

II ЕТАП ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ УЧНІВСЬКОЇ ОЛІМПІАДИ З ФІЗИКИ У 2025/2026

НАВЧАЛЬНОМУ РОЦІ

11 клас

Експериментальний тур.

Умови, розв'язання, критерії оцінювання

«Компас та Датчик» (15 балів)

У дослідницькому центрі є лабораторія для електромагнітних вимірювань, цілком захищена від впливу магнітного поля Землі.

Експериментатор для вимірювання магнітного поля використовує вертикальний дуже довгий тонкий провідний дріт, який пронизує горизонтальний стіл. Стіл та інші предмети майже не взаємодіють з магнітним полем. Для дослідів експериментатор користується невеликим компасом з вбудованою шкалою-транспортиром, постійно тримаючи його в горизонтальній площині, а також маленьким *датчиком*, що вимірює значення горизонтальної складової вектора індукції магнітного поля $\vec{B}_{\text{гор}}$.

Експериментатор для зручності намалював на столі осі OX та OY декартової системи координат таким чином, щоб вони були паралельні краям столу, і розташував початок координат там, де зі столу виходить дріт.

А) (5 балів) Дослідження магнітного поля дроту зі струмом.

А1) (1бал) Зробити рисунок, на якому позначити дріт, струм, **лінію магнітного поля** на деякій відстані r від дроту.

А2) (1бал) **Нарисуйте напрям стрілки** компасу, якщо його покласти на стіл на цій відстані? На рисунку обов'язково підпишіть північний та південний кінці стрілки.

А3) (3бали) Рухаючи *датчик* магнітного поля вздовж осі OX , експериментатор записав в таблицю його покази на різних відстанях від дроту r , коли сила струму в дроті дорівнювала 24 А, а сам струм був напрямлений вгору.

r , см	2,0	4,0	6,0	8,0	10
$B_{\text{дроту}}$, мкТл	240	120	80,0	60,0	48,0

Відомо, що залежність індукції магнітного поля B довгого дроту зі струмом від відстані r до дроту має вигляд:

$$B_{\text{дроту}} = A \cdot I \cdot r^n,$$

де I – сила струму в дроті, A , n – деякі константи.

Використовуючи дані з таблиці, **визначити коефіцієнти A та n** з цієї залежності.

Б) (7 балів) Дослідження магнітного поля в лабораторії.

Наступної доби внаслідок ремонтних робіт в лабораторії *захист від магнітного поля Землі був вимкнений*, а джерело струму було замінено на зовсім інше, але з тією ж полярністю під'єднання. Нове значення сили струму виміряти було також неможливо – хтось з робітників приборав вимірювальні прилади. Експериментатор у розпачі увімкнув струм, випадковим чином поклав на стіл *датчик* і з подивом побачив, що той показує 0,00 мкТл.

Б1) (2 бали). Поясніть, чому і як саме зорієнтується стрілка компаса, якщо його покласти в те ж місце, де був *датчик*, а саме в точку з координатами (-3см; 4см).

Б2) (2 бали) Намалюйте на площині XOY напрямок горизонтальної складової магнітного поля Землі $\vec{B}_{\text{гор}}$ в лабораторії та знайдіть кут між цим вектором $\vec{B}_{\text{гор}}$ та віссю OX.

Б3) (3 бали) Розрахуйте, під яким кутом до осі OX розташується стрілка маленького компаса центр якого був у точці з координатами (8см;15см).

УВАГА. Для розв'язання частини В не обов'язково розв'язувати частину Б!

В) (3 бали) Дослідження магнітного поля Землі.

Експериментатор для зручності розвернув стіл таким чином, щоб горизонтальна складова магнітного поля Землі була спрямована вздовж осі OY, а початок координат так і залишився там, де проходить дріт. Під час такого пересування змінилися налаштування джерела і сила струму.

Для знаходження горизонтальної компоненти магнітного поля Землі експериментатор почав вимірювати модуль магнітної індукції, рухаючи датчик вздовж осі OX. Результати вимірювань він записав в таблицю:

x, см	-15	-10	-5,0	5,0	10	15
B, мкТл	2,70	16,0	56,0	104	64,0	50,7

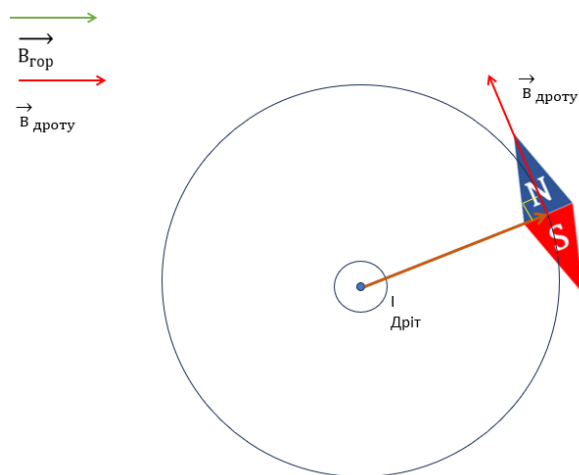
За даними з цієї таблиці знайти величину горизонтальної компоненти магнітного поля Землі $\vec{B}_{\text{гор}}$.

Розв'язання

А1. (1 бал) Лінії магнітного поля струму мають форму концентричних кіл (правило свердлика, дивись рисунок).

А2. (1 бал) Стрілка компаса має за визначенням розташуватися по дотичній до силової лінії напрямком проти годинникової стрілки якщо дивитися зверху (дивись рисунок).

А3. (3 бал) Будь який метод, що дозволить отримати показник ступеню мінус 1, має оцінюватися в 1 бал. Це може бути складання



системи з рівнянь $B_{\text{дроту}} = A \cdot I \cdot r^n$ для декількох послідовних точок таблиці з подальшим діленням цих рівнянь одне на одне, після чого легко отримати відповідь. Або побудова наданої в таблиці залежності в логарифмічному масштабі і знаходження показника n через тангенс кута нахилу графіку залежності. Не виключений варіант, що учасники просто побачать, що добуток відстані на значення індукції магнітного поля ($r \cdot B_{\text{дроту}}$) є постійним для всіх точок з таблиці, і також прийдуть до правильного висновку.

Знаючи показник $n = -1$ легко з будь-якого стовпчика таблиці знайти константу $A = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м} / \text{А}$. Знаходження A оцінюється в 1 бал. Всі цифри в таблиці дозволяють отримати ці значення для A та n точно. Але учні мають перевірити це, бо реальні вимірювання не ідеальні. Тобто, якщо учасник отримав значення тільки по 1-2 стовпчикам з таблиці, то це вважається недостатнім. Третій бал за це завдання додається за те, що вони опрацювали всі значення з таблиці або перевірили отримані по двом точкам результати на справедливість для всіх інших точок.

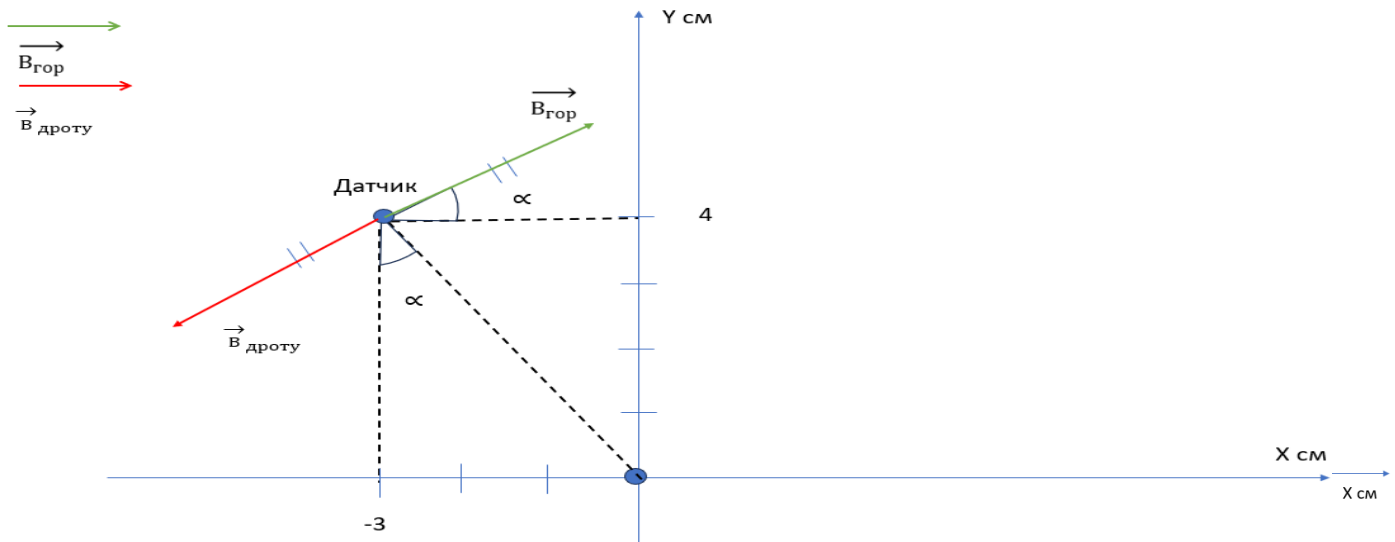
Б1. (2 бали). Так як індукція магнітного поля в цій (і тільки цій) точці дорівнює нулю, дуже маленька магнітна стрілка в будь-якому положенні буде знаходитися у стані байдужої рівноваги. Тому розташування стрілки буде залежати від того в якому положенні ми повільно внесемо компас в дану точку. Це положення стрілка має й зберегти. Така відповідь учасника має оцінюватися в 1 бал. Другий бал учасник має отримати за будь-які розрахунки, аналіз і навіть міркування про те, що в реальних умовах стрілка має ненульові розміри і внаслідок цього неоднорідне магнітне поле дроту разом з полем Землі, у якого є ще й вертикальна компонента, будуть створювати некомпенсований обертальний момент і стрілка почне обертатися в пошуках стійкого положення рівноваги. Розрахунок цього положення – це математично доволі складна задача, розв'язок якої від учасників олімпіади не очікується.

Б2. (2 бали). Зрозуміло, що датчик показує результуюче значення вектора магнітної індукції. Згідно принципу суперпозиції:

$$\vec{B}_{\text{рез}} = \vec{B}_{\text{гор}} + \vec{B}_{\text{дроту}}$$

І так як воно дорівнює нулю, то горизонтальна компонента магнітного поля Землі компенсує магнітне поле дроту в цій точці і спрямоване протилежно до поля дроту, яке в свою чергу спрямовано по дотичній до силової лінії (дивиться рисунок). Така побудова має бути оцінена в 1 бал з двох запропонованих.

Ще один бал надається за правильний розрахунок кута між вісью 0X та $\vec{B}_{гор}$.



$$tg\alpha = \left| \frac{x_d}{y_d} \right| = 0.75, \text{ тобто } \alpha \approx 36,9^\circ.$$

Б3. (3 бали) Зробимо рисунок для магнітних полів в зазначеній точці і застосуємо принцип суперпозиції для побудови вектора результуючого поля за правилом паралелограму (дивиться рисунок).

Шуканий кут, позначений на рисунку як β , можна шукати різними геометричними способами, але ж всі вони приводять до однієї тієї ж самої відповіді. Одним з таких методів є знаходження проекцій результуючого вектора на вісі 0X та 0Y

$$\text{і обрахунок тангенса кута } \beta \text{ як: } tg\beta = \frac{B_{рез\ y}}{B_{рез\ x}} = \frac{B_{гор\ y} + B_{дроту\ y}}{B_{гор\ x} + B_{дроту\ x}},$$

Де координати і модуль радіус-вектора компасу: $x_k=8,0$ см, $y_k=15,0$ см, $r_k=17,0$ см, а координати і модуль радіус-вектора датчику: $x_d=3,0$ см, $y_d=4,0$ см, $r_d=5,0$ см. А проекції вектору магнітної індукції дроту і горизонтальної складової магнітного поля Землі в точці розташування компасу дорівнюють:

$$B_{гор\ x} = B_{гор} \frac{y_d}{r_d}$$

$$B_{гор\ y} = B_{гор} \frac{|x_d|}{r_d}$$

$$B_{дроту\ x} = -B_{дроту\ комп} \frac{y_k}{r_k}$$

$$B_{дроту\ y} = B_{дроту\ комп} \frac{x_k}{r_k}$$

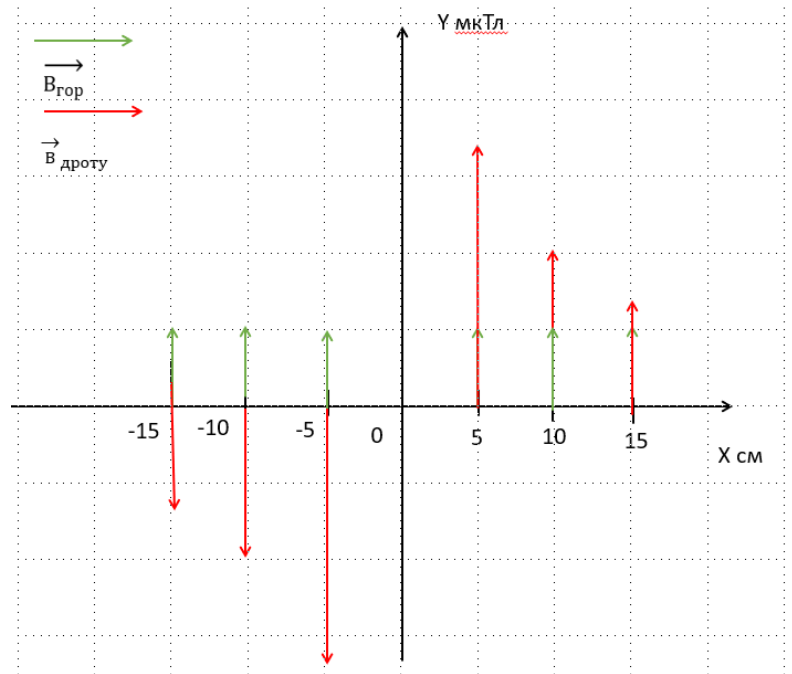
Якщо врахувати той факт, що в точці розташування датчику $B_{дроту\ датч} = B_{гор}$ а також те, що індукція магнітного поля дроту обернено пропорційна відстані до дроту,

$$\text{тобто: } \frac{B_{дроту\ комп}}{B_{дроту\ датч}} = \frac{r_d}{r_k}, \text{ легко отримати: } B_{дроту\ комп} = B_{гор} \frac{r_d}{r_k}.$$

Якщо все це підставити в формулу тангенса β :

$$tg\beta = \frac{B_{гор\ y} + B_{дроту\ y}}{B_{гор\ x} + B_{дроту\ x}} = \frac{B_{гор} \frac{|x_d|}{r_d} + B_{гор} \frac{r_d \cdot x_k}{r_k \cdot r_k}}{B_{гор} \frac{y_d}{r_d} - B_{гор} \frac{r_d \cdot y_k}{r_k \cdot r_k}} = \frac{\frac{|x_d|}{r_d} + \frac{r_d \cdot x_k}{r_k^2}}{\frac{y_d}{r_d} - \frac{r_d \cdot y_k}{r_k^2}} = \frac{0,6 + \frac{5 \cdot 8}{289}}{0,8 - \frac{5 \cdot 15}{289}} \approx 1,366, \text{ тобто } \beta \approx 53,8^\circ.$$

В) (3 бали) Після того, як експериментатор повернув стіл, горизонтальна компонента магнітного поля Землі спрямована вздовж осі 0Y, а індукція магнітного поля дроту вздовж осі 0X праворуч від дроту спрямована за віссю 0Y, а ліворуч дроту – проти неї (дивись рисунок).



Тому за принципом суперпозиції для точок з таблиці модуль результуючого магнітного поля розраховується як сума двох цих компонент, а ліворуч від дроту – як різниця (дійсно, уважні учасники мають помітити, що для однакових відстаней зліва і справа від дроту різниця значень результуючого поля однакова і дорівнює 48 мкТл).

Тоді легко отримуємо набір систем з двох однотипних рівнянь:

$$B_{\text{рез праворуч}} = B_{\text{дроту}} + B_{\text{гор}}$$

$$B_{\text{рез ліворуч}} = B_{\text{дроту}} - B_{\text{гор}}$$

Розв'язання кожної з систем дає одне те ж саме значення для горизонтальної компоненти магнітного поля Землі:

$$B_{\text{гор}} = \frac{B_{\text{рез праворуч}} - B_{\text{рез ліворуч}}}{2} = 24 \text{ мкТл.}$$

Слід зауважити, що якщо брати точки, ще більш віддалені від дроту, то $B_{\text{дроту}}$ буде ставати все меншим за $B_{\text{гор}}$ і ліворуч від дроту модуль результуючого поля буде розраховуватися як: $B_{\text{рез ліворуч}} = B_{\text{гор}} - B_{\text{дроту}}$ і буде спрямовано вже не проти осі 0Y, а вздовж неї.

	Зміст	Бали
А	А1. Правильно нарисована кругова лінія і струм в правильному напрямку	1 бал
	А2. Правильно намальований вектор магнітної індукції	1 бал
	А3. Правильно знайдений коефіцієнт n	1 бал
	Правильно знайдений коефіцієнт A	1 бал
	Відповідь перевірена на правильність у всіх точках, або отримана як результат обробки даних всієї таблиці	1 бал
	Разом за п. А	5 балів
Б	Б1. Наведена і пояснена відповідь про те, що положення стрілки залежить від початкових умов установки компаса і може бути довільним.	1 бал

	Розуміння того, що в наслідок не точкових розмірів стрілки, на її нецентральної точки будуть діяти некомпенсовані обертальні моменти з боку магнітних полів і будуть наведенні будь які розумні обґрунтування того, що стрілка не буде знаходитися у байдужій рівновазі.	1 бал
	Б.2 Правильний малюнок і пояснення	1 бал
	Правильно знайдений кут або функція кута	1 бал
	Б3 Запис принципу суперпозиції і правильний малюнок результуючого вектора магнітного поля.	1 бал
	Розрахунок функції кута і його правильне згаходження	2 бали
	Сума за пункт Б	7 балів
В	Запис принципу суперпозиції і правильний малюнок результуючого вектора магнітного поля в різних точках	1 бал
	Складена система рівнянь	1 бал
	Правильна числова відповідь	1 бал
	Сума за пункт В	3 бали
	Сума за всю задачу	15 балів