

МАГНІТНИЙ МОМЕНТ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Мета роботи

Визначити момент сили, зумовлений магнітним моментом в постійному магнітному полі, як функцію:

- індукції магнітного поля;
- кута між напрямком магнітного поля та магнітного моменту;
- величини магнітного моменту.

За результатами експериментів визначити константу котушок Гельмгольца.

1. Теоретичне підґрунтя

1.1. Що таке магнітний момент

Магнітний момент, або **магнітний дипольний момент** — векторна величина, що характеризує взаємодію тіла з магнітним полем.

Означення магнітного моменту:

$$\vec{p}_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{r} \times \vec{j} dV, \quad (1)$$

де $\vec{j}dV$ — елемент об'ємного струму. У випадку елемента лінійного струму $I\vec{dl}$ формула (1) перетворюється на вираз:

$$\vec{p}_m = \frac{I}{2} \oint_L \vec{r} \times \vec{dl}. \quad (2)$$

Використовуючи формулу (2) можна знайти момент кільцевого витка зі струмом:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (3)$$

де \vec{n} — вектор нормалі до плоскої поверхні витка. Напрямок вектора нормалі співпадає з правилом правого гвинта (рис. 1).

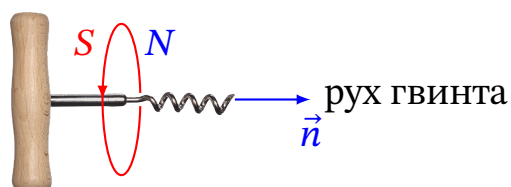


Рис. 1. Полюса витка

Магнітне поле впливає на магнітний диполь. Зокрема, на виток зі струмом, що вміщений в однорідне магнітне поле діє обертовий момент:

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}. \quad (4)$$

Вираз (4) є фундаментальним фактом, тобто достовірність має бути перевірена на досліді.

Зокрема, вираз (4) дає можливість ввести кількісну характеристику магнітного поля — *вектора індукції*.

Для цього необхідно взяти виток з одиничним магнітним моментом, який ми визначили за формулою (3). Для того, щоб магнітний момент витка був одиничним, необхідно, щоб по ньому йшов струм в $I = 1$ Ампер, а площа такого витка дорівнювала $S = 1 \text{ м}^2$. Розташуємо тепер виток так, щоб його магнітний момент був перпендикулярним до магнітного поля і виміряємо момент сили, тоді це значення і буде те число, яким ми кількісно охарактеризуємо магнітне поле¹:

$$B = \frac{M}{p_m}. \quad (5)$$

Ця величина назвається індукцією магнітного поля. В системі одиниць SI, ця величина вимірюється в Теслах, скорочено – Тл:

$$1\text{Тл} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2}. \quad (6)$$

1.2. Котушки Гельмгольца

Котушки Гельмгольца (кільця Гельмгольца) — пристрій, що складається з двох однакових тонких соленоїдів, розташованих на одній осі на відстані один від одного, що дорівнює їх радіусам (рис. 2) і які з'єднані послідовно таким чином, щоб струм у них циркулював в однаковому напрямку. Котушка названа на честь Германа фон Гельмгольца. Розташування двох соленоїдів на віддалі радіуса один від одного забезпечує таку однорідність поля вздовж осі, при якій відмінною від нуля є тільки четверта похідна від поля. Використовуються для отримання постійного, змінного або імпульсного магнітного поля з зоною однорідності, яке зазвичай використовується в експериментах, а також для калібрування датчиків магнітної індукції, намагнічування і розмагнічування постійних магнітів, розмагнічування сталевих заготовок, деталей і інструментів. Область поля з неоднорідністю менше 1 % є еліпсої-

¹Характеристику магнітного поля — індукцію — не можна ввести аналогічно до того способу, яким вводиться характеристика електричного поля — напруженість, тобто через силу, що діє на одиничний заряд, оскільки в природі не існує магнітного заряду (монополя)

дом обертання близьким до сфери радіусом $0.3R$, що майже в 4 рази більше ніж для одного кільця. Еліпсоїд трохи стислий уздовж осі (рис. 3).

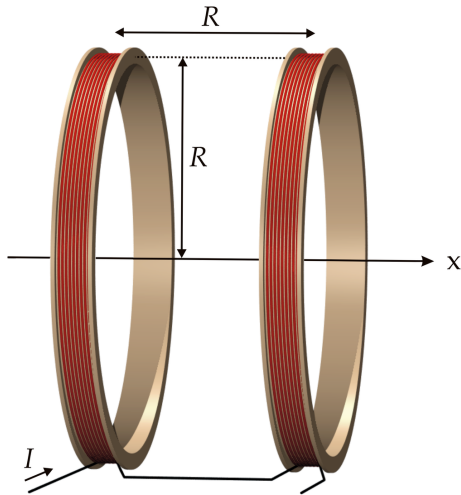


Рис. 2. Схема котушок Гельмгольца (взято з wikipedia)

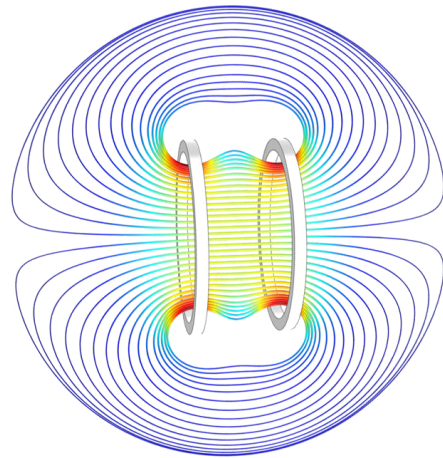


Рис. 3. Вигляд поля котушок Гельмгольца (взято з <https://www.freepng.ru/png-d02278/>)

Магнітне поле в центрі між котушками можна розрахувати за допомогою закону Біо-Савара-Лапласа, який дає формулу:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I}{R}. \quad (7)$$

Константою котушок називається величина $C = \frac{B}{I}$, яка, як випливає з (7) визначається формулою:

$$C = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n}{R}, \quad (8)$$

де n — кількість витків в одному кільці, R — радіус кільця.

В даній лабораторній роботі використовуються котушки Гельмгольца, параметри яких подані в табл. 1.

Розраховане значення константи котушок за формулою (8) з використанням даних таблиці 1 дає значення:

Таблиця 1. Параметри котушок

Величина	Значення
Кількість витків в одному кільці	$N = 154$
Радіус кільця	$R = 0.2 \text{ м}$
Константа котушок	$C = 6.92 \cdot 10^{-4} \text{ Тл/А}$

$$C = 6.92 \cdot 10^{-4} \text{ Тл/А}. \quad (9)$$

2. Робоча формула

Якщо магнітне поле буде неоднорідним, то воно буде різне на різних частини контура, який вміщений у це магнітне поле і, відповідно, на різні частини контура діяти різний обертальний момент. Для того, щоб цього уникнути, бажано використовувати однорідне магнітне поле, що забезпечується завдяки котушкам Гельмгольца.

У даній роботі контур — це пласка петля, що має N витків, по якій тече постійний струм I' , діаметр кільця d . А тому, його магнітний момент дорівнює згідно з (3):

$$p_m = I' \frac{N\pi d^2}{4},$$

а обертальний момент згідно (4) тоді визначатиметься як:

$$M = I' \frac{N\pi d^2}{4} B \sin \alpha.$$

Далі, враховуючи, що магнітне поле котушок Гельмгольца пропорційні силі струму, що тече по ним ($B = CI$, де C — величина, що залежить від параметрів котушок і називається *константою котушок Гельмгольца*) можемо записати:

$$M = \frac{\pi}{4} C I I' N d^2 \sin \alpha. \quad (10)$$

3. Експериментальне устаткування

Експериментальне устаткування (рис. 4) складається з котушок Гельмгольца, крутильних терезів (моментометру) з пристроєм для утримання електричного контура, двох стабілізованих джерел живлення (рис. 5), двох амперметрів і набору контурів. Обладнання слід збирати так, як показано на схемі рис. 6. Зверніть увагу, що котушки Гельмгольца з'єднуються між собою послідовно. Дроти, що підводять струм до контуру мають звисати вільно і повинні бути скручені разом, щоб не створювати додатковий обертальний момент.

Додаткова інформація

Нульова точка відліку крутильних терезів має часто перевірятися, оскільки швидкий обертальний рух пристроя, а також кожне стороннє втручання (заміна контуру, заміна кута, тощо) може зашкодити її положенню.

4. Хід роботи

1. Збираємо лабораторну установку (рис. 4). Одне джерело струму (рис. 5) через амперметр приєднується до котушок Гельмгольца (рис. 6), інше — до контуру (рис. 7). Треба простежити, щоб провідники, які підводять



Рис. 4. Експериментальна установка



Рис. 5. Джерело живлення

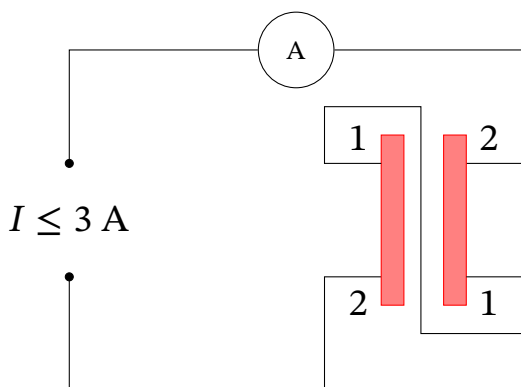


Рис. 6. Схема з'єднання котушок

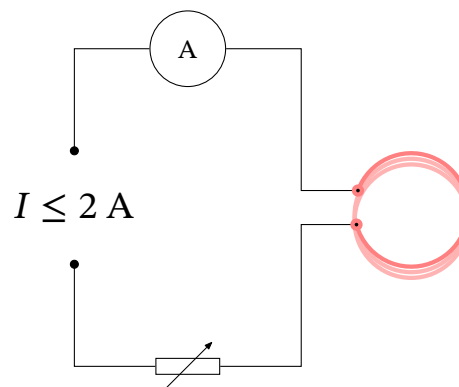


Рис. 7. Схема з'єднання контура

струм до контуру не спричиняли додатковий обертальний момент. Крутильні терези мають бути встановлені таким чином, щоб контур знаходився точно в центрі між котушками.

2. **Дослід 1.** Зніміть залежність обертального моменту M від сили струму в контурі I' . Для цього використовуйте найбільший за діаметром контур з найбільшим числом витків N . Встановіть найбільший струм $I = 3$ А через котушки Гельмгольца і кут $\alpha = 90^\circ$.
3. **Дослід 2.** Зніміть залежність обертального моменту M від сили струму в контурі I' . Для цього використовуйте найбільший за діаметром контур з найбільшим числом витків N . Встановіть найбільший струм $I' = 2$ А через контур і кут $\alpha = 90^\circ$.
4. **Дослід 3.** Зніміть залежність обертального моменту M від кута α в інтервалі $-90 \dots 90^\circ$ з кроком 15° . Для цього використовуйте найбільший за діаметром контур з найбільшим числом витків N . Встановіть найбільший струм $I' = 2$ А через контур і котушки Гельмгольца $I = 3$ А. Кут α слід змінювати використовуючи позначки на пристрої, що тримає котушку. Позначки на нерухомій частині пристрою зроблено через 45° , а на рухомій — через 30° . Таким чином, суміщаючи відповідні позначки, можна забезпечити крок в 15° .
5. **Дослід 4.** Зніміть залежність обертального моменту M від квадрату діаметру петлі d^2 . Для цього використовуйте найбільший за діаме-

тром контур з найбільшим числом витків N . Встановіть найбільший струм $I' = 2$ А через контур і котушки Гельмгольца $I = 3$ А та кут $\alpha = 90^\circ$.

6. **Дослід 5.** Зніміть залежність обертального моменту M від кількості витків N . Встановіть найбільший струм $I' = 2$ А через контур і котушки Гельмгольца $I = 3$ А та кут $\alpha = 90^\circ$.

5. Завдання

- За результатами дослідів 1 – 5 побудуйте графіки залежності обертального моменту від усіх досліджуваних параметрів:
 - Для дослідів 1 — $M = M(I')$;
 - Для дослідів 2 — $M = M(I)$;
 - Для дослідів 3 — $M = M(\sin \alpha)$;
 - Для дослідів 4 — $M = M(d^2)$;
 - Для дослідів 5 — $M = M(N)$;
- З лінійної апроксимації відповідних залежностей для кожного дослідів, визначте константу котушок Гельмгольца, використовуючи формулу (10).
- Порівняйте отримані значення з таким, що розрахований за законом Біо-Савара-Лапласа (9).

Контрольні запитання

- Що таке магнітна індукція та одиниці її вимірювання в СИ та СГС? Як визначається напрямок вектора \vec{B} ? Що таке лінії магнітної індукції?
- Що таке вектор \vec{H} та одиниці його вимірювання в СИ та СГС?
- Що таке магнітний диполь? Чим він характеризується? Наведіть приклади.
- Як розрахувати магнітний момент контура зі струмом?
- Як визначається магнітне поле магнітного диполя.
- У чому полягає закон Біо-Савара-Лапласа? Яка магнітна індукція поля, створюваного елементом струму?
- Як виглядають лінії магнітної індукції поля витка зі струмом?
- Які сили діють на контур зі струмом в однорідному магнітному полі? Як розрахувати величину крутного моменту цих сил?

Розрахункові завдання

- Розрахуйте магнітну індукцію поля на осі кругового витка зі струмом в його центрі і на відстані r від центру?
- З закону Біо-Савара-Лапласа виведіть значення константи котушок Гельмгольца.

3. Розрахуйте магнітне поле нескінченно довгого провідника зі струмом I на відстані r . Як розрахувати магнітне поле частини такого провідника? Наведіть розрахунки.
4. Розрахуйте магнітний момент однорідно зарядженої кулі радіусом R , що обертається із кутовою швидкістю ω . Заряд кулі Q . Як знайти магнітний момент, якщо замість кулі буде циліндр радіусом R ?