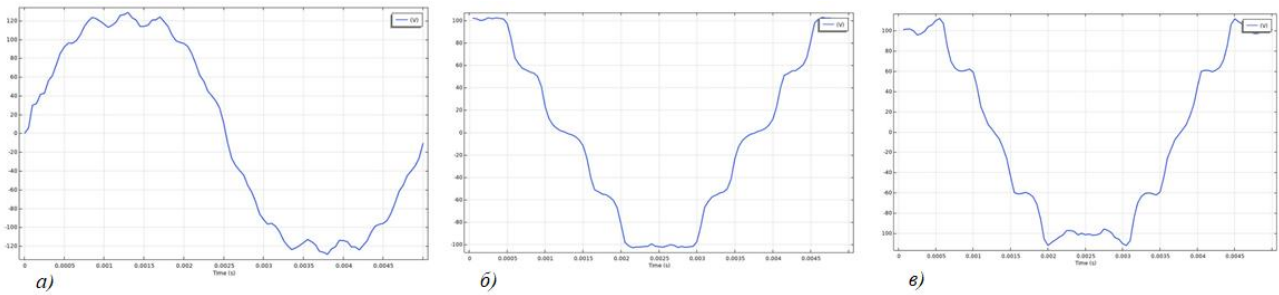


Рисунок 2 – Часова залежність ЕРС  $e = f(t)$ : а) ротор «колекторної конструкції»; б) ротор «зірка»; в) ротор з масивом Хальбаха.

Як видно, крива ЕРС не є строго синусоїдальною і має в своєму складі вищі гармоніки. Тому після розкладання кривої в ряд Фур'є, було обчислено діюче значення ЕРС згідно виразу:

$$E_d = \frac{\sqrt{E_{m1}^2 + E_{m3}^2 + E_{m5}^2 + \dots + E_{m.k}^2}}{\sqrt{2}}$$

де  $E_{m1}$ ,  $E_{m3}$ ,  $E_{m5}$ ,  $E_{m.k}$  – амплітуда відповідно **першої, третьої, п'ятої та k-ї (непарної) гармоніки**.

Крім того, щоб з'ясувати ступінь наближення кривої  $e = f(t)$  до синусоїди був обчислений **коефіцієнт викривлення** – відношення геометричної суми амплітуд вищих гармонік до амплітуди першої гармоніки:

$$k_B = \frac{\sqrt{E_{m3}^2 + E_{m5}^2 + \dots + E_{m.k}^2}}{E_{m1}}$$

Одержані значення  $E_d$  і  $k_B$  для всіх трьох варіантів ротора СМПМ представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Діюча ЕРС і коефіцієнт викривлення СМПМ в режимі х.х.

Тип ротору	$E_d$ , В	$k_B$ , %
«Колекторний»	96,0	12,6
«Зірка»	72,5	11,5
«збірка Хальбаха»	80,3	14,8

Отримані результати свідчать, що «колекторна» конструкція ротора дозволяє одержати найбільше значення діючої ЕРС при однаковому об'ємі використаних магнітів. Такий результат є очікуваним оскільки «колекторна» конструкція має найменший повітряний проміжок. По цій же причині конструкція «зірка» матиме найменшу  $E_d$  при найбільшій фактичній величині повітряного проміжку, адже відомо, що магнітна проникність магніту практично дорівнює магнітній проникності повітря. В конструкції з масивом Хальбаха магніти мають меншу товщину ніж у роторі типу «зірка», тому й фактичний повітряний зазор буде менше, а  $E_d$  – більша.

Значення коефіцієнту  $k_v$  в усіх трьох варіантах було близьким 12...15%.

Разом з тим, беззаперечною перевагою використання збірки Хальбаха є значне (в 3,4 рази) менше використання електротехнічної сталі в роторі (порівняно з ротором типу «зірка»), що значно покращує техніко-економічні показники машини. Зокрема зменшення маси сталі в роторі призведе до зменшення ваги ротора і зменшення його моменту інерції, що має велике значення для електричних машин систем автоматики. Крім того собівартість такої машини буде суттєво меншою. До того ж конструктивне виконання ротору з масивом Хальбаха буде простішим ніж, наприклад, у випадку «колекторної» конструкції ротора.

**Висновок.** Навіть при однакових масі, об'ємі та фізичних властивостях постійних магнітів, їх розташування на роторі СМПМ, а також конструкція ротору суттєво впливає на ефективність генерування ЕРС в обмотці статора. В цьому сенсі кращі характеристики матимуть машини з меншою величиною фактичного повітряного проміжку. Проте в окремих випадках більш важливе значення можуть мати інші показники такі як менший момент інерції, краща технологічність та нижча вартість машини. Такі переваги може забезпечити, наприклад, збірка поверхневих магнітів ротора по схемі Хальбаха, що і було показано в даному дослідженні.

#### Перелік посилань

1. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная\\_сборка\\_Халбаха](https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная_сборка_Халбаха)
2. <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/30523/1/dis00112.pdf>
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