

Математичне моделювання енергетичної ефективності постійних магнітів в циліндричних магнітних системах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2021.38>

Володимир Гудь

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна

Анотація — Представлено математичну модель для визначення енергетичної ефективності постійних магнітів, які використовуються у магнітних системах. Доведено адекватність моделі на основі проведеного моделювання для дво полюсної циліндричної магнітної системи.

Ключові слова — математична модель; магнітне поле; постійний магніт; енергетична ефективність; магнітна система.

I. ВСТУП

Магнітні системи на основі постійних магнітів широко використовуються для збудження магнітних полів сучасних електрогенераторів, двигунів та магнітних сепараторів [1]. При цьому, внаслідок обмеження максимально допустимої питомої енергії постійних магнітів, все більшої актуальності набуває актуальності питання ефективності використання їхньої енергії в тій чи іншій конструкції магнітної системи [2]. Відомо [3], що основною характеристикою магнітотвердого матеріалу є крива розмагнічування (рис. 1).

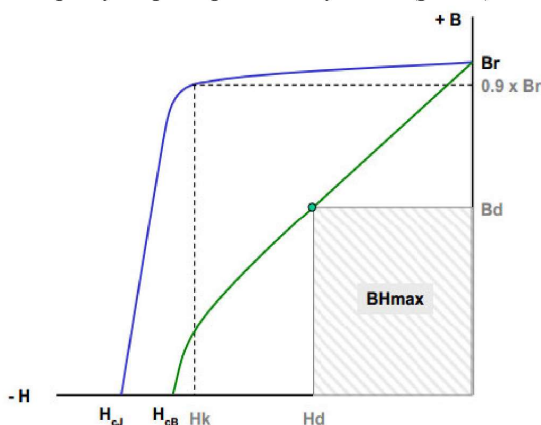


Рисунок 1. Крива розмагнічування постійного магніту

Показано [2], що енергія магнітного поля, яке створюється постійним магнітом залежить від положення робочої точки магнітотвердого матеріалу на кривій розмагнічування. Теоретично

встановлено [5], що максимальний енергетичний добуток $(BH)_{max}$ постійних магнітів Nd-Fe-B може досягати $(BH)_{max}=485$ кДж/м³. Тому, подальше покращення параметрів магнітних систем зі збудженням від постійних магнітів може бути досягнуто лише за рахунок підвищення ефективності використання маси магнітів.

Відповідно метою роботи є розробка математичної моделі для дослідження енергетичної ефективності магнітних систем зі збудженням від постійних магнітів.

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Магнітне поле описували системою диференціальних рівнянь Максвелла для стаціонарного магнітного поля вигляду [2]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля; \mathbf{B} – вектор магнітної індукції. Рівняння стану для постійних магнітів представляли:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_r, \quad (3)$$

де μ_r , \mathbf{M}_r – значення відносної магнітної проникності та вектор залишкової намагніченості постійного магніту, відповідно; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна.

Рівняння стану для навколишнього середовища представляли як:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}, \quad (4)$$

де μ_r – значення відносної магнітної проникності для повітря $\mu_r = 1$.

Енергетичну ефективність обчислювали згідно методики [6].

III. ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досліджували дво полюсну циліндричну магнітну систему на основі постійних магнітів Nd-Fe-B з енергетичним добутком $(BH)_{max}=485$ кДж/м³ радіусом 0,1 м. (рис. 2).

Величину залишкової індукції матеріалу обчислювали відповідно до співвідношення (5) $B_r = 1.56 \text{ Тл}$.

Приймали, що постійні магніти намагнічені діаметрально. Вектор залишкової індукції для k -го полюсу задавали згідно рівняння:

$$\mathbf{M}_r = (-1)^k \frac{B_r}{\mu_0} \mathbf{e}_r, \quad (7)$$

де \mathbf{M}_r – вектор намагніченості k -го полюсу постійного магніту, \mathbf{e}_r – одиничний вектор-радіус, B_r – залишкова індукція магнітотвердого матеріалу постійного магніту.

Враховуючи те, що інтенсивність магнітного поля зменшується з віддаленням від поверхні магнітної системи, при розрахунку задавали нульове значення потоку магнітного поля через циліндричну поверхню на відстані рівній 10 радіусам магнітної системи від її центру [7].

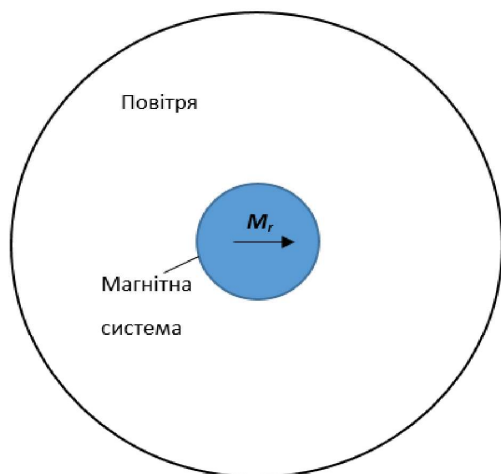


Рисунок 2. Розрахункова модель

Розв'язок системи рівнянь (1–6) з врахуванням прийнятих граничних умов проводили методом скінченних елементів.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В результаті математичного моделювання одержано розподіл магнітного поля для двополусної циліндричної магнітної системи (рис. 3) який задовільно узгоджується з відомими результатами аналітичних розрахунків [2].

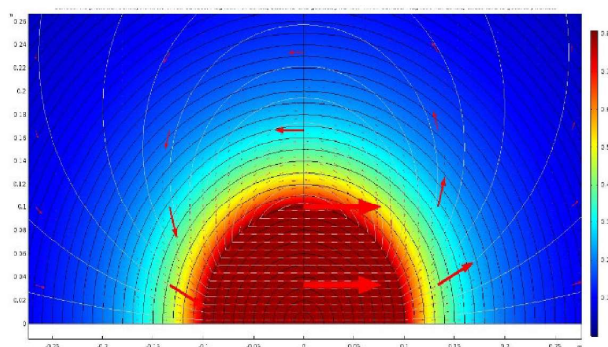


Рисунок 3. Розподіл індукції магнітного поля двополусної циліндричної магнітної системи

В результаті розрахунку енергетичної ефективності магнітної системи (рис. 4) встановлено, що в циліндричній магнітній системі спостерігається рівномірний розподіл ефективності використання маси магнітів, а величина відношення відношення густини енергії до енергетичного добутку магнітної системи вказує на повне використання маси магніту усім об'ємом магнітної системи.

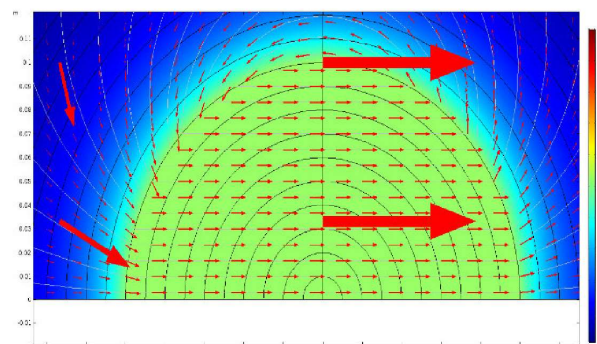


Рисунок 4. Розподіл відношення густини енергії до енергетичного добутку двополусної циліндричної магнітної системи

V. ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель визначення розподілу енергетичної ефективності постійних магнітів в магнітних системах. На основі проведеного моделювання показано, що в двополусній циліндричній магнітній системі з діаметральним намагніченням досягається максимальне використання енергії магнітотвердого матеріалу. Доведено, що використання розробленої моделі відкриває можливості для аналізу енергетичної ефективності постійних магнітів в магнітних системах, що дозволить покращити їхні техніко-економічні характеристики.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Загирняк М. В., Бранспиз Ю. А., Шведчикова И. А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования. К. : Техніка, 2011. 224 с.
- [2] Постоянные магниты : справочник / под ред. Ю. М. Пятиня М. : «Энергия». 1980. 488 с.
- [3] Вонсовский С. В. Магнетизм. М. : Наука. 1984. 208 с
- [4] Гудь В. М. Методи та прилади контролю якості постійних магнітів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 5. С. 32–37.
- [5] Laura H. Lewis, Felix Jimenez-Villacorta, Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation. *Metalurgical and Materials Transactions A*, S2. Volume 44A, pp. 2–20.
- [6] Гудь В. М., Сімухов В. Д., Лазутчик А. С. Дослідження магнітних систем зі збудженням від постійних магнітів. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020) : тринадцята міжнародна науково-практична конференція 19–20 травня 2020 р., Київ, Україна : збірка тез*. К. : НАУ, 2020. 302 с. С. 175–176.
- [7] Гудь В. М. Аналіз похибки визначення залишкової індукції циліндричних постійних магнітів з осьовим намагніченням методом дистанційної магнітометрії. *Методи та прилади контролю якості*. 2015. № 34. С. 78–82.