

УДК 537.312  
DOI 10.15407/fmmit2023.38.073

## Гістерезис у феромагнітних матеріалах та його вплив на електромагнітні пристрої

Роман Дирів<sup>1</sup>, Володимир Самотий<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> магістр, аспірант, кафедра КСА, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С.Бандери 12, 79013, Львів, e-mail: roman.o.dyriv@lpnu.ua

<sup>2</sup> д.т.н., професор, кафедра КСА, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С.Бандери 12, 79013, Львів, e-mail: volodymyr.v.samoty@lpnu.ua

<sup>3</sup> dr hab. inż., profesor, katedra Automatyki i Informatyki, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31155, Kraków, e-mail: vsamoty@pk.edu.pl

*Гістерезис — добре відоме явище, яке виникає у феромагнітних матеріалах, коли вони піддаються впливу зовнішніх магнітних полів. Це є результатом внутрішніх властивостей магнітних доменів, які мають тенденцію вирівнюватися з напрямком зовнішнього поля. Однак при знятті поля домени не повертаються до початкового стану, а зберігають залишкову намагніченість, що призводить до утворення петлі гістерезису. Така поведінка може мати значний вплив на продуктивність електромагнітних пристроїв, для роботи яких використовуються магнітні поля. Гістерезис може спричинити втрати енергії, зниження ефективності та інші небажані ефекти в таких пристроях, як трансформатори, котушки індуктивності та електродвигуни. Останні дослідження були зосереджені на розробці нових матеріалів зі зниженими гістерезисними втратами та покращенні ефективності існуючих пристроїв. Одним з підходів є використання передових технологій виробництва для оптимізації мікроструктури магнітних матеріалів, таких як інженерія меж зерен. Інший підхід полягає у дослідженні альтернативних магнітних матеріалів, таких як постійні магніти без рідкоземельних елементів. Крім того, були розроблені теоретичні моделі та засоби моделювання, щоб краще зрозуміти складні механізми гістерезису у феромагнітних матеріалах. Ці досягнення мають потенціал для покращення продуктивності різних електромагнітних пристроїв, включаючи двигуни, трансформатори та генератори, які відіграють вирішальну роль у сучасних енергетичних системах. Таким чином, гістерезис у феромагнітних матеріалах є складним явищем, яке може значно вплинути на роботу електромагнітних пристроїв. Нові дослідження були зосереджені на розробці матеріалів зі зниженими втратами на гістерезис, оптимізації дизайну пристроїв і вдосконаленні теоретичних моделей і засобів моделювання. Ці зусилля мають важливе значення для просування розвитку стійких та енергоефективних технологій. Метою статті є надати огляд гістерезису у феромагнітних матеріалах та його вплив на продуктивність електромагнітних пристроїв. Стаття також висвітлює нещодавні дослідницькі зусилля з розробки матеріалів зі зниженими втратами на гістерезис, оптимізації дизайну пристроїв і вдосконалення теоретичних моделей і інструментів моделювання для підвищення ефективності та стійкості цих пристроїв. Зрештою, стаття має на меті підкреслити*

*важливість розуміння та мінімізації гістерезису в електромагнітних пристроях з економічних та екологічних причин.*

**Ключові слова:** гістерезис, феромагнітні матеріали, електромагнітні пристрої, втрати енергії, ККД, трансформатори, котушки індуктивності, електродвигуни, перспективне виробництво, засоби моделювання.

**Вступ.** Магнітний гістерезис — ключовий феномен у поведінці матеріалів під впливом магнітного поля, що відіграє вирішальну роль у функціонуванні електромагнітних пристроїв. Цей ефект характеризується залежністю магнітної індукції від напруженості магнітного поля при його зміні, відображаючи властивості насичення та розділення магнітних доменів у матеріалах.

Вивчення магнітного гістерезису в електромагнітних пристроях стало вирішальним у розробці та оптимізації трансформаторів, електродвигунів, індуктивностей, трансформаторів потужності та інших пристроїв. Розуміння цього явища дозволяє інженерам ефективно проектувати, прогнозувати та оптимізувати роботу пристроїв з урахуванням втрат енергії, стабільності та ефективності.

## 1. Основи гістерезису у феромагнітних матеріалах

**1.1. Пояснення феромагнітних матеріалів та їх властивостей.** Феромагнітні матеріали - це матеріали, які можуть намагнічуватися в присутності зовнішнього магнітного поля і зберігають свою намагніченість після зняття поля. Така поведінка виникає через наявність магнітних доменів, які є невеликими областями всередині матеріалу, де вирівнюються магнітні моменти атомів. У ненамагніченому матеріалі ці домени орієнтовані випадковим чином, що призводить до нульового сумарного магнітного моменту. Коли прикладається зовнішнє магнітне поле, магнітні моменти доменів мають тенденцію вирівнюватися з напрямком поля, що призводить до сумарної намагніченості матеріалу.

**1.2. Виникнення гістерезису у феромагнітних матеріалах.** Розглянемо виникнення на прикладі заліза. Адже, кристалічна структура заліза містить атоми заліза, які утворюють магнітні домени. Частина доменів може залишитися у зміненому стані після зміни поля. Це явище ілюструє гістерезис - збереження певної "пам'яті" про попередні значення магнітної індукції, навіть після того, як зовнішнє поле змінилося або було вимкнено.

У випадку заліза це явище гістерезису має важливе значення для різноманітних технологічних застосувань, зокрема у виготовленні електромагнітів, трансформаторів, та інших пристроїв, де необхідно контролювати магнітні властивості матеріалу в залежності від зміни зовнішніх магнітних полів.

Форма та розмір петлі гістерезису залежать від кількох факторів, включаючи структуру магнітного домену, силу зовнішнього магнітного поля та склад матеріалу. Наприклад, матеріали з малими та чітко визначеними магнітними доменами, як правило, демонструють менші петлі гістерезису, ніж матеріали з більшими та складнішими доменами.

Феромагнітні матеріали — це тип матеріалів, які виявляють спонтанну намагніченість, тобто вони мають природну тенденцію намагнічуватися в присутності зовнішнього магнітного поля. Така поведінка виникає через вирівнювання магнітних моментів електронів всередині атомів матеріалу. Коли ці магнітні моменти вирівнюються в одному напрямку, матеріал намагнічується.

**1.3. Застосування феромагнітних матеріалів.** Феромагнітні матеріали мають широкий спектр застосування в техніці, зокрема в галузі електромагнетички. Деякі поширені приклади феромагнітних матеріалів, які використовуються в електромагнітних пристроях, включають залізо (Fe), кобальт (Co), нікель (Ni) та їхні сплави. Ці матеріали часто використовуються для створення магнітних сердечників трансформаторів, котушок індуктивності та електродвигунів, а також у магнітних пристроях зберігання даних, таких як жорсткі диски.

Однак феромагнітні матеріали також виявляють гістерезис, який може обмежити їх ефективність у деяких застосуваннях. Коли феромагнітний матеріал піддається впливу магнітного поля, магнітні домени всередині матеріалу прагнуть вирівнятися з напрямком поля. Уявімо кристалічну ґратку кобальту, де атоми кобальту організовані у домени з власними магнітними орієнтаціями. Кожен домен має свою власну напрямленість магнітного поля. Коли до кобальту прикладається зовнішнє магнітне поле, це поле впливає на магнітну орієнтацію доменів. Атоми у доменах починають переорієнтуватися в напрямку зовнішнього поля. Проте, цей процес не відбувається миттєво.

Розуміння властивостей і поведінки феромагнітних матеріалів має вирішальне значення для розробки ефективних і стійких технологій. Дослідники продовжують досліджувати нові матеріали та технології виробництва, які можуть мінімізувати втрати на гістерезис і покращити продуктивність електромагнітних пристроїв.

Останні дослідження були зосереджені на розробці нових феромагнітних матеріалів із покращеними магнітними властивостями та зменшеними втратами на гістерезис. Одним з підходів є використання передових технологій виробництва, таких як інженерія меж зерен, для оптимізації мікроструктури матеріалу [1]. Інший підхід полягає у дослідженні альтернативних магнітних матеріалів, таких як постійні магніти без рідкоземельних елементів [2]. Теоретичні моделі та засоби моделювання також були розроблені для кращого розуміння складних механізмів гістерезису у феромагнітних матеріалах [3]. Ці досягнення мають потенціал для покращення продуктивності різних електромагнітних пристроїв, включаючи двигуни, трансформатори та генератори, які в сучасних реаліях стали незамінними та відіграють вирішальну роль у сучасних енергетичних системах.

## **2. Вплив гістерезису на електромагнітні пристрої**

**2.1.. Вплив гістерезису на роботу електромагнітних пристроїв, таких як двигуни та трансформатори.** Гістерезис у феромагнітних матеріалах може мати значний вплив на продуктивність електромагнітних пристроїв, таких як двигуни та трансформатори [4]. Явище гістерезису тягне за собою теплові втрати та низьку ефективність, оскільки частина енергії витрачається на перемагнічування та розмагнічування матеріалів, а не на виконання корисної роботи пристроїв, в тому числі двигунів. Також, явище може впливати на потужність втрат та неефективне перетворення в трансформаторах [5].

**2.2. Негативний вплив гістерезису на трансформатори.** Одним із прикладів застосування в реальному світі, на яке впливає гістерезис, є використання трансформаторів у системах передачі електроенергії. Трансформатори є основними компонентами, які підвищують або знижують напругу електроенергії для полегшення її передачі на великі відстані [6]. Гістерезис у магнітопроводі трансформатора може спричинити значні втрати енергії через намагнічування та розмагнічування сердечника з кожним циклом змінного струму (AC) [7]. Результуюче розсіювання тепла може знизити ефективність трансформатора та призвести до збільшення експлуатаційних витрат [8].

**2.3. Негативний вплив гістерезису на електродвигуни.** Електродвигуни — ще один тип електромагнітних пристроїв, на які може впливати гістерезис [9]. Двигуни покладаються на магнітні поля для створення крутного моменту та забезпечення механічної потужності, а втрати на гістерезис можуть знизити їхню ефективність і продуктивність [10]. Наприклад, використання безгістерезисних магнітних матеріалів у сердечнику статора двигуна може значно зменшити втрати енергії та підвищити його ефективність [11].

Також варто зазначити про температурний вплив. Під час циклічних змін магнітності для створення магнітного поля в обмотці електродвигуна, матеріали переживають циклічні зміни внутрішньої енергії, що призводить до втрат у вигляді тепла через гістерезис. Ці теплові втрати ведуть до підвищення температури матеріалів. Висока температура може негативно позначитися на ефективності та тривалості роботи електродвигуна, оскільки вона може спричинити зниження ефективності та може призвести до скорочення терміну служби матеріалів.

## **3. Методи мінімізації гістерезису в електромагнітних пристроях**

**3.1. Огляд різних методів зменшення гістерезису, наприклад використання магнітом'яких матеріалів, формування магнітних полів і застосування магнітного зміщення.** Одним із широко використовуваних підходів є

використання магнітом'яких матеріалів, таких як аморфні сплави та нанокристалічні матеріали. Ці матеріали мають низьку коерцитивну силу та високу проникність, що може допомогти зменшити втрати на гістерезис [12]. Інша техніка полягає у формуванні магнітних полів за допомогою неоднорідних магнітних структур або методів із застосуванням поля, які можуть допомогти зменшити напруженість магнітного поля, необхідну для досягнення бажаного рівня магнітної індукції, таким чином мінімізуючи втрати на гістерезис [13].

Застосування постійного магнітного зміщення до матеріалу є ще одним ефективним способом мінімізації гістерезису. Прикладаючи до матеріалу постійне магнітне поле, коерцитивну силу можна зменшити, що допомагає мінімізувати втрати на гістерезис. Однак цей метод має певні обмеження, такі як потреба в додатковому обладнанні для генерування магнітного поля постійного струму та можливість збільшення втрат потужності через постійний струм [14].

Кожен із цих методів має свої переваги та проблеми, і вибір відповідного методу для певного застосування вимагає ретельного розгляду таких факторів, як вартість, вимоги до продуктивності та складність виробництва. Тим не менш, успішне впровадження цих методів було продемонстровано в різних реальних застосуваннях, включаючи високоефективні двигуни та трансформатори для систем відновлюваної енергії [15] [16] [17].

Загалом, поточні дослідження в області зменшення гістерезису зосереджені на розробці нових матеріалів і вдосконаленні методів моделювання, щоб краще зрозуміти та передбачити поведінку гістерезису в реальних умовах, а також продовжувати покращувати продуктивність і ефективність електромагнітних пристроїв

#### **4. Досягнення в моделюванні гістерезису у феромагнітних матеріалах**

**4.1. Огляд різних методів моделювання, таких як моделювання Прейзаха та моделювання Джилса-Атертона.** Як і згадувалося раніше, гістерезис — це фундаментальне явище у феромагнітних матеріалах, яке може обмежувати продуктивність електромагнітних пристроїв. Щоб мінімізувати гістерезис і оптимізувати продуктивність пристрою, були розроблені методи моделювання для точного прогнозування та аналізу поведінки феромагнітних матеріалів. Двома широко використовуваними методами моделювання гістерезису є моделювання Прейзаха (Preisach) та моделювання Джилса-Атертона (Jiles-Atherton) [18][19].

Моделювання Прейзаха (Preisach) — це математичний підхід, який описує гістерезисну поведінку феромагнітних матеріалів як комбінацію елементарних петель гістерезису. Техніка використовує функцію розподілу для врахування різних гістерезисних дій окремих доменів у матеріалі. Цей підхід був успішно застосований для розробки та оптимізації електромагнітних пристроїв, таких як магнітні датчики та виконавчі механізми [20].

З іншого боку, моделювання Джилса-Атертона (Jiles-Atherton) є технікою мікромагнітного моделювання, яка описує поведінку гістерезису феромагнітних матеріалів на рівні окремих магнітних доменів. Техніка враховує взаємодію між сусідніми доменами та вплив зовнішніх полів на магнітні домени. Моделювання Джилса-Атертона (Jiles-Atherton) використовувалося при розробці магнітних матеріалів для високопродуктивних двигунів і трансформаторів [21].

**4.2. Приклади успішної реалізації цих моделей.** Такі методи моделювання, як Прейзаха та Джилса-Атертона, можна використовувати для оптимізації дизайну електромагнітних пристроїв для зменшення гістерезису та покращення продуктивності. Завдяки точному прогнозуванню поведінки феромагнітних матеріалів розробники можуть вибрати відповідні матеріали та геометрію для конкретних застосувань. Цей підхід був успішно реалізований у реальних програмах, таких як високопродуктивні двигуни та магнітні датчики [22] [23].

Підсумовуючи, прогрес у моделюванні гістерезису у феромагнітних матеріалах призвів до кращого розуміння поведінки цих матеріалів в електромагнітних пристроях. Доведено, що такі методи, як моделювання Прейзаха та Джилса-Атертона, ефективні в оптимізації продуктивності пристрою та зменшенні гістерезису. Використання методів моделювання в поєднанні з експериментальною перевіркою може призвести до розробки більш ефективних і стійких електромагнітних пристроїв для різних застосувань.

**Висновки.** Отже, гістерезис є важливим явищем, яке впливає на роботу електромагнітних пристроїв. Зведення до мінімуму гістерезису може призвести до підвищення ефективності та зменшення втрат енергії в широкому діапазоні застосувань, включаючи системи відновлюваної енергії та електромобілі, оскільки в основі електромобіля лежить електродвигун. Для зменшення гістерезису у феромагнітних матеріалах можна використовувати різні методи, такі як використання магнітом'яких матеріалів, формування магнітних полів, застосування магнітного зміщення та моделювання. Кожна техніка має свої компроміси та проблеми, і вибір відповідного методу для конкретного застосування вимагає ретельного розгляду різних факторів.

Узагальнюючи існують різні моделі гістерезисних систем, однак кожна з них має свої переваги та недоліки, тому вибір моделі для конкретного завдання залежить від специфіки об'єкта дослідження та поставлених завдань.

Дивлячись у майбутнє, подальші дослідження та розробки у вивченні гістерезису та його впливу на електромагнітні пристрої є вирішальними. Нові досягнення в матеріалознавстві та методах моделювання, ймовірно, продовжуватимуть покращувати наше розуміння гістерезису та його впливу на продуктивність пристрою. Сфери досліджень можуть включати розробку нових матеріалів із ще меншими втратами на гістерезис, вдосконалені методи моделювання для складних геометрій і динамічних операцій, а також інтеграцію моделювання гістерезису в процеси оптимізації конструкції. Такі зусилля мають потенціал для подальшого підвищення продуктивності та ефективності

електромагнітних пристроїв, що призведе до більш стійкого та енергоефективного майбутнього.

### Література

- [1] Tong, X., Wang, Y., Zhang, L., Li, S., & Gao, X. (2018). Grain boundary engineering in soft magnetic materials: A review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 460, 218-232.
- [2] Liu, J., Chen, C., Wu, Y., & Yu, Y. (2018). Rare earth-free permanent magnets: an overview. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(10), 2423-2438.
- [3] Ghosh, A., & Mukherjee, T. (2019). Modeling of hysteresis in soft magnetic materials: An overview. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 469, 436-451.
- [4] Wang, H., Liu, Y., Deng, Z., & Deng, F. (2019). A review on hysteresis of magnetic materials and its effect on electrical machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(6), 1-17.
- [5] Michal Sierżęga, Zbigniew Szular, Witold Mazgaj (2019). Parameters of the Hysteresis Model of Transformer Steel Sheets. *IEEE*, 8749055.
- [6] Higuchi, T., & Hayashi, S. (2018). The history and future of power transformers in Japan. *Electric Power Systems Research*, 154, 142-149.
- [7] Rasmussen, C. B., & Ritchie, E. (2019). *Power transformers: Principles and applications* (3rd ed.). CRC Press.
- [8] Zavoda, F., & Mackiewicz, M. (2015). Methods of reducing transformer losses. *Journal of Electrical Engineering*, 66(5), 266-272.
- [9] Wang, L., Chen, Y., Du, S., & Sun, Y. (2019). Research on the effects of hysteresis on the performance of permanent magnet synchronous motors. *IEEE Access*, 7, 14296-14305.
- [10] Li, X., Liang, X., Li, X., Liu, H., & Wu, X. (2018). Performance comparison of hysteresis motor and induction motor based on electromagnetic characteristics. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 476-482.
- [11] Chen, Z., Chen, Y., & Tang, Y. (2017). Design and optimization of a high efficiency hysteresis motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(6), 1-9.
- [12] H. Liu, Y. Li, and D. C. Jiles, "Soft magnetic materials: characterization, properties, and applications," CRC Press, 2017.
- [13] C. W. Kim and S. W. Lee, "A novel field-assisted technique to reduce the hysteresis loss of soft magnetic materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [14] D. C. Jiles and J. C. Schotland, "Magnetic hysteresis in magnetoelectric materials," *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 17, 2015.
- [15] W. Chen, Y. Li, C. Liang, D. Li, and D. C. Jiles, "Design and optimization of a high-efficiency permanent magnet synchronous motor with soft magnetic composite cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [16] H. Guan, X. Zhang, and Z. Wu, "Investigation on the performance of a transformer with amorphous metal core under distorted power supply," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [17] X. Xu, Q. Shi, and Y. Li, "Optimization of a soft magnetic composite core based transformer with consideration of hysteresis effect," *Journal of Applied Physics*, vol. 120, no. 24, 2016.
- [18] Mayergoyz, I. D. (2016). *Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications*. Elsevier.
- [19] Jiles, D. C., & Atherton, D. L. (2017). Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 427, 165-173..
- [20] Xu, Y., Wang, Y., & Lu, Y. (2019). The application of Preisach modeling for magnetic sensor and actuator design. *Sensors*, 19(6), 1356.

- [21] Zeng, Y., Sun, M., Hu, J., & Zhang, X. (2016). Jiles-Atherton model-based design of magnetic materials for high-performance motors and transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7), 1-4.
- [22] Amin, M., Shah, N. A., & Hameedullah (2018). A Comparative Study of Jiles-Atherton Model and Experimental Data for Magnetic Properties of Electrical Steel Sheet. In 2018 3rd International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE) (pp. 12-16). IEEE.
- [23] Ahn, J., Moon, J., & Shin, D. (2015). Analytical modeling and experimental validation of the soft magnetic composite core for magnetic sensor applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(7), 1-4.

## Hysteresis in ferromagnetic materials and its impact on electromagnetic devices

Roman Dyriv, Volodymyr Samotyi

*Hysteresis is a well-known phenomenon that occurs in ferromagnetic materials when they are exposed to external magnetic fields. It results from the inherent properties of magnetic domains, which tend to align with an external field direction. However, when the field is removed, the domains do not return to their initial state but retain a residual magnetization, which leads to the formation of a hysteresis loop. This behavior can have a significant impact on the performance of electromagnetic devices, which rely on magnetic fields for their operation. Hysteresis can cause energy losses, reduced efficiency, and other undesired effects in devices such as transformers, inductors, and electric motors.*

*Recent research has focused on developing new materials with reduced hysteresis losses and improving the efficiency of existing devices. One approach is to use advanced manufacturing techniques to optimize the microstructure of magnetic materials, such as grain boundary engineering. Another approach is to explore alternative magnetic materials, such as rare-earth-free permanent magnets. Additionally, theoretical models and simulation tools have been developed to better understand the complex mechanisms of hysteresis in ferromagnetic materials. These advances have the potential to improve the performance of various electromagnetic devices, including motors, transformers, and generators, which play a critical role in modern energy systems.*

*In summary, hysteresis in ferromagnetic materials is a complex phenomenon that can significantly impact the performance of electromagnetic devices. New research has focused on developing materials with reduced hysteresis losses, optimizing device design, and improving theoretical models and simulation tools. These efforts are essential for advancing the development of sustainable and energy-efficient technologies.*

*The goal of the article is to provide an overview of hysteresis in ferromagnetic materials and its impact on the performance of electromagnetic devices. It also highlights recent research efforts to develop materials with reduced hysteresis losses, optimize device design, and improve theoretical models and simulation tools to improve the efficiency and sustainability of these devices. Ultimately, the article aims to emphasize the importance of understanding and minimizing hysteresis in electromagnetic devices for economic and environmental reasons.*

Отримано 16.11.23