

Лабораторія “Електрики та магнетизму” Лабораторна робота №13

“ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ МІЖ ПОЛЮСАМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТУ”

Мета роботи

Визначити залежність індукції магнітного поля в області між полюсами електромагніту в залежності від струму, що протікає в котушках електромагніту, відстані між полюсами та кількості витків в обмотках електромагніту.

Вступ.

Для отримання магнітних полів використовуються електромагніти та сталі магніти. Електромагніти є соленоїди з феромагнітним сердечником. Як правило, сердечник вигнутий так, що утворює майже замкнутий магнітопровід, який називається ярмом, так, що існує досить вузький повітряний проміжок між полюсами електромагніту.

Вектор магнітної індукції \vec{B} характеризує середнє магнітне поле, яке створюється токами провідності та токами намагнічування. Наявність магнітних зарядів експериментально не доведена, тому лінії вектора магнітної індукції \vec{B} замкнуті, і на межі двох магнетиків вони неперервні. При малій товщині повітряного прошарку між полюсами електромагніту лінії \vec{B} орієнтовані практично перпендикулярно межі сердечник-повітря, і тому густина ліній \vec{B} в обох середовищах однакова.

На відміну від цього вектор напруженості магнітного поля в ізотропних магнітних середовищах $\vec{H} = \vec{B} / \mu\mu_0$ має різну густину ліній в залізному сердечнику електромагніту та в повітряному проміжку. Лінії вектора \vec{H} починаються на північному полюсі магніту, а закінчуються на південному, тобто вектор \vec{H} має джерела на полюсах магніту, де має місце неоднорідність магнітної проникливості μ .

Вихорами поля \vec{H} можуть бути макроструми провідності та змінне в часі електричне поле. Вихорами поля \vec{B} є струми провідності та струми намагнічування, що обумовлені рухом заряджених частинок, що входять до складу атомів магнетика.

Припустимо, що струми провідності відсутні, тоді вектор індукції \vec{B} створюється струмами намагнічування, що протікають в атомах магнетика. При однорідному намагнічуванні ці мікроструми всередині магнетика практично компенсують один одного і лише на поверхні створюють макроскопічний поверхневий струм намагнічення. Під час переходу через бічну поверхню сердечника магніту тангенціальна складова вектора \vec{B} зменшується до дуже малої величини, тому практично все магнітне поле \vec{B} розташоване в сердечнику електромагніта. У проміжку між полюсами електромагніту густина силових ліній майже така ж, як і в сердечнику. Невелике зменшення її обумовлено малим викривленням ліній індукції у повітрі, яке зростає при збільшенні довжини повітряного проміжку.

Вектор \vec{H} за відсутності макрострумів провідності та змінного в часі електричного поля не має вихорів, але у нього є джерела, що розташовані на межі магнетик-вакуум. Лінії вектора \vec{H} починаються на північному полюсі магніту, а закінчуються на південному полюсі. У сердечнику вектори \vec{B} та \vec{H} направлені назустріч один одному. У повітряному проміжку вони мають однаковий напрям.

Якщо по котушках, що намотані на сердечник, пропустити електричний струм, то поведінка вектора \vec{H} стає істотно залежною від струму. У випадку, коли напрям поля, яке створюється макрострумом, не співпадає з напрямом поля мікрострумів магніту, тоді при зростанні сили електричного струму всередині залізного сердечника вектор \vec{H} спершу зменшиться до нуля, а потім, помінявши напрям, починає збільшуватися. Таким чином, при досить великих значеннях сили електричного струму через котушки електромагніта, вектор \vec{H} в залізному сердечнику буде орієнтований вздовж індукції \vec{B} .

Для знаходження \vec{B} в проміжку між полюсами електромагніту, скористаємося законом про циркуляцію вектора \vec{H} :

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum_i I_i, \quad (1)$$

де I_i - макроструми, які перетинають площу, обмежену контуром L . Якщо L_{Fe} та L_{Π} відповідно довжини залізного сердечника та повітряного проміжку між полюсами, то з рівняння (1) отримаємо:

$$H_B L_{\Pi} + H_{Fe} L_{Fe} = NI, \quad (2)$$

де N - кількість витків котушки електромагніта. Використовуючи співвідношення, $\vec{H} = \vec{B} / \mu\mu_0$ отримаємо магнітну індукцію в залізному сердечнику електромагніту

$$B_{Fe} = \frac{\mu_0 NI}{\frac{L_B}{\mu_B} + \frac{L_{Fe}}{\mu_{Fe}}}. \quad (3)$$

Магнітна проникність повітря $\mu_B \approx 1$ і тому з рівняння (3) отримаємо:

$$B = B_B = \mu_0 N \frac{I}{L_B}. \quad (4)$$

Таким чином, індукція магнітного поля \vec{B} в повітряному проміжку електромагніта пропорційна силі струму в обмотках електромагніту та числу витків обмотки, а також зменшується при збільшенні довжини повітряного проміжку L_B . На практиці за допомогою електромагніту з залізним сердечником можна отримати магнітні поля з індукцією \vec{B} близько 1 Тл (10^4 Гс).

Для знаходження величини \vec{B} скористаємося вимірювальною котушкою, яка може вільно рухатися в повітряному проміжку електромагніта. За законом електромагнітної індукції електрорушійна сила, яка з'являється у вимірювальній котушці при швидкому вийманні з області магнітного поля, дорівнює:

$$\varepsilon = -N_u S_u \frac{dB}{dt}, \quad (5)$$

де S_u і $N_u = 5I$ - відповідно площа та кількість витків вимірювальної котушки. Якщо до вимірювальної котушки підключити балістичний гальванометр, то через нього потече струм.

Балістичний гальванометр дозволяє вимірювати кількість заряду, яка пройшла через нього за час протікання струму I . Оскільки, $dQ = Idt$, $I = \varepsilon / R$, де R - сумарний опір кола гальванометра, то

$$dQ = -S_u N_u dB / R. \quad (6)$$

Відхилення балістичного гальванометра $d\alpha$ пропорційне заряду, що пройшов по колу за час протікання індукційного струму, тобто $dQ = -C_Q d\alpha$. Коефіцієнт пропорційності C_Q - називається балістичною сталою гальванометра. Таким чином, $dB = C_Q R d\alpha / S_u N_u$. При

незмінному опору кола гальванометра R ; величина $C_\varphi = C_Q R$ називається балістичною сталою установки. Вона визначає зв'язок між відхиленням $d\alpha$ зайчика гальванометра та потоком індукції $d\Phi$ через котушку:

$$C_\varphi = C_Q R = \frac{d\Phi}{d\alpha} = \frac{S_u N_u}{d\alpha} dB \frac{\text{вебер}}{\text{поділку}}. \quad (7)$$

Знаючи C_φ неважко знайти напруженість магнітного поля $H = B / \mu\mu_0$. Для повітря $\mu_B \approx 1$ тому:

$$B \approx -dB = \frac{C_\varphi}{S_u N_u} d\alpha. \quad (8)$$

Таким чином, для визначення індукції магнітного поля між полюсами електромагніту необхідно швидко вийняти з області простору між полюсами електромагніту, де є магнітне поле, вимірювальну котушку з відомим числом витків N_u та площею S_u . Якщо підставити отримане при цьому відхилення гальванометра $d\alpha$ у формулу (8), то при відомому значенні C_φ , можна визначити величину магнітного поля B .

Для визначення балістичної сталої установки C_φ необхідно проградувати гальванометр за допомогою еталонної котушки, в якості якої використовується довгий соленоїд, в середній частині якого намотана вторинна обмотка, сполучена послідовно з гальванометром і вимірювальною котушкою.

Магнітне поле в еталонному соленоїді дорівнює:

$$B = \mu_0 I N_e / L_e, \quad (9)$$

де I - струм через еталонну котушку, $N_e = 1800$ - число витків еталонної котушки.

Магнітний потік через витки вторинної котушки дорівнює

$$d\Phi = B N_2 S_e, \quad (10)$$

де $N_2 = 250$ - число витків вторинної котушки.

Підставляючи цей вираз у формулу (7), отримаємо

$$C_\varphi = \frac{B S_e N_2}{d\alpha} = \frac{\mu_0 I S_e N_e N_2}{L_e d\alpha}. \quad (11)$$

Вмикаючи або вимикаючи струм в колі балістичного гальванометра, можна визначити балістичну сталу установки C_φ а потім, використовуючи цю величину, вимірювати магнітне поле в проміжку між полюсами електромагніту. Важливо, що в процесі вимірювання необхідно забезпечити незмінність опору кола гальванометра, оскільки тільки в цьому випадку балістична стала установки C_φ , що залежить від цього опору, також не змінюватиметься. Ця умова виконуватиметься, якщо в процесі вимірювання балістичний гальванометр при всіх вимірюваннях магнітного поля послідовно сполучений з вторинною обмоткою довгого еталонного соленоїда і вимірювальною котушкою.

Опис експериментальної установки.

Принципова електрична схема установки показана на рис. 1.

Параметри котушок:

- 1) Вимірювальна котушка: діаметр витків $D_u = 18 \text{ мм}$, кількість витків $N_u = 51$.

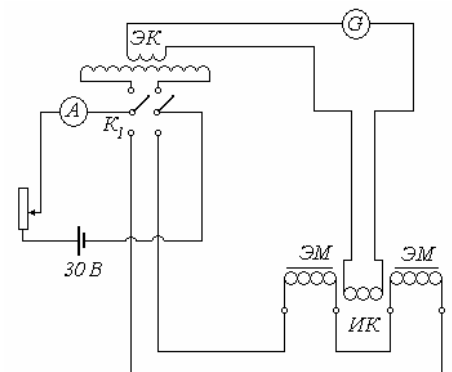


Рис. 1

- 2) Первинна обмотка еталонного соленоїда: діаметр витків $D_e = 28 \text{ мм}$, кількість витків $N_e = 1800$, довжина котушки $L_e = 55.6 \text{ см}$.
- 3) Вторинна обмотка еталонного соленоїда: діаметр витків $D_2 = 32 \text{ мм}$, кількість витків $N_2 = 250$, довжина котушки $L_2 = 30.0 \text{ мм}$.

Довжина повітряного проміжку регулюється за допомогою спеціальних гвинтів. Сила електричного струму в котушках електромагніту регулюється джерелом сталого струму. Кількість витків обмотки електромагніту змінюється шляхом включення в електричного кола електромагніту наявних в ньому обмоток.

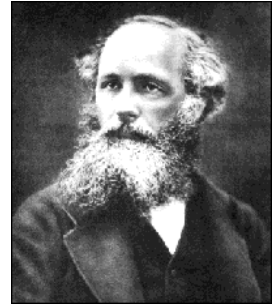
Виконання роботи.

1. Зібрати схему, показану на рис. 1.
2. Визначити балістичну сталу установки C_ϕ . Для цього замкнути перемикач K_1 на клемі еталонної котушки та встановити струм $I = 0,2 \text{ А}$. Розімкнути перемикач K_1 і записати значення відхилення $d\alpha$ гальванометра. Повторити це кілька разів та записати середнє значення відхилення $d\alpha$. Підставляючи середнє значення $d\alpha$, визначити сталу установки C_ϕ .
3. Визначити залежність величини індукції магнітного поля B в повітряному проміжку електромагніту від сили струму I в котушках. Вимірювання провести для трьох значень довжини повітряного проміжку L_B . При кожному значенні струму I швидко виймати котушку, помічаючи відхилення гальванометра. Потім повернути котушку в область між магнітами і встановити нове значення струму. Струм I змінювати з інтервалом $0,05 \text{ А}$ від 0 до $0,4 \text{ А}$, слідкуючи за тим, щоб “зайчик” гальванометра знаходився в межах шкали в діапазоні “x1”.
4. Визначити залежність величини індукції магнітного поля від числа витків N котушок соленоїда. Для цього при фіксованій довжині повітряного проміжку L_B та значенні струму виміряти магнітне поле B у випадку, коли в коло електромагніту включена спочатку одна, а потім дві котушки.
5. Намалювати залежність магнітного поля від сили струму $B = B(I)$ та залежність $B = B(L_B^{-1})$ від величини, оберненої до довжини повітряного проміжку.

Контрольні питання.

- 1) Написати рівняння Максвела для векторів \vec{B} та \vec{H} .
- 2) Сформулювати закон електромагнітної індукції в трактуванні Фарадея та Максвела.
- 3) Вивести граничні умови для векторів \vec{B} та \vec{H} .
- 4) Записати теорему про циркуляцію векторів \vec{B} та \vec{H} .
- 5) Які методи вимірювання напруженості, індукції магнітного поля та потоку ви знаєте?

МАКСВЕЛ Джеймс-Клерк (Maxwell) (13.6.1831, Едінбург, - 5.11.1879, Кембрідж) - англійський фізик, творець класичної електродинаміки, один з засновників статистичної фізики. З 1871 року професор Кембріджського університету. Там він заснував першу у Великобританії спеціально обладнану фізичну лабораторію - **Кавендішську лабораторію**, директором якої він був з 1871 року. Розвиток фізики показав, що носієм електромагнітних взаємодій є електромагнітне поле, класичну теорію якого створив Максвел. У цій теорії він узагальнив всі відомі на той час факти макроскопічної електродинаміки і вперше ввів уявлення про струм зміщення. Максвел записав закони електромагнітного поля у вигляді системи 4 диференціальних рівнянь в часткових похідних (**Максвела рівняння**). Їх аналіз дозволив передбачити багато невідомих до того явищ та закономірностей: існування електромагнітних хвиль, згодом експериментально відкритих Р. Герцем. Досліджуючи ці рівняння, Максвел прийшов до висновку про електромагнітну природу світла (1865) і показав, що швидкість будь-яких інших електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює швидкості світла. З теорії Максвел витікало, що електромагнітні хвилі чинять тиск, що і було експериментально встановлено в 1899 П.Н. Лебедевим. Теорія електромагнетизму Максвела отримала повне експериментальне підтвердження і стала загальновизнаною класичною основою сучасної фізики.



ФАРАДЕЙ Майкл (Michael Faraday) (22.IX 1791 - 25.VIII 1867) - англійський фізик, основоположник вчення про електромагнітне поле. Виявив хімічну дію електричного струму, взаємозв'язок між електрикою і магнетизмом, магнетизмом і світлом. Відкрив (1831) електромагнітну індукцію – явище, яке лягло в основу електротехніки, Встановив (1833–34) закони електролізу, названі його ім'ям, відкрив пара- і діамagnetизм, обертання площини поляризації світла в магнітному полі (ефект Фарадея). Ввів поняття електричного і магнітного поля, висловив ідею існування електромагнітних хвиль.

