



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Фізико-технічний інститут

С. М. Пономаренко, Ю. О. Тараненко

Електрика та магнетизм

Лабораторний практикум.

Електричне та магнітне поле

КИЇВ 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КІЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Електрика та магнетизм

Лабораторний практикум.

Електричне та магнітне поле

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Прикладна фізика» спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали

КИЇВ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Зміст

| | |
|--|----|
| Робота 1: Перевірка закону Кулона | 3 |
| Робота 2: Магнітний момент у магнітному полі | 11 |
| Робота 3: Вимірювання магнітного поля Землі | 18 |

Робота 1

Перевірка закону Кулона

Мета роботи

Перевірити закон Кулона:

1. Визначити залежність сили від заряду;
2. визначити залежність сили від відстані;
3. визначити електричну сталу в системі SI.

Ключові слова: Закон Кулона, електричне поле, електричний заряд

Обладнання: штатив, крутільний динамометр, джерело високовольтної напруги, набір металевих кульок, металева пластина.

Рекомендована література

1. С. Р. Філонович. Судьба класического закона. Рус. Бібліотечка «Квант». М.: Наука, 1990. 240 с. ISBN: 5-02-014087-2

Книга знайомить з історичними подіями, пов'язаними з відкриттям закону Кулона, допомагає краще зрозуміти багато проблем, які виникали у вчених щодо його експериментальної перевірки.

2. А. Н. Матвеев. Том 3. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.

Рекомендується прочитати: §3, в якому описуються експерименти, які доводять існування електричного заряду та встановлюють його властивості та §6, в якому обговорюється точність експериментальних перевірок закону Кулона.

3. Р. Фейнман, Р. Лейтон та М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Рос. 2-е. Т. Выпуск 5. Электричество и магнетизм. М.: Мир, 1977. 306 с.

Рекомендується прочитати: главу 4, в якій в доступній формі описано зв'язок теореми Гаусса та закону Кулона та главу 5, в якій розповідається про точність закону Кулона.

4. С. Г. Калашников. Электричество. Рус. 6-е изд. М.: Физматлит, 2004. 624 с.
ISBN: 5-9221-0312-1

Рекомендується прочитати: главу 2, в якій пояснюється принцип близькодії та вводиться поняття електричного поля, його характеристик та принцип суперпозиції.

5. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Рус. 4-е изд. Т. Том 3. Электричество. 5 т. М.: Физматлит, 2004. 655 с.

Рекомендується прочитати: §§ 3 – 9.

1. Теоретичні відомості

З давніх-давен відоме явище електризації тіл тертям. Якщо потерти скляну або гумову паличку, вона притягуватиме шматочки паперу з силою, яка достатня для подолання їх ваги. Як ми тепер знаємо, завдяки терту паличка набуває електричного заряду. Незважаючи на велику кількість різних речовин, в природі існують тільки два види електричних зарядів: заряди подібні тим, які виникають на склі, потертому об шовк, і заряди, подібні до тих, які з'являються на бурштині, потертому об хутро. Американський вчений Бенджамін Франклін у 1746 р. перший тип зарядів назвав «позитивними», другий — «негативними». В взаємодія двох таких зарядів один з одним подібна до притягування двох мас. Але на відміну від сил тяжіння, сили між двома зарядами можуть носити характер не лише притягування, а і відштовхування. Порівнюючи сили, що діють між різними зарядженими тілами, можна встановити, що однотипні заряди відштовхуються, а різнонайменні притягають один одного. Точний закон взаємодії заряджених тіл було відкрито Шарлем Огюстеном Кулоном¹ в результаті експериментів і формулюється він наступним чином:

Формулювання

Сила взаємодії двох точкових зарядів у вакуумі направлена вздовж прямої, що з'єднує ці заряди, пропорційна добутку їх величин і обернено пропорційна квадрату відстані між ними. Ця сила носить характер притягування, якщо знаки зарядів різні, і відштовхування — якщо ці знаки однакові.

У векторному вигляді закон Кулона записується наступним чином:

$$\vec{F}_{12} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}, \quad (1.1)$$

де \vec{F}_{12} — сила, якою заряд 1 діє на заряд 2; q_1, q_2 — величини зарядів; \vec{r}_{12} — вектор, напрямлений від заряду 1 до заряду 2 і за модулем дорівнює відстані між зарядами; k — коефіцієнт пропорційності, який залежить від вибору системи одиниць.

¹На початку 1770-х років цей закон експериментально відкрив Генрі Кавендіш, однак своїх результатів він не опублікував, і про них стало відомо тільки в кінці XIX ст. після вивчення й публікації його архівів. Натомість Шарль Кулон опублікував закон в двох мемуарах у 1785 році, які представив на розгляд Французької академії наук.

Для того, щоб закон був справедливим, необхідно, щоб виконувались наступні умови:

1. заряди мають бути точковими, тобто відстань між зарядженими тілами повинна бути набагато більша за їх розміри. Однак, на основі теореми Гауса можна довести, що сила взаємодії однорідно заряджених куль дорівнює силі взаємодії еквівалентних точкових зарядів, що розташовуються в центрах цих куль;
2. заряди мають бути нерухомі;
3. заряди мають знаходитись у вакуумі.

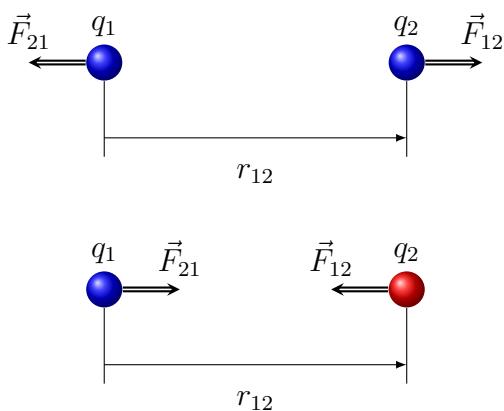


Рис. 1.1

Відкриття закону Кулона вперше дозволило розглядати заряд як певну кількість — вимірювати його. В законі Кулона ми маємо право вибрати одиницю виміру за власним уподобанням і покласти $k = 1$. Так, в системі СГС, одиничний заряд діє на рівний йому заряд на відстані в 1 см з силою в одну дину (дина є сила, яка збільшує швидкість тіла з масою в 1 г на $1 \text{ см}/\text{с}^2$). Одиниця заряду, встановлена таким чином називається *Франкліном* (Фр).

В практичній системі одиниць SI, заряд вимірюють в *Кулонах* (Кл). Кулон є

похідною одиницею системи SI і через основні одиниці Ампер (А) та секунду (с) визначається як $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$. В цій системі одиниць константа в законі Кулона дорівнює значенню $k = 8.9875 \cdot 10^9 \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$. В теорії електромагнітного поля в системі SI цю константу прийнято представляти через іншу константу у вигляді:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (1.2)$$

де $\epsilon_0 = 8.85418782 \cdot 10^{-12} \frac{\text{А}^2 \cdot \text{с}^4}{\text{м}^3 \cdot \text{кг}}$ і називається електричною сталою.

Однією важливою особливістю кулонівської взаємодії є її величина. Електричні сили між окремими елементарними частинками набагато більше гравітаційних. Якби вдалося передати 1% електронів від однієї людини іншій, то на відстані витягнутої руки сила тяжіння між ними перевищувала б вагу Земної кулі. Взаємодія між зарядженими частинками настільки велика, що створити у невеликого тіла дуже великий заряд неможливо. Відштовхуючись один від одного з великою силою, частинки не зможуть утриматися на тілі. Ніяких же інших сил, які були б здатні в даних умовах компенсувати кулонівське відштовхування, в природі не існує. Ось одна з причин, чому помітне притягання та відштовхування заряджених тіл не зустрічається в природі. Крім того, заряджені тіла проявляють дуже велику склонність до нейтралізації. Вони з великою жадібністю вибають заряди протилежного знака, притягаючи їх до себе. Більшість

тіл в природі електрично нейтральні. Втім, сама Земля має негативний заряд близько $-6 \cdot 10^5$ Кл.

У чистому вигляді кулонівські сили працюють головним чином всередині нейтральних атомів. Підкреслимо ще, що знайомство з законом Кулона — це перший конкретний крок в напрямку вивчення властивостей електричного заряду і тим самим в з'ясуванні сенсу самого поняття електричного заряду. Сама ж наявність електричного заряду у елементарних частинок або тіл означає, що вони взаємодіють один з одним за законом Кулона.

Закон Кулона описує взаємодію зарядів з точки зору *далекодії*, тобто взаємодія заряджених тіл відбувається на відстані, без участі будь-якого проміжного матеріального агента². Однак, Фарадей і Максвелл розвинули інший погляд на природу взаємодії зарядів. Вони вважали, що навколо заряду існує електричне поле. На внесений в це поле заряд, воно діє з певною силою, в тій точці, в якій знаходитьться заряд. Тобто Фарадей і Максвелл розвинули теорію *близькодії*, за якою взаємодія тіл відбувається через поле. Сила дії електричного поля на заряд описується виразом:

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad (1.3)$$

де \vec{E} — є характеристикою електричного поля і називається *напруженістю* поля. Для випадку статичних полів, напруженість поля точкового заряду Q , як це випливає з теореми Гаусса (одного з рівнянь Маквелла):

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 4\pi Q \quad (1.4)$$

має вигляд:

$$\vec{E} = \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}. \quad (1.5)$$

Використовуючи (1.3) та (1.5) ми приходимо до закону Кулона:

$$\vec{F} = \frac{qQ}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}.$$

Тобто, фактично ми бачимо, що одна з основних особливостей закону Кулона — обернена пропорційність квадрату відстані $F \propto \frac{1}{r^2}$ — є наслідком теореми Гаусса.

А якщо $F \propto \frac{1}{r^{2+\varepsilon}}$, де показник степені не 2, а відрізняється від нього на дуже малу величину $|\varepsilon| \neq 0$? Порушення «закону обернених квадратів» в законі Кулона призвело б до порушення теореми Гаусса, що в свою чергу призвело б до зміни всієї теорії електромагнітного поля, тому експериментальній перевірці закону Кулона було приділено багато уваги³.

²Детально описуючи ефекти гравітації, Ньютон відмовлявся вказувати на причину, завдяки якій тіла відчувають одне одного на відстані, що вилилось в в його знаменитій фразі «*Hypotheses non fingo*» (Я не вигадую гіпотез)

³Liang-Cheng Tu та Jun Luo. “Experimental tests of Coulomb’s Law and the photon rest mass”. В: *Metrologia* 41.5 (вер. 2004), S136—S146. DOI: [10.1088/0026-1394/41/5/s04](https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/5/s04)

На основі своїх дослідів ще Кулон оцінив, що $|\varepsilon| \leq 4.0 \cdot 10^{-2}$. Подальші перевірки закону Кулона в лабораторних масштабах, які ґрунтувались на вимірюванні різниці потенціалів між концентрично зарядженими сферами⁴, встановили верхню межу для $|\varepsilon| \leq 6.0 \cdot 10^{-17}$ (табл. 1.1).

Що стосується мікроскопічних масштабів, то знамениті експерименти Резерфорда по розсіюванню α -частинок на тонкій металевій фользі показали, що закон Кулона справедливий на відстанях 10^{-11} см (розмір атомного ядра). Сучасні високогенеретичні експерименти з розсіювання електронів та позитронів на ядрах довели, що закон Кулона працює навіть до відстаней 10^{-13} см⁵.

Перевірити справедливість закону Кулона на великих відстанях можна завдяки оцінці маси фотона. Теорія говорить по те, що порушення закону Кулона призвело б то того, що фотон мав би невелику масу, а наявність маси у фотона, в свою чергу, призвело б до деякої залежності швидкості поширення електромагнітних хвиль у вакуумі від довжини хвилі, що дає експериментальну основу для такої оцінки. На сьогодні, така оцінка маси фотона підтверджує справедливість закону Кулона на масштабах до 10^{13} см³.

2. Ідея експериментів та устаткування

В лабораторній роботі пропонується повторити досліди Кулона з крутільними терезами. На відміну від класичних дослідів Кулона, де взаємодіяло два тіла (рис. 1.3), в цій лабораторній роботі використовується лише одне — куля, яка знаходиться поблизу заземленої пластини (рис. 1.4). Замість другого заряду протилежного знака використовується його зображення, яке утворюється завдяки заземленій металевій пластині (рис. 1.2).

Важливо усвідомити, що в якості відстані між зарядами слід брати подвоєну відстань між зарядом та

Таблиця 1.1. Оцінки верхньої межі $|\varepsilon|^3$

| Автори | Рік | $ \varepsilon $ |
|---------------------|------|----------------------|
| Cavendish | 1773 | $2.0 \cdot 10^{-2}$ |
| Coulomb | 1779 | $4.0 \cdot 10^{-2}$ |
| Maxwell | 1892 | $5.0 \cdot 10^{-5}$ |
| Plimpton and Lawton | 1936 | $2.0 \cdot 10^{-9}$ |
| Cochran and Franken | 1967 | $9.2 \cdot 10^{-12}$ |
| Bartlett et al | 1970 | $1.3 \cdot 10^{-13}$ |
| Williams et al | 1971 | $2.7 \cdot 10^{-16}$ |
| Fulcher | 1985 | $1.0 \cdot 10^{-16}$ |
| Crandal et al | 1985 | $6.0 \cdot 10^{-17}$ |

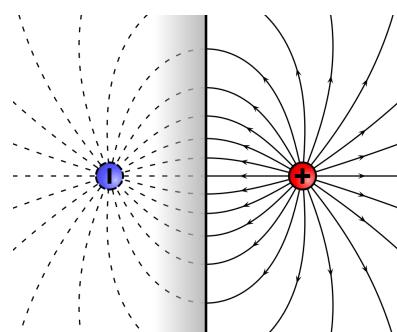


Рис. 1.2. Заряд та його зображення в заземленій металевій пластині

⁴Цікаво, що для встановлення «закону обернених квадратів» саме таким способом користувався Г. Кавендіш. Його робота починається з постановки проблеми «Метою таких експериментів була відповідь на питання: якщо порожниста куля електризується, чи заряджається мала куля, вкладена в першу і з'єднана з нею якимось провідником? Таким чином можна знайти закон електричного тяжіння і відштовхування». Подальші лабораторні перевірки є уdosконаленням самого методу Кавендіша.

⁵V. Breton et al. “High-accuracy comparison of electron and positron scattering from nuclei”. In: *Phys. Rev. Lett.* 66 (5 Feb. 1991), pp. 572–575. DOI: [10.1103/PhysRevLett.66.572](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.572).

Робота 1. Перевірка закону Кулона

металевою пластинкою, а величина заряду-зображення за модулем дорівнює величині заряду кульки.

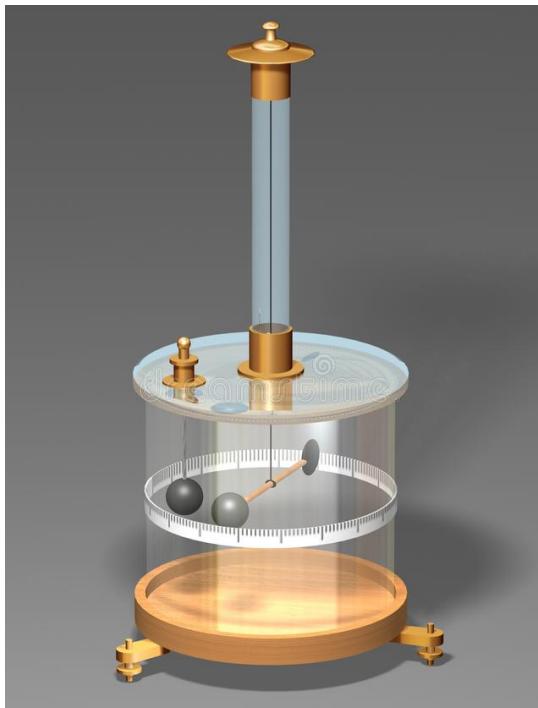


Рис. 1.3. Крутильні терези



Рис. 1.4. Експериментальна установка

В якості крутильних терезів в роботі використовується крутильний динамометр (рис. 1.5), на один край коромисла якого вішається кулька, а на інший — важіль для її врівноваження. Коромисло може обертатися під дією моменту сил навколо вертикальної осі. Кут закрутки фіксується за допомогою шкали. Жорсткість стрічки та плече коромисла підібрані так, що на шкалі одразу зчитується значення діючої сили в мН.

Для надання кульці радіусом $r = 2$ см заряду, її під'єднують за допомогою тонкої дротини до джерела високої напруги (рис. 1.5). Величину заряду в залежності від потенціалу можна знайти за формулою:

$$q = 2.22 \cdot 10^{-12} \cdot \varphi, \quad (1.6)$$

де φ — потенціал.

3. Хід експерименту

1. Зберіть установку. Металеву пластину під'єднайте до клеми « \perp » на джерелі високої напруги.
2. Зніміть залежність сили взаємодії F від квадрату заряду на кульці q^2 для відстані від кульки до пластиини 4 см. Встановлюйте напругу на високовольтному джерелі з кроком 5 кВ і визначайте заряд за формулою (1.6).
3. Повторіть п. 1 для відстаней 5, 6, 7 та 8 см.



Рис. 1.5. Крутильний динамометр



Рис. 1.6. Джерело високовольтної напруги

4. За результатами експериментів побудуйте залежності $F(q^2)$ для різних відстаней. Апроксимуйте залежністю $F = A \cdot (q^2)^{1+\sigma/2}$. Оцініть показник σ для різних відстаней.
5. За результатами експериментів побудуйте залежності $A(1/a^2)$. Апроксимуйте залежністю $A = \frac{k}{4} \cdot (1/a^2)^{1+\varepsilon/2}$. Оцініть показник ε , при якому апроксимація параметру k має найменшу похибку.
6. За результатами апроксимації п. 5 визначте константу пропорційності k в законі Кулона і порівняйте її з табличним значенням.

Контрольні питання

1. Сформулюйте закон Кулона.
2. Дайте означення напруженості електричного поля та потоку вектора напруженості.
3. Сформулюйте принцип суперпозиції для напруженості електричного поля.
4. Що таке лінії напруженості електричного поля? Який принцип їх побудови? Чи можуть вони перетинатись?
5. Сформулюйте теорему Гаусса. Знайдіть за її допомогою поля симетричних тіл.
6. Чому вимірюючи електричне поле в середині заряджених провідників можна довести «закон обернених квадратів»?
7. Чому закон Кулона можна перевіряти для кульок, які не є точковими тілами?

8. Перелічіть основні властивості електричного заряду.
9. Назвіть одиниці вимірювання електричного заряду в системі СГС та SI.
10. Які способи вимірювання електричного заряду ви знаєте?

Розрахункове завдання

1. Один з дослідів Кулона, за допомогою якого він переконався, що сила тяжіння між двома різномінними точковими зарядами обернено пропорційна квадрату відстані між ними, полягав у наступному. У околі маленької зарядженої кульки q_1 підвішувалася на нитці невелика горизонтальна шелакова стрілка, на одному кінці якої було прикріплене невелике електрично заряджене кружальце із золотої фольги q_2 . Момент інерції стрілки I . Вимірювався період малих коливань стрілки T в залежності від її відстані d до зарядженої кульки. Припускаючи справедливим закон Кулона, знайти залежність періоду коливань стрілки від вказаної відстані та від інших параметрів системи. Довжина стрілки l дуже мала в порівнянні з відстанню d .

Робота 2

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.

Ключові слова: Закон Кулона, електричне поле, електричний заряд

Обладнання: штатив, крутильний динамометр, джерело високовольтної на-
пруги, набір металевих кульок, металева пластина.

Рекомендована література

1. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Рус. 4-е изд. Т. Том 3. Электричество. 5 т. М.: Физматлит, 2004. 655 с.
Рекомендується прочитати: §§ 49 – 53, 55, 56.
2. А. Н. Матвеев. Том 3. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.
Рекомендується прочитати: Глава 6, зокрема варто приділити увагу § 39.

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:

$$\vec{p}_m = \frac{1}{2} \int_V \vec{r} \times \vec{j} dV, \quad (2.1)$$

де $\vec{j}dV$ — елемент об'ємного струму. У випадку елемента лінійного струму $I\vec{dl}$ формула (2.1) перетворюється на вираз:

$$\vec{p}_m = \frac{I}{2} \oint_L \vec{r} \times d\vec{l}. \quad (2.2)$$

Використовуючи формулу (2.2) можна знайти момент кільцевого витка зі струмом:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (2.3)$$

де \vec{n} — вектор нормалі до плоскої поверхні витка. Напрямок вектора нормалі співпадає з правилом правого гвинта (рис. 2.1).

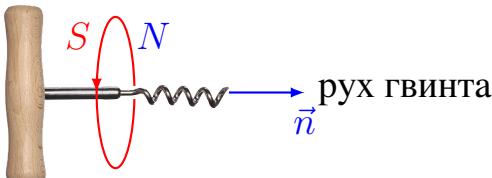


Рис. 2.1. Полюса витка

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

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}. \quad (2.4)$$

Вираз (2.4) є фундаментальним фактом, тобто достовірність має бути перевірена на досліді.

Зокрема, вираз (2.4) дає можливість ввести кількісну характеристику магнітного поля — *вектора індукції*.

Для цього необхідно взяти виток з одиничним магнітним моментом, який ми визначили за формулою (2.3). 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 вимірюємо момент сили, тоді це значення і буде те число, яким ми кількісно охарактеризуємо магнітне поле¹:

$$B = \frac{M}{p_m}. \quad (2.5)$$

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

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2}. \quad (2.6)$$

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)

1.2. Котушки Гельмгольца

Котушки Гельмгольца (кільця Гельмгольца) — пристрій, що складається з двох одинакових тонких соленоїдів, розташованих на одній осі на відстані один від одного, що дорівнює їх радіусам (рис. 2.2) і які з'єднані послідовно таким чином, щоб струм у них циркулював в одинаковому 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 до сфери радіусом $0.3R$, що майже в 4 рази більше ніж для одного кільця. Еліпсоїд трохи стислий уздовж осі (рис. 2.3).

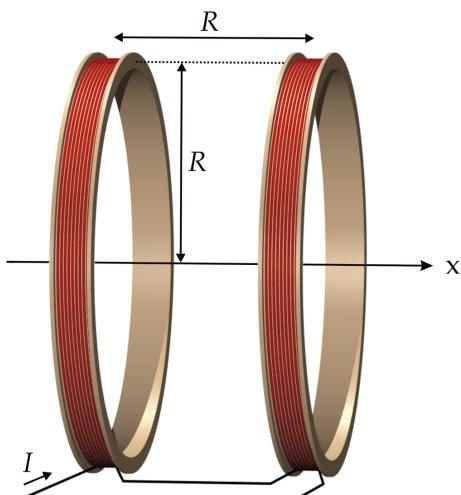


Рис. 2.2. Схема котушок Гельмгольца
(знято з [wikipedia](#))

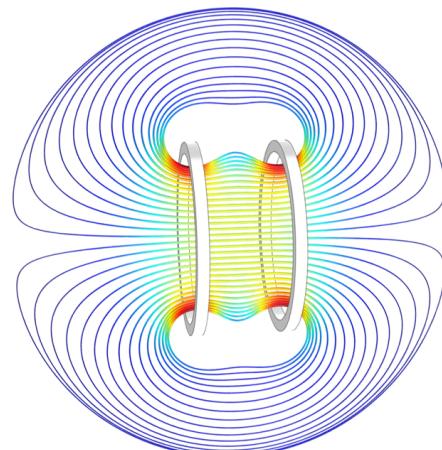


Рис. 2.3. Вигляд поля котушок Гельмгольца (знято з <https://www.freepng.ru/png-d02278/>)

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

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I}{R}. \quad (2.7)$$

Константою котушок називається величина $C = \frac{B}{I}$, яка, як випливає з (2.7) визначається формулою:

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

(2.8)

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

Таблиця 2.1. Параметри котушок

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

станням даних таблиці 2.1 дає значення:

$$C = 6.92 \cdot 10^{-4} \text{ Тл/А.} \quad (2.9)$$

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 (2.3):

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

а обертальний момент згідно (2.4) 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 тебе по ним ($B = CI$, де C — величина, що залежить від параметрів котушок і називається *константою котушок Гельмгольца*) можемо записати:

$$M = \frac{\pi}{4} C I I' N d^2 \sin \alpha. \quad (2.10)$$

3. Експериментальне устаткування

Експериментальне устаткування (рис. 2.4) складається з котушок Гельмгольца, крутильних терезів (моментометру) з пристроєм для утримання електричного контура, двох стабілізованих джерел живлення (рис. 2.5), двох амперметрів і набору контурів. Обладнання слід збирати так, як показано на схемі рис. 2.6. 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.

В даній лабораторній роботі використовуються котушки Гельмгольца, параметри яких подані в табл. 2.1.

Розраховане значення константи котушок за формулою (2.8) з викори-

Робота 2. Магнітний момент у магнітному полі



Рис. 2.4. Експериментальна установка



Рис. 2.5. Джерело живлення

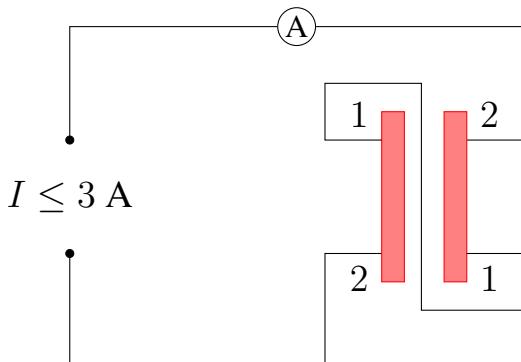


Рис. 2.6. Схема з'єднання котушок

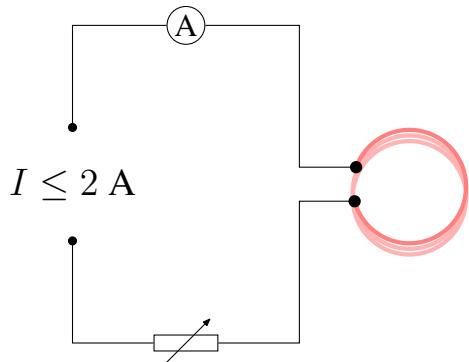


Рис. 2.7. Схема з'єднання контура

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

- Збираємо лабораторну установку (рис. 2.4). Одне джерело струму (рис. 2.5) через амперметр приєднується до котушок Гельмгольца (рис. 2.6), інше — до контуру (рис. 2.7). 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.
- 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 $I = 3 \text{ A}$ через котушки Гельмгольца і кут $\alpha = 90^\circ$.
- Дослід 2.** Зніміть залежність обертального моменту M від сили струму в через котушки Гельмгольца I . Для цього використовуйте найбільший за діаметром контур з найбільшим числом витків N . Встановіть найбільший струм $I' = 2 \text{ A}$ через контур і кут $\alpha = 90^\circ$.

4. **Дослід 3.** Зніміть залежність обертального момента 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 момента M від квадрату діаметру петлі d^2 . 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 та кут $\alpha = 90^\circ$.
6. **Дослід 5.** Зніміть залежність обертального момента 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

1. За результатами дослідів 1 – 5 побудуйте графіки залежності обертального момента від усіх досліджуваних параметрів:
 - Для досліду 1 — $M = M(I')$;
 - Для досліду 2 — $M = M(I)$;
 - Для досліду 3 — $M = M(\sin \alpha)$;
 - Для досліду 4 — $M = M(d^2)$;
 - Для досліду 5 — $M = M(N)$;
2. З лінійної апроксимації відповідних залежностей для кожного досліду, визначте константу котушок Гельмгольца, використовуючи формулу (2.10).
3. Порівняйте отримані значення з таким, що розрахованій за законом Біо-Савара-Лапласа (2.9).

Контрольні запитання

1. Що таке магнітна індукція та одиниці її вимірювання в SI та СГС? Як визначається напрямок вектора \vec{B} ? Що таке лінії магнітної індукції?
2. Що таке вектор \vec{H} та одиниці його вимірювання в SI та СГС?
3. Що таке магнітний диполь? Чим він характеризується? Наведіть приклади.
4. Як розрахувати магнітний момент контура зі струмом?
5. Як визначається магнітне поле магнітного диполя.
6. У чому полягає закон Біо-Савара-Лапласа? Яка магнітна індукція поля, створюваного елементом струму?
7. Як виглядають лінії магнітної індукції поля витка зі струмом?

8. Які сили діють на контур зі струмом в однорідному магнітному полі? Як розрахувати величину крутного моменту цих сил?

Розрахункові завдання

1. Розрахуйте магнітну індукцію поля на осі кругового витка зі струмом в його центрі і на відстані r від центру?
2. 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 ?

Робота 3

Вимірювання магнітного поля Землі

Мета роботи

Експериментально визначити горизонтальну і вертикальну складові, а також магнітне нахилення місцевого геомагнітного поля.

Ключові слова: *ертер*

Обладнання: *штатив, крутільний динамометр, джерело високовольтної напруги, набір металевих кульок, металева пластина.*

1. Теоретичне підґрунтя

1.1. Земний магнетизм

Про існування магнетизму було відомо з глибокої давнини. Вважається, що перший компас з'явився в Китаї. У 1600 році в книзі «Про магніті, магнітних тілах і про великий магніт — Землю» У. Гільбертом було дано уявлення про причини земного магнетизму. У 1785 почалися розробки способу вимірювання напруженості магнітного поля, що базується на методі крутного моменту, запропонованому Ш. Кулоном. У 1839 К. Гаусс теоретично обґрунтував метод вимірювання горизонтальної складової вектора магнітного поля планети. На початку ХХ ст. було визначено зв'язок між магнітним полем Землі і її будовою.

Однак, факт існування цього загадкового фізичного явища природи для сучасної науки як і раніше багато в чому неясний. Вже з середини ХХ століття загальноприйнято, що походження геомагнітного поля і основні чинники його еволюції пов'язані з процесами в рідкому зовнішньому ядрі Землі. Причина подібної впевненості полягає в наступному. Сукупність спостережних даних про магнітне поле Землі переконує нас в тому, що воно має планетарний характер і його джерела повинні знаходитися глибоко під поверхнею Землі.

Спроба пов'язати таке магнітне поле з величезним постійним магнітом входить в протиріччя з помітним зростанням температури вглиб Землі. Справді, феромагнітні властивості зникають при досягненні критичної температури, яка називається *точкою Кюрі*, та й сам образ гіантського постійного магніту десь в глибині Землі не виглядає реалістичним.

Ще одним джерелом магнітного поля Землі в принципі міг би служити

розділ зарядів, в результаті якого область між земною поверхнею і іоносфорою являє собою гіантський конденсатор. Обертання Землі призводить до руху заряду цього конденсатора і електричний струм, який виникає таким чином, створює магнітне поле. Однак оцінки показують, що його напруженість набагато нижча ніж та, що спостерігається.

Ще одна з причин походження магнітного поля Землі може бути пов'язана з явищем електромагнітної індукції Фарадея. Цей механізм генерації магнітного поля називається *механізмом динамо*. Вперше механізм динамо був запропонований на початку ХХ століття Дж. Лармором для пояснення походження магнітного поля Сонця. Пізніше з дією цього механізму стали пов'язувати походження магнітних полів майже всіх небесних тіл, що мають магнітне поле. Суть механізму динамо зазвичай пояснюють як створення магнітного поля завдяки руху електропровідної рідини (плазми). Однак, пояснити походження геомагнітного поля механізмом динамо теж непросто. Справа в відомому правилі Ленца, згідно з яким додатковий струм, який з'являється в рамці зі струмом, що рухається в початковому (затравочному) магнітному полі, направлений таким чином, щоб зменшити затравочне магнітне поле. Іншими словами, обертання потоків провідної рідини не може призводити до самозбудження магнітного поля.

Вказати конкретний реалістичний механізм, який призводить до підсилення затравочного магнітного поля в результаті дії електромагнітної індукції, вдалося лише в 50-60 рр. ХХ ст. Ганнесом Альвеном. Суть ідеї полягає в тому, що магнітне поле у вакуумі, яке створюється електричним струмом, перпендикулярно до цього струму. Однак виявилося, що магнітне поле в хаотичному, турбулентному або конвективному потоці, усереднене по пульсаціям цього потоку, набуває компоненти, паралельної до електричного струму. Якщо спочатку у нас заряджена рідина, що диференціально обертається (різні частини повертаються навколо загальної осі обертання з різною кутовою швидкістю) створює «звичайне» магнітне поле перпендикулярне до струму, то згодом рідина буде захоплювати магнітне поле і витягувати його вздовж напряму свого руху, утворюючи тороїдальні силові лінії. Цей механізм створення тороїдального поля відомий як *омега-ефект*.

1.2. Виміри

Основні виміри побудовані на принципі **іmplікації постійного поля**, величина і напрям якого відомі, на невідоме магнітне поле Землі. Горизонтальна компонента магнітного поля Землі ${}^h\vec{B}_E$ розраховується із напряму результуючої магнітної індукції ${}^h\vec{B}_R$:

$$\vec{B}_R = \vec{B}_H + \vec{B}_E \quad (3.1)$$

Індикатором напряму результуючої **магнітної індукції** виступить магнітна стрілка з лімбом. Стрілку потрібно встановити за напрямом горизонтальної

компоненти ${}^h\vec{B}_E$ магнітного поля Землі.

Нехай забезпечено додаткове однорідне поле ${}^h\vec{B}_H$. Стрілка відхиляється на кут α і показуватиме напрям горизонтальної компоненти результуючого поля ${}^h\vec{B}_R$ (рис. 3.1).

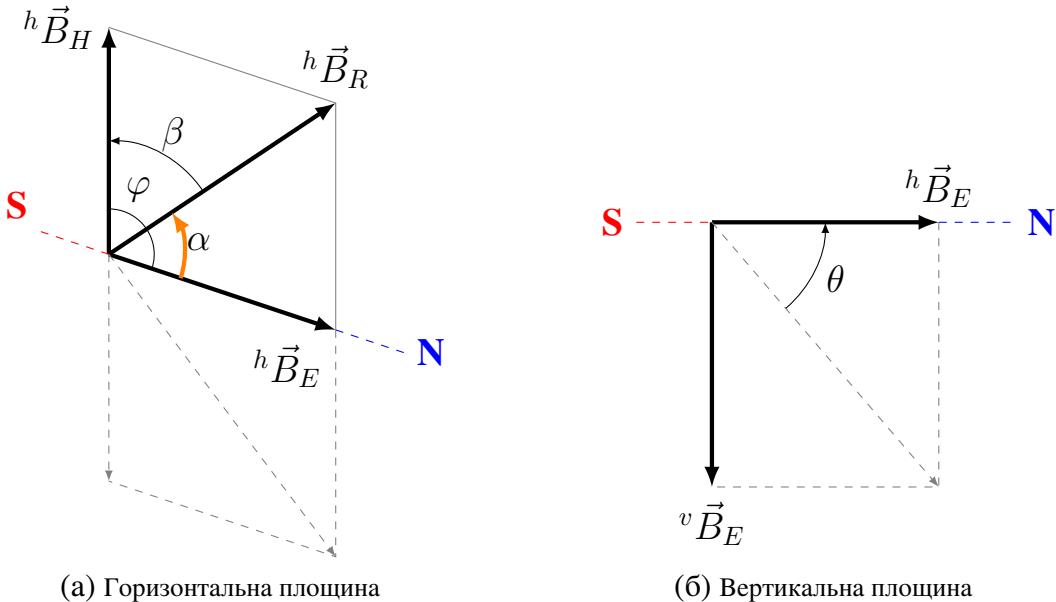


Рис. 3.1. Векторна діаграма складових магнітного поля у горизонтальній (а) та вертикальній (б) площах. Компоненти, зображені штриховими лініями, відповідають випадку зміни полярності додаткового поля ${}^h\vec{B}_H$ (зміни напряму струму).

З теореми синусів маємо:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\varphi - \alpha)} = \frac{{}^h\vec{B}_H}{{}^h\vec{B}_E} \quad (3.2)$$

Для спрощення розрахунків розглядається випадок, коли вісь котушок перпендикулярна до напряму “Північ – Півден” ($\varphi = 90^\circ$):

$${}^h\vec{B}_E = {}^h\vec{B}_H \cdot \operatorname{ctg} \alpha \quad (3.3)$$

Поле ${}^h\vec{B}_H$ пропорційно силі струму I_H :

$${}^h\vec{B}_H = C \cdot I_H, \quad (3.4)$$

де C — калібровочний коефіцієнт; залежить від конфігурації котушки.

Тоді з рівнянь (3.2), (3.4) маємо:

$${}^h\vec{B}_E \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = C \cdot I_H. \quad (3.5)$$

В експерименті визначається залежність $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ від $C \cdot I_H$, — вона має бути лінійною. З нахилу графіка цієї залежності безпосередньо визначається величина,

обернена до горизонтальної складової магнітного поля Землі $(^h\vec{B}_E)^{-1}$:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{^h\vec{B}_E} \cdot C \cdot I_H. \quad (3.6)$$

Якщо стрілку з лімбом встановити в вертикальній площині, можна безпосередньо заміряти кут θ (рис. 3.1б), з якого розрахувати вертикальну компоненту магнітного поля Землі $^h\vec{B}_E$ та сумарну індукцію B_E :

$$^v\vec{B}_E = ^h\vec{B}_E \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (3.7)$$

$$B_E = \sqrt{^h\vec{B}_E^2 + ^v\vec{B}_E^2} \quad (3.8)$$

2. Експериментальне устаткування

Схема експериментальної установки зображена на рисунку 3.2.

Котушки Гельмгольца з'єднані послідовно і підключенні до джерела постійного струму через реостат та амперметр.

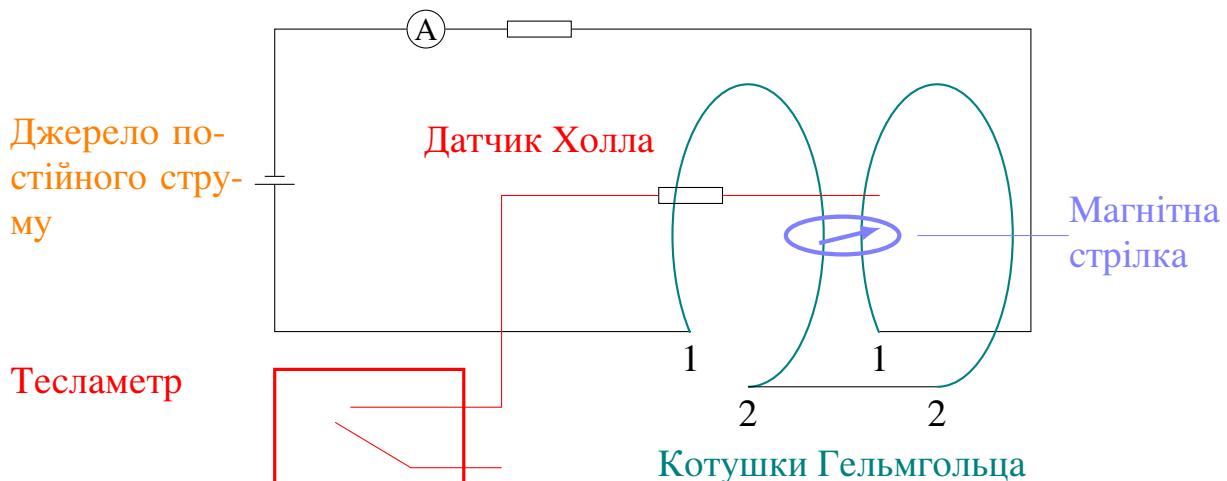


Рис. 3.2. Схема експериментальної установки: котушки Гельмгольца, джерело постійного струму, реостат, амперметр з'єднані послідовно. Для вимірювання магнітного поля – теслометр з датчиком Холла. Для вимірювання компонент магнітного поля Землі – магнітометр з магнітною стрілкою та лімбом (на схемі – магнітна стрілка).

Магнітне поле вимірюється теслометром з датчиком Холла, який фіксує компоненту магнітної індукції, що паралельна осі датчика.

Важливо, щоб його напрям співпадав з напрямком осей котушок. Щуп датчика встановлюється точно всередині пристрою Гельмгольца.

Чутливості теслометра не вистачає для вимірювання полей з індукцією порядка поля Землі. Тому прилад застосовується для визначення калібровочного коефіцієнту C , який отримують з графіка залежності горизонтальної компоненти магнітної індукції $^h\vec{B}_H$ від струму I_H котушок (3.4).

Для вимірювання горизонтальної компоненти магнітного поля Землі $^h\vec{B}_E$ використовується магнітометр з магнітною стрілкою, який має лімб з поділами, і

може встановлюватись уздовж проекції лінії індукції результуючого магнітного поля \vec{B}_R на площину обертання стрілки.

В роботі вивчають залежність кута α від індукції поля катушок ${}^h\vec{B}_H$ за малих струмів, де α – кут відхилення магнітної стрілки від її положення рівноваги.

Індукцію поля катушок ${}^h\vec{B}_H$ визначають з сили струму I_H через катушки за допомогою калібровочного коефіцієнту K .

3. Хід роботи

3.1. Залежність ${}^h\vec{B}_H$ від I_H

Встановлюємо датчик Холла всередині пристрою Гельмгольца, точно по центру. До початку вимірювань знімаємо покази теслометра, які слугуватимуть нульовим рівнем для наших даних.

Знімаємо залежність горизонтальної компоненти магнітної індукції ${}^h\vec{B}_H$ від струму I_H катушок. Діапазон зміни струму – від 0 до 2 А.

3.2. Залежність α від I_H

Замість датчика Холла за допомогою штативу встановлюємо магнітометр з магнітною стрічкою так, щоб центр лімбу знаходився точно в центрі пристрою Гельмгольца, а сам лімб був розташований точно в горизонтальній площині.

Визначаємо напрямок “Північ–Південь” на кільці з поділками за відсутності струму у катушках (рис. 3.3а). Для більш докладного визначення напряму стрілку треба легко відхилити від положення рівноваги кілька разів. *Можлива сила тертя (що досить мала) може бути зменшена легким постукуванням по штативу.*

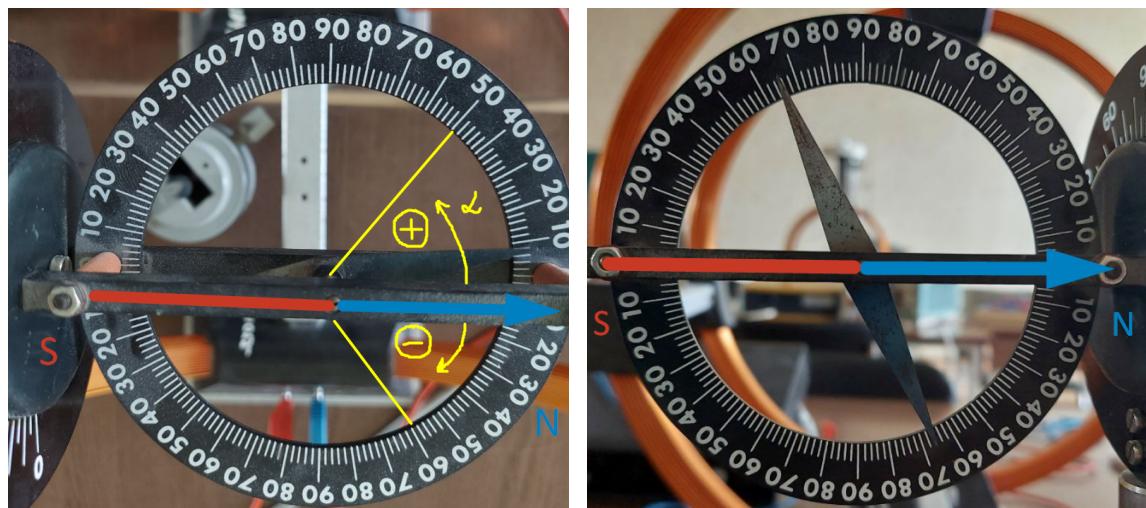
Проводимо вимірювання кута відхилення магнітної стрілки від положення рівноваги (напрямку “Північ–Південь” цієї стрілки) як функції малих струмів у катушці. Повторюємо серію вимірювань після зміни напрямку струму в катушці на протилежний.

При вимірюванні точного кута повинні бути зафіксовані показання обох кінців стрілки.

3.3. Виміри θ

За відсутності струму катушок лімб магнітометра повертаємо у вертикальну площину так, щоб магнітна стрілка вказувала кут нахилу. Вісь обертання має співпадати з напрямком “Північ–Південь” (рис. 3.3б). З метою перевірки магнітометр повертаємо на 180° і повторюємо виміри.

Робота 3. Вимірювання магнітного поля Землі



(а) Горизонтальна площа

(б) Вертикальна площа

Рис. 3.3. Магнітометр та напрямок “Північ–Південь”

4. Завдання

5. Контрольні запитання

6. Розрахункові завдання