

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

Н.О.Якуніна, О.В.Козленко

ФІЗИКА-2. ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА 2 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний
посібник для студентів закладів вищої освіти, які навчаються
за спеціальністю «Інформаційні системи та технології»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

УДК 537.8
ББК 22.33

Ф 48

Рецензент: В.Й Котовський завідувач кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського, доктор т.н., професор

Відповідальний редактор: В.М. Локтев В.М академік НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № від . .2021 р.)
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № від . 2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Якуніна Наталія Олександрівна, доцент кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського, к.ф.-м. наук, доцент,

Козленко Олег Володимирович, асистент кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Ф 48 Фізика-1. Загальна Фізика 1. Лабораторний практикум . Навч. посібник / Н.О. Якуніна, О.В.Козленко – К. : Вид-во «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 16 с.

У лабораторному практикумі представлені теоретичні відомості, опис лабораторної роботи з теми «Вивчення магнітного поля Землі», що викладається для майбутніх фахівців за спеціальністю «Інформаційні системи та технології», наведені методичні вказівки до виконання цієї роботи, містяться контрольні питання для самостійної роботи та підготовки до модульного контролю.

Посібник призначений для студентів, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «загальна фізика» з циклу математичної та природничо-наукової підготовки за спеціальністю «Інформаційні системи та технології».

Посібник може бути корисним для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт та модульних контрольних робіт з навчальної дисципліни «Фізика-2. Загальна Фізика 2».

© Н.О. Якуніна, О.В.Козленко, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

Мета роботи:

1. Познайомитися з елементами магнітного поля Землі
2. Розглянути взаємодію провідників зі струмом та магнітним полем.
3. Виміряти горизонтальну складову напруженості магнітного поля Землі на широті міста Київ.

Теоретичні відомості

Вік планети Земля складає близько 4,5 мільярдів років, при цьому вважається, що її геомагнітне поле явно існувало останні 3 мільярди років. Магнітне поле Землі невідчутно для людини, але тим не менш воно впливає на хімічні і біологічні процеси, стан людського організму, захищає біосферу від згубного впливу космічних частинок і керує міграційними процесами в тваринному світі. Магнітне поле підтримує технічні системи навігації та супутникового зв'язку. Вивчення його має надзвичайно важливе практичне і наукове значення. Точне знання складових магнітного поля Землі грає дуже важливу роль в навігації, при пошуках родовищ залізної руди та інших корисних копалин.

Магнітне поле Землі звуть геомагнітним, так як вважається, що відповідають за його походження процеси, які протікають в геологічних глибинах планети. На сьогоднішній день загальноприйнятим і найбільш вірогідним поясненням походження магнітного поля Землі та інших планет є динамо-механізм, заснований на генерації електричного струму в провіднику при його русі в магнітному полі, що породжується і підсилюється самими цими струмами.

Принцип роботи земного генератора такий же, як і звичайного електричного: він перетворює кінетичну енергію своїх часток в електромагнітне поле: у випадку

електрогенератора Принцип роботи земного генератора такий же, як і рух відбувається в витках котушки, а у випадку планети або зірки - в провідній рідкій субстанції.

Генератор магнітного поля Землі складається з твердого внутрішнього ядра, яке є енергетичним джерелом (рис.1). На рис.1 показані: внутрішнє ядро (червоним) і зовнішнє ядро (помаранчеве) Землі, лінії магнітного поля (білі лінії), потоки металів (сині лінії), викликані обертанням ядра.

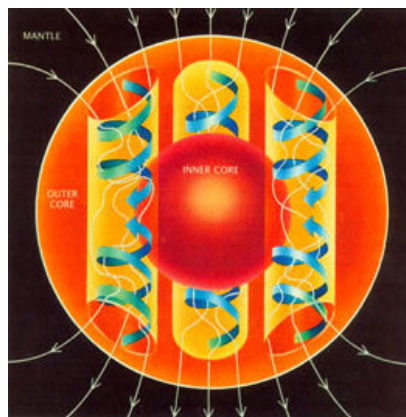


Рис.1

Внутрішнє ядро Землі тверде, хоча і має температуру порядку 10 тисяч кельвінів. Така температура генерується завдяки розпаду радіоактивних елементів та звільненню прихованої теплоти, яка з'являється при затвердінні речовини на кордоні між внутрішнім і менш гарячим зовнішнім ядром.

В рідкому зовнішньому ядрі створюються конвективні потоки - переміщення маси заліза (рис.1). Вони відводять тепло від твердого внутрішнього ядра назовні. Ці потоки закручуються в спіралі, так звані стовпи Тейлора, через те, що Земля обертається і на потоки заліза діють коріолісові сили. Завдяки тертю шарів потоки металу набувають електричного заряду, формуючи конвективні контурні струми. Таким чином створюється система струмів (рис.2). Конвективні струми течуть в деякому початковому магнітному полі, створюючи при цьому своє власне. Це додаткове поле підсилює первинне, за рахунок чого струм знову посилюється. Така конфігурація створює самопідтримуючу систему.

Зростання струму, безперечно, не нескінченне, бо зростання струму провокує зростання джоулевих втрат. В результаті настає баланс втрат і притоків енергії. Така система дозволяє планеті демонструвати відносно стійке магнітне поле протягом тисячоліть.

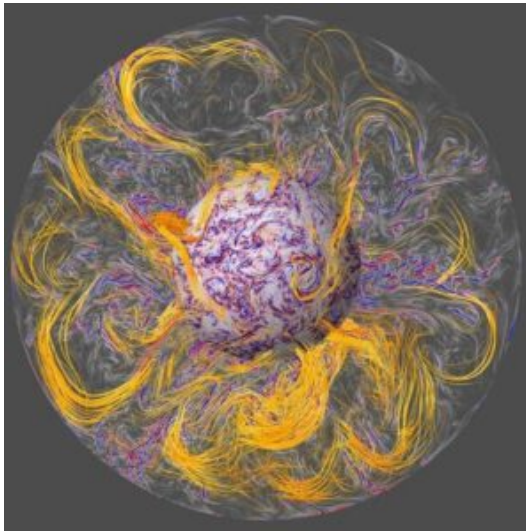


Рис.2

Магнітне поле всередині ядра Землі – комп'ютерне моделювання.

Джерело: AUBERT ETAL./
IPGP/CNRS PHOTO LIBRARY

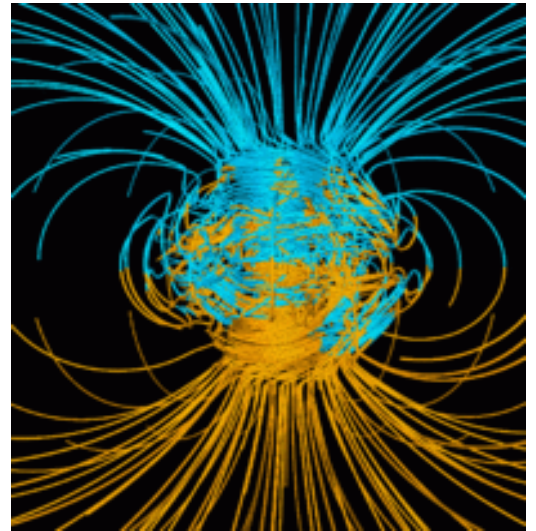


Рис.3

Комп'ютерне моделювання геомагнітного поля. На поверхні Землі більша частина ліній магнітного поля виходять (жовті лінії) у Південного полюса і входять (блакитні лінії) в середину близько Північного.

Повне власне магнітне поле Землі (геомагнітне поле) можна розділити на такі основні частини:

- головне поле, джерело якого знаходиться усередині Землі, в рідкому зовнішньому ядрі;

- поля світових аномалій, які пов'язані з наявністю намагнічених порід в корі, розташованих близько до поверхні;

-зовнішнє магнітне поле, яке визначається джерелами у вигляді струмових систем, що знаходяться за межами земної поверхні, в її атмосфері .

Порівняння картин магнітних силових ліній, створених на основі комп'ютерної моделі геодінамо (рис.2 та рис. 3), показує, наскільки структура магнітного поля Землі простіше за її межами, ніж усередині ядра (сплутані трубочки в центрі).

Магнітне поле Землі, як и будь-яке інше магнітне поле, у кожній точці простору характеризується вектором напруженості $\vec{H}$ магнітного поля або вектором магнітної індукції $\vec{B}$.

Лінії напруженості магнітного поля виходять приблизно з центру Землі через південну півкулю і, обігнувши Землю, повертаються до її центру через Північну півкулю (рис. 4).

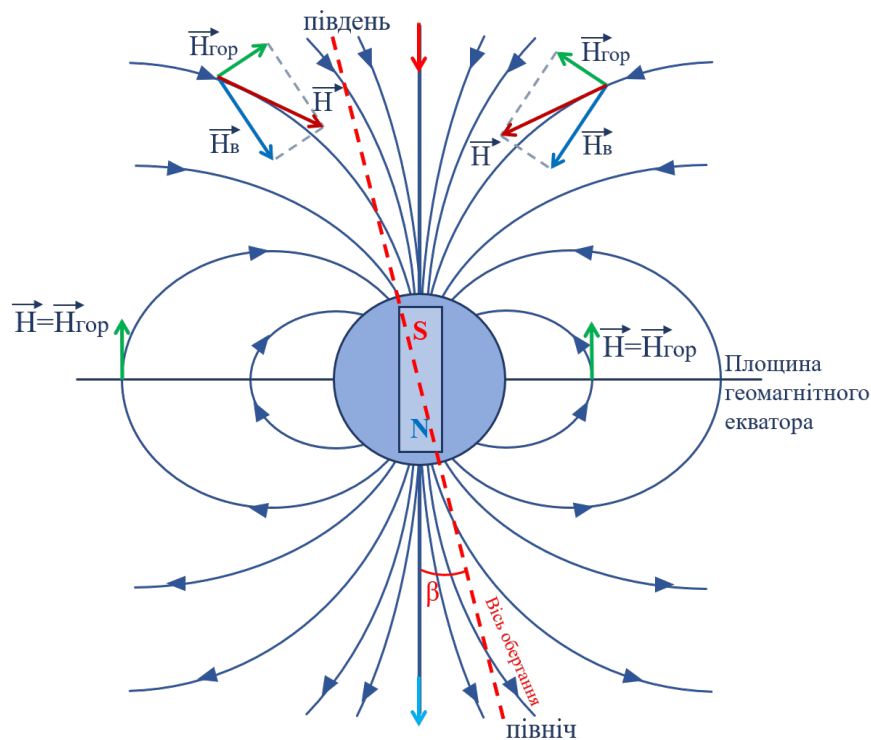


Рис.4

Магнітне поле Землі на магнітному екваторі направлено горизонтально, а у магнітних полюсів вертикально. В інших точках земної поверхні магнітне поле

Землі направлено під деяким кутом до горизонту (точка K). Величину проекції напруженості $\vec{H}$ (індукції $\vec{B}$) земного магнітного поля на горизонтальну площину називають горизонтальною складовою магнітного поля Землі $H_{\text{гор}}$ ($B_{\text{гор}}$). Напрямок цієї складової береться за **напрямок магнітного меридіана**, а вертикальну площину, що проходить через нього, називається площиною магнітного меридіана.

Кут α між напрямком магнітного поля Землі і горизонтом називають **кутом нахила**, а кут β між географічним і магнітним меридіаном – **кутом схилення**.

Магнітні та географічні полюси Землі не збігаються один з одним (рис.5). Південний магнітний полюс знаходиться поблизу північного географічного полюса поблизу північного берега озера Вікторія (Канада). Північний магнітний полюс знаходиться поблизу південного географічного полюса поблизу берегів Антарктиди.

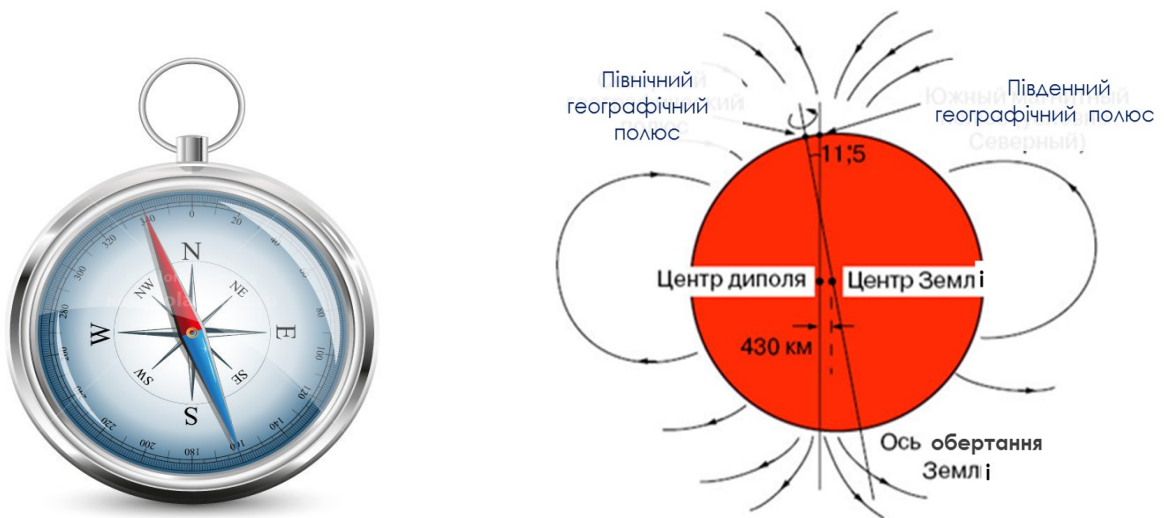


Рис.5

Складну картину магнітного поля Землі в першому наближенні можна уявити полем однорідної намагніченої кулі, магнітний момент якої спрямований під кутом $\beta = 11,5^\circ$, до осі обертання Землі.

Метою цієї роботи є вивчення магнітного поля Землі, а саме визначення його горизонтальної складової.

Методика вимірювання

Якщо магнітна стрілка може вільно обертатися лише навколо вертикальної осі, то вона буде встановлюватися під дією горизонтальної складової магнітного поля Землі в площині магнітного меридіана (рис.6). Така властивість магнітної

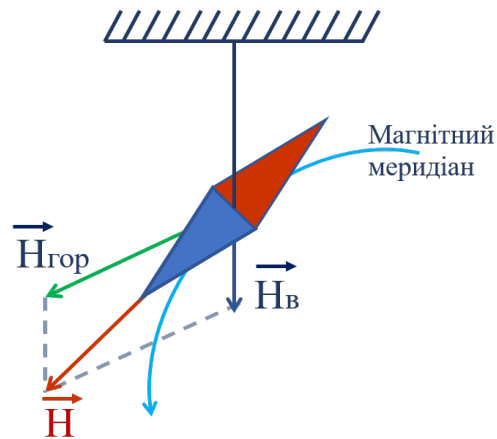


Рис.6

стрілки використовують в приборі, який використовується в даній роботі для визначення $H_{\text{гор}}$ ($B_{\text{гор}}$). Цей прибор має назву тангенс-гальванометр.

Основним елементом тангенс-гальванометра є плоска вертикальна котушка радіусу r з деяким числом витків n .

При протіканні струму по вітку котушки в її центрі виникає магнітне поле. Індукцію поля можна знайти за законом Біо-Савара-Лапласа: індукція магнітного поля, що створюється елементом струму $Id\vec{l}$ в точці O (рис.7), на відстані r від нього, пропорційна величині елемента струму і синусу кута α між напрямками елемента струму $Id\vec{l}$ та $\vec{r}$ та обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}\vec{r}]}{r^3}; \quad \text{або} \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2},$$

де μ_0 – магнітна стала, $d\vec{l}$ – вектор елемента довжини провідника, проведений у напрямку струму; $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений з середини елемента струму в точку, в якій визначається $d\vec{B}$.

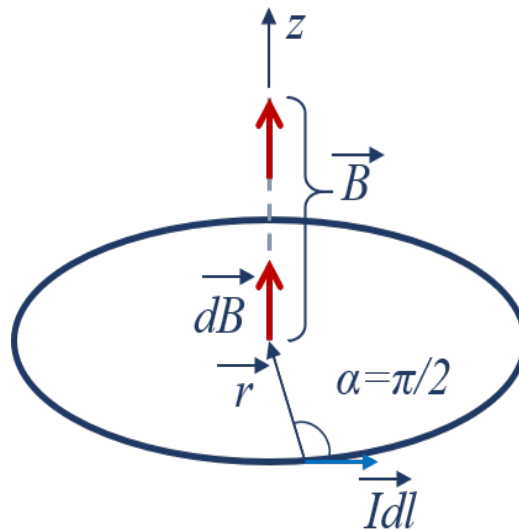


Рис.7

Відстань від всіх елементів провідника зі струмом до центру кола однакова r , а $\sin \theta = 1$ (рис.7), тому $dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2}$.

Напрямок магнітного поля, що створює прямолінійний елемент струму Idl знаходимо за правилом правого гвинта: якщо поступальний рух гвинта з правою нарізкою збігається з напрямом струму, то напрям магнітного поля збігається з напрямом руху ручки гвинта.

Всі елементи струму Idl створюють магнітне поле однакового спрямування, перпендикулярне до площини витка, і тому повна індукція поля в центрі одного кругового витка дорівнює: $B = \int_0^B dB = \int_0^{2\pi r} \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2} = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}$.

А n витків зі струмом створюють у центрі кола магнітне поле з індукцією $B_{\text{заг}} = n \frac{\mu\mu_0 I}{2r}$ та напруженістю

$$H_{\text{заг}} = \frac{B_{\text{заг}}}{\mu\mu_0} = \frac{nI}{2r} \quad (1)$$

Якщо струм у котушці відсутній, то стрілка компаса під дією горизонтальної складової магнітного поля Землі $\vec{H}_{\text{гор}}$ встановлюється в площині магнітного

меридіана. Якщо за допомогою кругових струмів котушки створити ще одне магнітне поле $\vec{H}_{\text{заг}}$, то стрілка встановиться у напрямку рівнодіючої обох магнітних полів. Відповідно до принципу суперпозиції: $\vec{H} = \vec{H}_{\text{заг}} + \vec{H}_{\text{гор}}$.

При виконанні роботи поворотом котушки близько вертикальної осі намагаються сумістити площину котушки з площиною магнітного меридіана. Якщо по котушці пропустити струм I , то виникає магнітне поле з напруженістю $\vec{H}$, спрямоване перпендикулярно до площини котушки. Таким чином, на магнітну стрілку діятимуть два взаємно перпендикулярних магнітних поля: магнітне поле

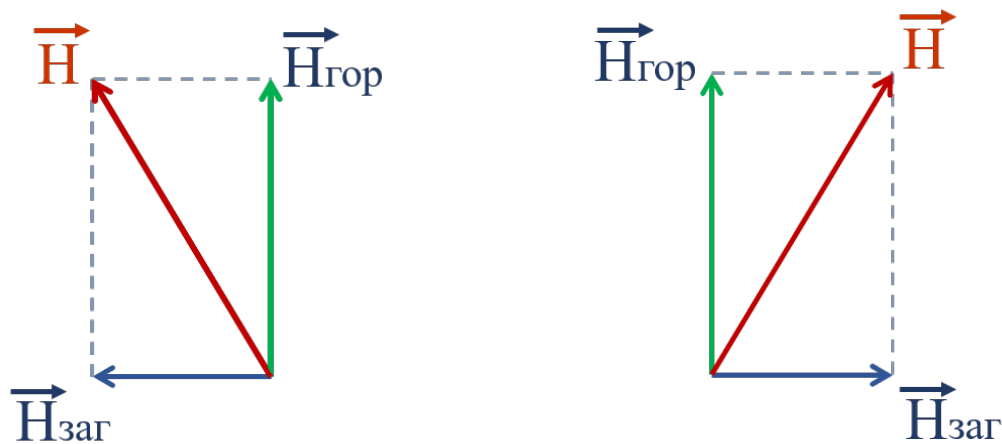


Рис.8

Землі і магнітне поле струму. Напруженості обох полів взаємно перпендикулярні. На рис.8 зображено перетин котушки горизонтальної площиною: $\vec{H}_{\text{заг}}$ – вектор напруженості поля, створеного n круговими струмами котушки, $\vec{H}_{\text{гор}}$ – горизонтальна складова напруженості магнітного поля Землі. Стрілка встановлюється у напрямку рівнодіючої, тобто по діагоналі паралелограма, сторонами якого будуть вектор напруженості магнітного поля кругового струму $\vec{H}_{\text{заг}}$ і $\vec{H}_{\text{гор}}$.

У відповідності з рисунком $\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_{\text{заг}}}{H_{\text{гор}}}$, тоді

$$H = H_{\text{гор}} \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

Але одночасно з тим виконується (1), тому

$$H_{\text{гор}} \operatorname{tg} \alpha = \frac{nI}{2r}.$$

Звідки
$$H_{\text{гор}} = \frac{nI}{2r \operatorname{tg} \alpha} \quad (3)$$

Горизонтальна складова магнітного поля є однією з основних характеристик магнітного поля Землі. Її значення можна обчислити через кут відхилення магнітної стрілки тангенс-гальванометра.

Вимірювання та обробка результаті вимірювань

Тангенс-гальванометр - прилад, що складається з короткої по довжині котушки індуктивності радіусу r , яка має n витків, і компаса або рухомої магнітної стрілки, вертикальна вісь якої закріплена в геометричному центрі котушки (рис.9).

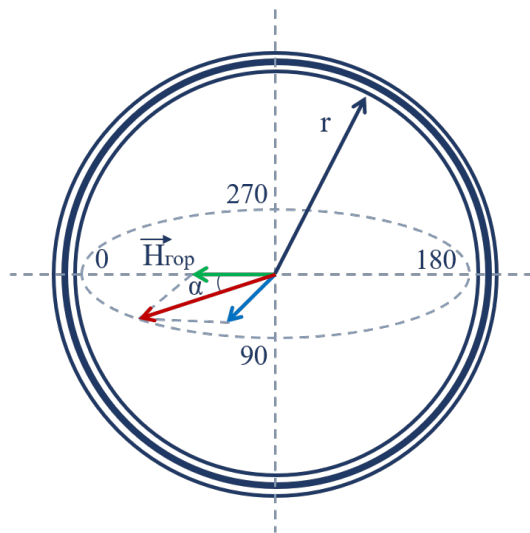


Рис.9

Магнітна стрілка може обертатися тільки навколо вертикальної осі. Під дією магнітного поля Землі стрілка займає положення стійкої рівноваги, розташовуючись в площині магнітного меридіана. Якщо в цій же площині

розташувати витки тангенс-гальванометра і включити струм через витки, то з'явиться магнітне поле струму $\vec{H}_{\text{заг}}$, напрямок вектора напруженості якого виявиться перпендикулярним напрямку вектора $\vec{H}_{\text{гор}}$.

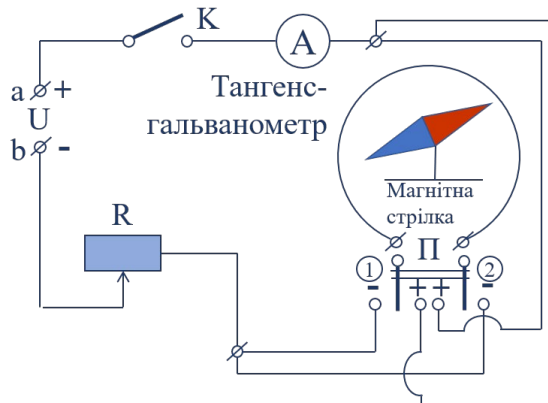


Рис.10

Принципова схема установки.

На схемі установки (рис.10): а, b – клеми джерела живлення; К - вимикач джерела живлення; А - амперметр джерела, контролюючий струм у витках котушки тангенс-гальванометра; R - опір реостата джерела живлення; П - двополюсний перемикач, що дозволяє змінювати напрямок струму в витках котушки тангенс-гальванометра; Т- тангенс-гальванометр, що складається з короткої по довжині котушки і магнітної стрілки, яка вільно обертається в центрі котушки.

Послідовність вимірів:

1. Повертаючи підставку тангенс-гальванометра і компаса, встановіть площину котушки тангенс-гальванометра в площині магнітного меридіана так, щоб один кінець магнітної стрілки компаса співпадав з «0».
2. Встановіть підставку тангенс-гальванометра в горизонтальне положення і, відповідно, котушку тангенс-гальванометра у вертикальній площині магнітного меридіана, використовуючи регулювальні гвинти на підставці.
3. Запишіть в табл.1 кількість витків котушки n та радіус витків r .

4. Увімкніть перемикач П в положення І, щоб задати один з напрямків струму в котушці. Переміщенням повзунка реостата встановіть задану викладачем силу струму I_1 в котушці тангенс-гальванометра. (Значення сили струму І задається викладачем і може лежати в інтервалі 0,15 - 0,25 А).

5. При заданій силі струму визначте кут відхилення магнітної стрілки α_1

6. Не змінюючи силу струму змініть напрямок струму: для цього перемикніть перемикач П з положення І в положення ІІ. Визначте кут відхилення магнітної стрілки α_2 .

7. Знайдіть середнє значення кута відхилення при протіканні струма ІІ.

8. За формулою (3) розрахуйте значення $H_{\text{гор1}}$. Для знаходження $\text{tg } \alpha$ скористайтесь додатком 1.

Таблиця 1

№	I_i	α_1	α_2	$\langle \alpha \rangle$	$\text{tg} \langle \alpha \rangle$	H_i	$\langle H \rangle$	ΔH	$\langle B \rangle$	ΔB																
1																										
2																										
3																										
4																										
5																										

9. Змінюючи струм з заданим викладачем кроком (якщо викладач не скаже інакше, то вважати кроком, з яким змінюється струм, 0,2 А) виконайте виміри пунктів 5-9 ще три рази.

Дані вимірювань занесіть в табл.1.

10. Розрахуйте середнє значення горизонтальної складової магнітного поля Землі $H_{\text{гор}}$ та похибку вимірювання $\Delta H_{\text{гор}}$.

Контрольні питання

1. Що є джерелом магнітного поля?
2. Що є джерелом магнітного поля Землі?
3. Дайте визначення магнітної індукції і напруженості магнітного поля, в яких одиницях вони вимірюються?
4. Як пов'язані індукція, напруженість і намагніченість в речовині?
5. Як визначити напрям вектору індукції $d\vec{B}$, створеної елементом струму будь-якій точці простору?
6. Дайте визначення елементів земного магнетизму.
7. Дайте визначення силовим лініям і полюсам магніту.
8. Сформулюйте закон Біо-Савара-Лапласа.
9. Виведіть формулу напруженості магнітного поля в центрі кругового струму, застосовуючи закон Біо-Савара-Лапласа.
10. Поясніть принцип дії тангенс-гальванометра.
11. Чому слід орієнтувати котушку тангенс-гальванометра в напрямку магнітного меридіана?
12. Виведіть формулу (3).
13. Для чого в експерименті змінюють напрямок струму в котушці?
14. Як в даній роботі зменшити систематичну похибку вимірювань?

Література

1. Навчальний посібник для студентів вищих технічних і педагогічних закладів освіти / Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П; за ред. Кучерука І.М.-К.: Техніка, 2001.Том 2: Електрика і магнетизм. - 452 с.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум: Навчальний посібник/ В.М.Барановський, П.В. Бережний, І.Т. Горбачук та ін. заг. ред. І.Т.Горбачук. – К.: Вища школа, 1992. -509с.
3. Козлов В.И. Общий физический практикум. Под ред. А.Н.Матвеева, Д.Ф.Киселева. – М., Изд-во МГУ, 1985, - 272с.

Додаток 1.

Угол	tg	Угол	tg	Угол	tg	Угол	tg
1°	0.0174	46°	1.0355	91°	-57.29	136°	-0.9657
2°	0.0349	47°	1.0724	92°	-28.6363	137°	-0.9325
3°	0.0524	48°	1.1106	93°	-19.0811	138°	-0.9004
4°	0.0699	49°	1.1504	94°	-14.3007	139°	-0.8693
5°	0.0874	50°	1.1918	95°	-11.4301	140°	-0.8390
6°	0.1051	51°	1.2349	96°	-9.5144	141°	-0.8098
7°	0.1227	52°	1.2799	97°	-8.1443	142°	-0.7813
8°	0.1405	53°	1.327	98°	-7.1154	143°	-0.7535
9°	0.1583	54°	1.3764	99°	-6.3138	144°	-0.7265
10°	0.1763	55°	1.4281	100°	-5.6713	145°	-0.7002
11°	0.1943	56°	1.4826	101°	-5.1446	146°	-0.6745
12°	0.2125	57°	1.5399	102°	-4.7046	147°	-0.6494
13°	0.2308	58°	1.6003	103°	-4.3315	148°	-0.6249
14°	0.2493	59°	1.6643	104°	-4.0108	149°	-0.6009
15°	0.2679	60°	1.7321	105°	-3.732	150°	-0.5774
16°	0.2867	61°	1.804	106°	-3.4874	151°	-0.5543
17°	0.3057	62°	1.8807	107°	-3.2709	152°	-0.5317
18°	0.3249	63°	1.9626	108°	-3.0777	153°	-0.5095
19°	0.3443	64°	2.0503	109°	-2.9042	154°	-0.4877
20°	0.364	65°	2.1445	110°	-2.7475	155°	-0.4663
21°	0.3839	66°	2.2460	111°	-2.605	156°	-0.4452
22°	0.404	67°	2.3559	112°	-2.475	157°	-0.4245
23°	0.4245	68°	2.475	113°	-2.3559	158°	-0.404
24°	0.4452	69°	2.605	114°	-2.2460	159°	-0.3839
25°	0.4663	70°	2.7475	115°	-2.1445	160°	-0.364
26°	0.4877	71°	2.9042	116°	-2.0503	161°	-0.3443
27°	0.5095	72°	3.0777	117°	-1.9626	162°	-0.3249
28°	0.5317	73°	3.2709	118°	-1.8807	163°	-0.3057
29°	0.5543	74°	3.4874	119°	-1.804	164°	-0.2867
30°	0.5774	75°	3.732	120°	-1.7321	165°	-0.2679
31°	0.6009	76°	4.0108	121°	-1.6643	166°	-0.2493
32°	0.6249	77°	4.3315	122°	-1.6003	167°	-0.2308
33°	0.6494	78°	4.7046	123°	-1.5399	168°	-0.2125
34°	0.6745	79°	5.1446	124°	-1.4826	169°	-0.1943
35°	0.7002	80°	5.6713	125°	-1.4281	170°	-0.1763
36°	0.7265	81°	6.3138	126°	-1.3764	171°	-0.1583
37°	0.7535	82°	7.1154	127°	-1.327	172°	-0.1405
38°	0.7813	83°	8.1443	128°	-1.2799	173°	-0.1227
39°	0.8098	84°	9.5144	129°	-1.2349	174°	-0.1051
40°	0.8390	85°	11.4301	130°	-1.1918	175°	-0.0874
41°	0.8693	86°	14.3007	131°	-1.1504	176°	-0.0699
42°	0.9004	87°	19.0811	132°	-1.1106	177°	-0.0524
43°	0.9325	88°	28.6363	133°	-1.0724	178°	-0.0349
44°	0.9657	89°	57.29	134°	-1.0355	179°	-0.0174
45°	1	90°	не определен	135°	-1	180°	0