

ФІЗИЧНА ПРИРОДА ВИХРОВИХ СТРУМІВ ТА МЕХАНІЗМИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто фізичну природу виникнення вихрових струмів у електропровідних середовищах під дією змінного магнітного поля. Проаналізовано основні механізми енергетичних втрат, пов'язаних із вихровими струмами, зокрема джоулеві втрати, вплив скін-ефекту та гістерезису у ферромагнітних матеріалах. Наведено базові фізичні співвідношення, що описують процеси індукції струмів та розсіювання енергії. Показано, що втрати енергії є неминучим наслідком електромагнітної індукції та суттєво залежать від частоти поля, електропровідності матеріалу і його магнітних властивостей.

Ключові слова: вихрові струми, електромагнітна індукція, енергетичні втрати, скін-ефект, гістерезис, магнітне поле.

Abstract

The paper considers the physical nature of eddy currents induced in electrically conductive media under the action of time-varying magnetic fields. The main mechanisms of energy losses associated with eddy currents are analyzed, including Joule losses, the skin effect, and hysteresis losses in ferromagnetic materials. Basic physical relations describing current induction and energy dissipation are presented. It is shown that energy losses are an inherent consequence of electromagnetic induction and strongly depend on field frequency, electrical conductivity, and magnetic properties of materials.

Keywords: eddy currents, electromagnetic induction, energy losses, skin effect, hysteresis, magnetic field.

Вступ

Явище вихрових струмів є одним із фундаментальних проявів електромагнітної індукції та відіграє важливу роль у фізиці провідних і магнітних матеріалів. Вихрові струми виникають у будь-якому електропровідному тілі, яке перебуває в змінному магнітному полі, і супроводжуються перетворенням електромагнітної енергії у внутрішню енергію матеріалу [1].

Незважаючи на широке практичне використання вихрових струмів (індукційний нагрів, електромагнітні гальма), у багатьох фізичних та технічних системах вони є джерелом небажаних енергетичних втрат. Тому аналіз фізичних механізмів виникнення вихрових струмів та пов'язаних із ними втрат енергії має важливе фундаментальне значення [2].

Метою даної роботи є дослідження фізичної природи вихрових струмів та основних механізмів енергетичних втрат, що виникають у провідних і магнітних середовищах.

Результати дослідження

Фізична природа вихрових струмів

Згідно із законом електромагнітної індукції Фарадея, змінний у часі магнітний потік Φ_B індукує електрорушійну силу в замкненому контурі:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt},$$

де $\mathcal{E}$ — електрорушійна сила індукції, Φ_B — магнітний потік через замкнений контур, t — час.

У масивному провіднику такими контурами є замкнені траєкторії всередині матеріалу, вздовж яких циркулюють вихрові струми. Напрямок індукованих струмів визначається правилом Ленца — індуковане магнітне поле завжди протидіє зміні зовнішнього поля, що його спричинило [1].

Густина струму в провіднику описується співвідношенням:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E},$$

де $\mathbf{J}$ — густина електричного струму, σ — електропровідність матеріалу, $\mathbf{E}$ — напруженість індукованого електричного поля.

Механізми енергетичних втрат

Основним механізмом розсіювання енергії вихрових струмів є джоулеве нагрівання, яке визначається законом Джоуля–Ленца:

$$P = \int_V \frac{J^2}{\sigma} dV,$$

де P — потужність теплових втрат, J — модуль густини вихрових струмів, σ — електропровідність матеріалу, V — об'єм провідника [2].

За високих частот змінного магнітного поля важливу роль відіграє скін-ефект, що полягає у витісненні струму до поверхневих шарів провідника. Глибина проникнення струму визначається як:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}},$$

де δ — глибина скін-шару, ω — кутова частота поля, μ — магнітна проникність матеріалу, σ — електропровідність матеріалу [3].

У феромагнітних матеріалах додаткові втрати зумовлені гістерезисом — необоротним процесом перемагнічування доменів, енергія якого дорівнює площі петлі гістерезису на діаграмі B — H [4].

Таблиця 1. Основні механізми втрат енергії

Механізм втрат	Фізичне походження	Наслідок
Джоулеві втрати	Опір матеріалу	Нагрів провідника
Скін-ефект	Нерівномірний розподіл струму	Зростання ефективного опору
Гістерезис	Перемагнічування доменів	Додаткове розсіювання енергії

Отже, сумарні втрати енергії залежать від частоти змінного поля, електропровідності, магнітних властивостей і геометрії провідника [3, 4].

Висновки

Вихрові струми є неминучим фізичним наслідком електромагнітної індукції у провідних матеріалах. Основними механізмами енергетичних втрат, пов'язаних із ними, є джоулеве нагрівання, скін-ефект та гістерезис у феромагнітних середовищах. Отримані результати свідчать, що зменшення втрат можливе шляхом вибору матеріалів з відповідними електромагнітними властивостями та зниження частоти змінного магнітного поля. Розуміння фізичної природи вихрових струмів є важливим для аналізу та оптимізації багатьох фізичних і технічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Griffiths D. J. *Introduction to Electrodynamics*. — 4th ed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2017. — 620 p.
2. Jackson J. D. *Classical Electrodynamics*. — 3rd ed. — New York: Wiley, 1999. — 832 p.
3. Stratton J. A. *Electromagnetic Theory*. — New York: McGraw-Hill, 1941. — 615 p.
4. Cullity B. D., Graham C. D. *Introduction to Magnetic Materials*. — 2nd ed. — Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008. — 544 p.

Сірак Владислав Олегович — студент групи 1KI-25мс, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця. e-mail: vladsirak9@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Sirak Vladislav O. – student of group 1KI-25ms, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vladsirak9@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of general Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia