

МАГНІТНИЙ МОМЕНТ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

ФФ-83

Тор А. В., Другий А. В.

Мета роботи

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

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

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).

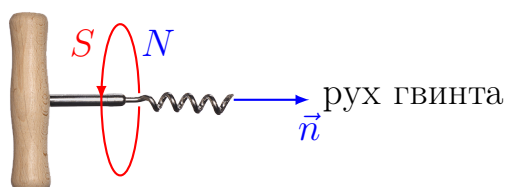


Рис. 1. Полюса витка

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

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

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 вимірємо момент сили, тоді це значення і буде те число, яким ми кількісно охарактеризуємо магнітне поле¹:

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

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 еліпсоїдом обертання близьким

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)

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

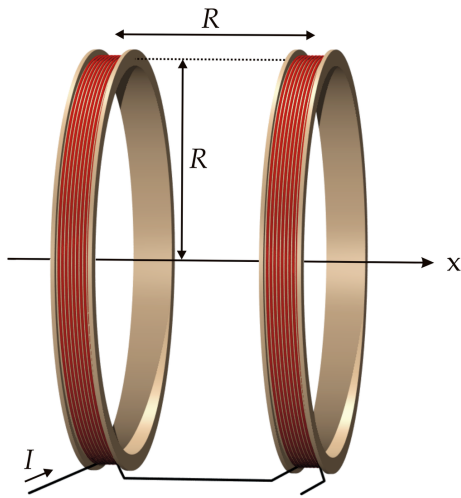


Рис. 2. Схема котушок Гельмгольца (взято з wikipedia)

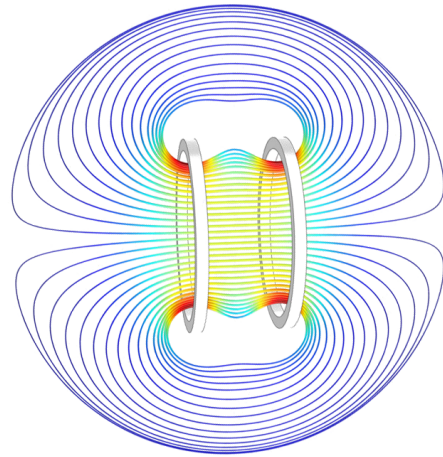


Рис. 3. Вигляд поля котушок Гельмгольца (взято з <https://www.freepng.ru/png-d02278/>)

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:

Табл. 1. Параметри котушок

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

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

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



Рис. 4. Експериментальна установка



Рис. 5. Джерело живлення

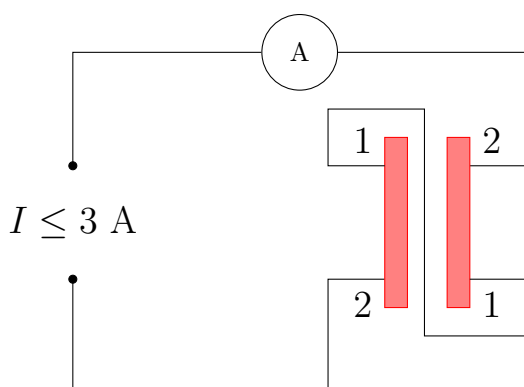


Рис. 6. Схема з'єднання котушок

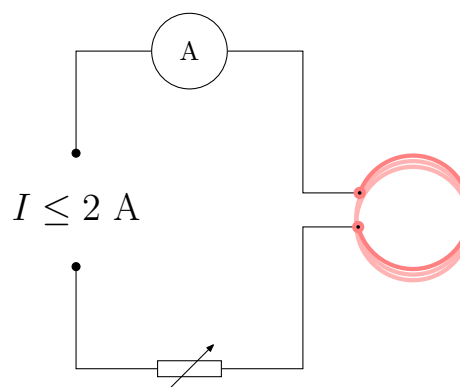


Рис. 7. Схема з'єднання контура

2. Зніміть залежність обертального моменту від сили струму в контурі.
3. ...

3. Результати вимірювань та обробка експериментальних даних

3.1. Визначення залежності обертального моменту від струму в контурі $T(I)$

Константи експерименту наведені в табл. 2.

Було виміряно момент сили, що діє на контур зі струмом в магнітному полі. Оскільки динамометр прилада градуйований в мН, то для отримання

значення моменту, вказані значення сили необхідно домножити на плече, що дорівнює 12 см.

За даними результатами побудуємо графік 8.

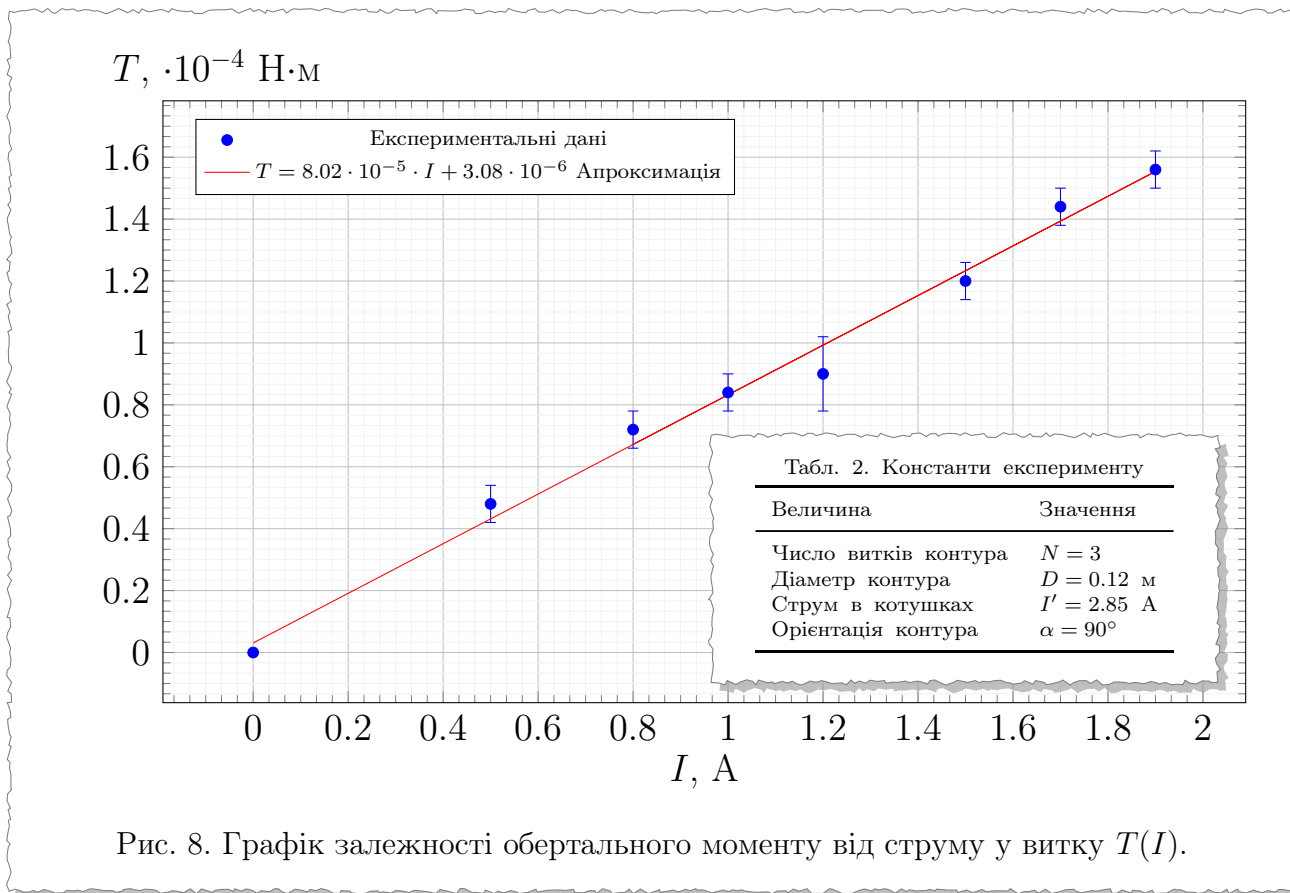


Рис. 8. Графік залежності обертового моменту від струму у витку $T(I)$.

Обчислюємо константу котушок Гельмгольца з даних апроксимації².

Для даного експерименту, константу котушок можна визначити, знаючи коефіцієнт апроксимації $k \approx 8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{А}}$ згідно формули:

$$C = \frac{4k}{IN\pi D^2} \quad (9)$$

Обчислення дають значення:

$$C \approx (8.3 \pm 1.2) \cdot 10^{-4} \text{ Тл/А}$$

Відносна похибка:

$$\varepsilon \approx 15 \text{ \%}.$$

²Тут прийдеться зробити апроксимацію експериментальних даних прямою $y = kx + b$. З теорії ясно, апроксимована залежність має проходити через початок координат, тобто $b = 0$. Проте, при обробці таких даних не можна використовувати залежність виду $y = kx$, оскільки це еквівалентно додаванню неіснуючих експериментальних точок до реально виміряного набору даних. Більш того, апроксимація експериментальних даних залежністю виду $y = kx + b$ дозволяє визначити систематичну похибку, яка присутня в вимірах. Якщо величина b не дорівнює нулю, і «нуль» не попадає всередину діапазону похибки $\pm \Delta b$, то слід зробити висновок, що або прийнята модель (тобто що $y = kx$) невірна, або точність проведених експериментів (наприклад, неврахована систематична похибка) більше статистичної та неможливо з необхідною точністю визначити величину k . Для більш точного визначення величини k необхідно, як правило, розширити діапазон зміни x в експерименті, якщо ж це не покращує ситуацію, то необхідно перевірити, чи немає інших джерел систематичної помилки.

4. Обговорення результатів

За результатами експериментів було перевірено формулу (4). Із результатів експериментів випливає, що формула вірна в межах вказаної точності. За результатами дослідів було знайдено константу котушок Гельмгольца. Порівняння знайденого значення із теоретично обрахованим за законом Біо-Савара-Лапласа показує дещо завищене її значення, навіть якщо рахувати по нижній межі експериментальної похибки. Оскільки похибка теоретичне теоретично обрахованого значення залежить лише від точності вимірювань геометричних параметрів, то можна визначити, що ця оцінка не перевищує значення 0.1 %. Причини високої експериментальної високої похибки та завищеного значення константи котушок, як показують додаткові дослідження можуть полягати в ...

Висновки