ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ ЗВ’ЯЗКУ ТА ІНФОРМАТИЗАЦІЇ УКРАЇНИ

Українська державна академія зв’язку ім. О.С. Попова

Кафедра фізики

ІНДУКЦІЯ ТА НАПРУЖЕНІСТЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОВІДНИКІВ ЗІ СТРУМОМ

Методичні вказівки до розв’язання задач з фізики
для студентів очних та заочного факультетів

ЗАТВЕРДЖЕНО
радою факультету
інформаційних технологій
та поштового зв’язку
Протокол № 5
від 22березня2000 р.

Одеса 2000

УДК 53 (07)

Укладачі: В.І. Ірха
Н.К. Макаренко

Рецензент: М.М. Одінцов

Методичні вказівки складено відповідно до діючої навчальної програми вищих технічних навчальних закладів України. Основну увагу приділено розв’язуванню задач з індукції та напруженості магнітного поля провідників зі струмом.

Вказівки розраховано на студентів очних та заочних факультетів вищих технічних навчальних закладів.

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри фізики
і рекомендовано до друку
Протокол № 5 від 5 лютого 2000 р.

Редактор І.В. Ращупкіна
Комп’ютерне макетування Ж.А. Гардиман

ВСТУП

Метою цих методичних вказівок є закріплення теоретичних знань однієї з тем розділу "Електромагнетизм": "Індукція та напруженість магнітного поля" та ознайомлення студентів з методикою розв'язування задач з даної теми. Методичні вказівки містять основні теоретичні відомості з теми, основні розрахункові формули та деякі довідкові дані, контрольні запитання для перевірки засвоєння теоретичного матеріалу, список літератури та задачі для самостійної роботи студентів. В достатній кількості у методичному посібнику наведено приклади розв'язування задач на розрахунок силових характеристик магнітних полів, які створюються провідниками різної конфігурації.

Методичні вказівки сприятимуть студентам 1-го курсу при виконанні комплексного завдання та студентам-заочникам при виконанні контрольної роботи з розділу "Електромагнетизм". Основні положення та задачі, наведені в цьому посібнику, містять важливий теоретичний матеріал, на якому базується розділ "Комутаційні прилади".

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Навколо будь-якого рухомого електричного заряду існує магнітне поле, яке дуже легко визначити за силовою дією, яку спричиняє поле на заряди, які рухаються в ньому, провідники зі струмом та постійні магніти. Змінне в часі електричне поле у вакуумі або діелектрику також породжує вихрове магнітне поле. Утворення магнітного поля навколо постійних магнітів пояснюється наявністю мікрострумів всередині речовини, що вони утворюють собою спрямований рух електронів у атомах.

Магнітне поле, подібно до електричного, має енергію та властивість інерції, а також є матеріальним об'єктом.

За основну силову характеристику магнітного поля приймається векторна величина $\vec{B}$ – індукція магнітного поля. Фізична суть вектора $\vec{B}$ випливає з рівняння, що описує експериментальний закон Ампера.

Згідно із законом Ампера, на елемент струму, що перебуває в магнітному полі, діє сила $d\vec{F} = J[d\vec{l}\,\vec{B}]$. Модуль сили Ампера дорівнює

$$dF = BIdl\sin\left(d\vec{l}, \vec{B}\right), \qquad (1)$$

де $\vec{B}$ – індукція магнітного поля;

J – величина струму;

Jdl – елемент струму (вектор, напрямок якого збігається з напрямком струму), в дослідженні магнітних полів відіграє таку ж роль, як і пробний заряд в дослідженнях електричних полів. З рівняння (1) випливає, що

$$B = \frac{dF}{Jdl\sin\left(d\vec{l}\,,\vec{B}\right)}. \tag{2}$$

Вектор магнітної індукції чисельно дорівнює силі, з якою магнітне поле діє на одиничний елемент струму (Jdl = 1)**,** розташований перпендикулярно до ліній індукції (вектора $\vec{B}$), $\sin\left(d\vec{l}\,,\vec{B}\right)=1$.

В системі СІ вектор магнітної індукції вимірюється в *теслах*. Тесла (Тл) – це індукція такого магнітного поля, яка на елемент струму, рівний 1 А 1 м і розташований перпендикулярно до вектора індукції, діє з силою 1 Н (ньютон), тобто 1 Тл = 1 Н / 1 А · 1 м.

Слід відзначити, що сила Ампера не збігається з напрямком вектора магнітної індукції. Напрямок цієї сили визначається за правилом векторного добутку або в спрощеному випадку – за правилом "лівої руки": якщо ліву руку розмістити так, щоб вектор входив в долоню, чотири пальці спрямувати за струмом, тоді відігнутий великий палець вкаже напрямок сили. Отже, сила, яка діє на елемент струму, завжди є перпендикулярна до вектора магнітної індукції та елемента струму.

Графічно магнітне поле зображується за допомогою магнітних силових ліній. Магнітна силова лінія (лінія вектора індукції) – це така лінія, в кожній точці якої вектор спрямований по дотичній до неї. В разі однорідного поля, тобто поля, індукція якого в кожній його точці однакова як за модулем, так і за напрямком (B =const), силові лінії паралельні між собою й розташовані на однаковій відстані одна від одної.

Розрахунок індукції магнітного поля виконується або на підставі закону Біо–Савара–Лапласа та принципу суперпозиції (у випадку провідників простої форми), або за допомогою закону повного струму. При розв’язанні задач з заданої теми буде використано перший спосіб.

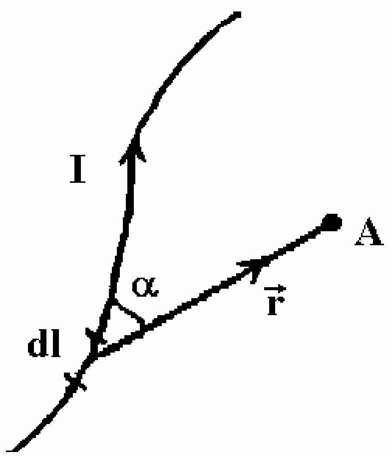

Рисунок 1

Кожний елемент струму, виділений на провіднику, створює в навколишньому просторі своє магнітне поле, індукція якого визначається згідно із експериментальним законом Біо–Савара–Лапласа:

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Jdl\sin\left(d\vec{l}\,,\vec{r}\right)}{4\pi r^2}, \tag{3а}$$

або в векторній формі:

$$d\vec{B} = \mu\mu_0 \frac{J}{4\pi r^3}[d\vec{l}\,\vec{r}\,], \tag{3б}$$

де $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений з цього елемента провідника до розглядуваної точки А поля (рис. 1); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м – магнітна постійна (абсолютна магнітна проникність вакууму); μ – відносна магнітна проникність середовища, безрозмірна величина (для вакууму μ = 1).

Закон Біо–Савара–Лапласа, а отже, формули, виведені за його допомогою, справедливі для лінійних струмів, тобто струмів, що течуть провідниками, поперечні розміри яких знехтовно малі і магнітні якості самих провідників можна не враховувати.

Вектор магнітної індукції залежить від магнітних якостей середовища й відповідно характеризує, визначає результуюче магнітне поле, що створюється усіма макро- та мікрострумами.

Якщо формулу (3) поділити на $\mu\mu_0$, то дістанемо формулу Біо–Савара–Лапласа для величини, що не залежить від магнітних властивостей середовища і зветься напруженістю магнітного поля *H*,

$$dH = \frac{Jdl \sin\left(d\vec{l}, \vec{r}\right)}{4\pi r^2}. \tag{4}$$

Як випливає з формули (4), в системі СІ напруженість *H* вимірюється в амперах на метр (А/м).

Напруженість магнітного поля – це допоміжна величина, що вводиться для характеристики магнітного поля макрострумів.

Зв’язок між індукцією та напруженістю магнітного поля виражається співвідношенням

$$B = \mu\mu_0 H \; . \tag{5}$$

В однорідному ізотропному середовищі напрямки векторів $\vec{B}$ та $\vec{H}$ збігаються.

Порівнюючи силові характеристики магнітного ($\vec{B}$ і $\vec{H}$) та електростатичного ($\vec{E}$ і $\vec{D}$) полів, очевидно, що аналогом вектора напруженості електричного поля $\vec{E}$ є вектор магнітної індукції $\vec{B}$, тому що вони визначають силові дії цих полів і залежать від властивостей середовища. Аналогом вектора електричного зміщення (індукції $\vec{D}$) є допоміжний вектор напруженості $\vec{H}$ магнітного поля.

Лінії вектора напруженості проводяться так само, як і лінії вектора індукції: в кожній точці вектор $\vec{H}$ повинен бути направлений по дотичній до цієї лінії.

Лінії напруженості, як і лінії індукції, являють собою концентричні кола, що розташовані в площинах, перпендикулярних до провідника зі струмом; їхні центри розміщено на провіднику в точках перетинання провідника з цими площинами.

Замкнутість силових ліній магнітного поля свідчить про його вихровий характер, що є суттєвою відзнакою магнітного поля від поля електростатичного.

Вектор $d\vec{B}$ спрямований в точку *A* (див. рис. 1) перпендикулярно до площини, в якій лежать вектори $d\vec{l}$ і $\vec{r}$ і збігаються з дотичною до лінії магнітної індукції. Цей напрямок може бути знайдений за правилом правого гвинта (буравчика): якщо поступальний рух буравчика відповідає напрямку струму в елементі, то напрямок обертання головки гвинта дасть напрямок вектора індукції (напруженості). В даному випадку $d\vec{B}$ направлений від нас за креслення.

Закон Біо–Савара–Лапласа дозволяє визначити індукцію (напруженість) магнітного поля струму, що він тече провідником кінцевих розмірів і довільної форми, який завжди можна уявити як сукупність великого числа елементів струму. Для цього необхідно скористатися принципом суперпозиції полів, що, як показує досвід, є справедливо для магнітного поля так само, як і для електричного.

У відповідності з принципом суперпозиції магнітна індукція (напруженість) в будь-якій точці магнітного поля визначається як векторна сума індукцій $d\vec{B}$ (напруженостей $d\vec{H}$ **)** елементарних полів окремих елементів струму:

$$\vec{B} = \int_t d\vec{B};\ \vec{H} = \int_t d\vec{H}\ . \qquad (6)$$

Якщо магнітне поле утворюється декількома провідниками зі струмом, то індукція (напруженість) результуючого поля дорівнює векторній сумі магнітних індукцій (напруженостей) полів, утворюваних кожним струмом окремо:

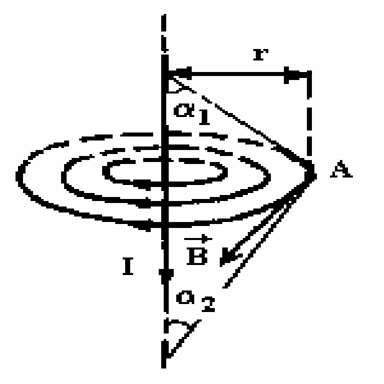

Рисунок 2

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i\ ;\ \vec{H} = \sum_{i=1}^{n} \vec{H}_i\ . \qquad (7)$$

В окремому випадку відбувається накладання двох полів ($\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$). Модуль вектора магнітної індукції визначається за теоремою косинусів:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2\cos\alpha}\,, \qquad (8)$$

де – α кут між векторами**.**

Розглянемо формули розрахунку силових характеристик магнітного поля у випадках найпростіших магнітних полів провідників зі струмом.

1 Магнітне поле прямолінійного провідника зі струмом:

а) Провідник кінцевої довжини (рис. 2)

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi r}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)\,; \qquad (9)$$

$$H = \frac{I}{4\pi r}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)\,, \qquad (10)$$

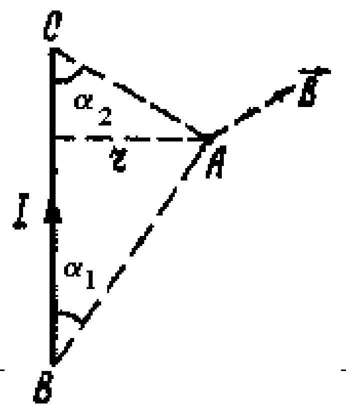

Рисунок 3

де I – величина струму в провіднику; r – найкоротша відстань від розглядуваної точки А до лінії струму; α_1, α_2 – кути, означені на рис. 2.

б) Нескінченно довгий провідник (рис. 3). При збільшуванні відрізка провідника кути α_1 і α_2 будуть зменшуватися і для нескінченно довгого провідника стають дорівнюваними нулю, а їхній косинус – дорівнюваним одиниці. Отже,

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}; \qquad (11)$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \qquad (12)$$

2 Магнітне поле ланцюгового витка зі струмом:

а) В центрі ланцюгового витка (рис. 4)

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}; \qquad (13)$$

$$H = \frac{I}{2R}, \qquad (14)$$

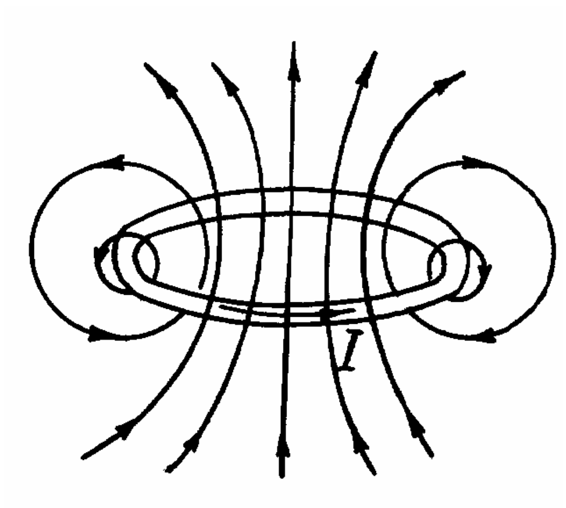

Рисунок 4

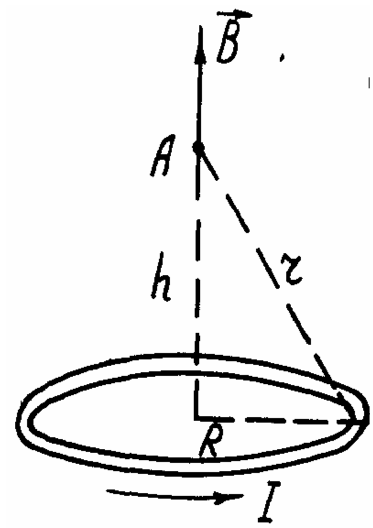

Рисунок 5

де R – радіус витка.

В усіх точках, що розміщені в площині витка, вектори $\vec{B}$ і $\vec{H}$ напрямлені перпендикулярно до цієї поверхні. Для визначення напрямків цих векторів в цих точках і на осі витка використовується обернене правило буравчика: якщо обертати ручку буравчика за струмом, то поступальний рух буравчика вкаже напрямок вектора $\vec{B}$ або $\vec{H}$.

б) В точках, що лежать на осі витка (рис. 5),

$$B = \mu\mu_0 \frac{IR^2}{2r^3}\ ; \qquad (15)$$

$$H = \frac{IR^2}{2r^2}, \qquad (16)$$

де r – відстань від розглядуваної точки А до провідника, причому $r = \left(R^2 + h^2\right)^{1/2}$.

Всі формули записуються і розрахунки виконуються в одиницях системи СІ.

Перед розв'язанням задач необхідно проробити теоретичний матеріал з даної теми.

Список літератури

1 Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для студентов втузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1982. – Т. 2. – Гл. У1, § 40, 42, 44, 47. – С. 116-117, 120-123, 125-127, 138-140.

2 Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1989. – Гл. 21, § 21.1, 21.2, 21.3, 22.1, 22.2. – С. 226-231, 235, 237-239.

3 Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1985. – Гл. 14, § 110, 111, 112, 113. – С. 164-170.

Контрольні запитання

1 Сформулювати та записати закон Ампера.

2 Що називається вектором індукції магнітного поля? В яких одиницях він вимірюється в системі СІ?

3 Як вводиться силова характеристика магнітного поля – напруженість магнітного поля? В яких одиницях вимірюється напруженість магнітного поля в системі СІ?

4 Який зв'язок існує між $\vec{B}$ і $\vec{H}$? В чому полягає відмінність між цими силовими характеристиками магнітного поля?

5 Дати визначення ліній вектора індукції (напруженості) магнітного поля.

6 Які правила побудови силових ліній та векторів $\vec{B}$ і $\vec{H}$?

7 Яка відмінність в графічній інтерпретації однорідного та неоднорідного магнітних полів?

8 В чому полягає принципова відмінність ліній магнітної індукції стаціонарних магнітних полів від силових ліній електростатичних полів?

9 Які особливості магнітного поля на відміну від поля електростатичного?

10 Сформулювати і записати закон Біо–Савара–Лапласа. Яке його практичне застосування?

11 Записати формули розрахунку індукції (напруженості) магнітного поля, створюваного прямолінійним провідником кінцевої довжини і нескінченно довгим провідником зі струмом.

12 Записати формули розрахунку індукції (напруженості) в центрі та на осі кругового струму.

13 В чому полягає принцип суперпозиції полів і для чого він практично використовується?

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 1

Два прямолінійних нескінченно довгих провідника розміщені паралельно на відстані 10 см один від другого. Провідниками в одному напрямку течуть струми 20 А і 30 А. Визначити величину і напрямок індукції магнітного поля в точках *D*, *K*, *M*. Відстані *AD*=2 см; *AK*=5 см, а точка *M* віддалена від першого струму на відстань 5 см і від другого – на відстань 12 см (рис. 6).

Аналіз

Дано:
$\mu = 1$
$I_1 = 20$ А, $I_2 = 30$ А
$AC = 0{,}1$ м, $A = 0{,}02$ м
$AK = 0{,}05$ м, $AM = 0{,}05$
$CM = 0{,}12$

Визначити: $\vec{B}_D, \vec{B}_K, \vec{B}_M$

Магнітне поле в кожній з досліджуваних точок створюється двома нескінченно довгими провідниками зі струмами, перпендикулярними до площини креслення. Тому індукція результуючого магнітного поля в кожній з точок, згідно з принципом суперпозиції полів, визначається за величиною та напрямком як векторна сума індукцій $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ полів, створюваних в досліджуваних точках струмами I_1 та I_2 відповідно:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 . \qquad (17)$$

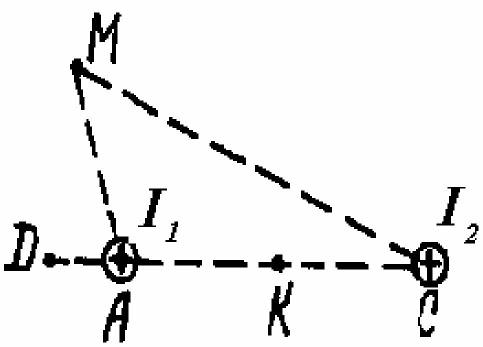

Рисунок 6

Модуль кожного з векторів $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ може бути визначено за формулою (11):

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \frac{I_i}{2\pi r_i}, \; i = 1, 2,$$

де r_i – відстань від струму до досліджуваної точки (радіус відповідної силової лінії).

Для визначення модуля та напрямку кожного з невідомих векторів слід встановити взаємний напрямок складових векторів, для чого слід їх побудувати в кожній з досліджуваних точок і розрахувати їхні модулі.

Побудову складових векторів індукції пропонується виконувати в наступному порядку:

1 Визначити площину розміщення провідника відносно площини креслення. В даному випадку обидва струми є перпендикулярні до площини креслення і спрямовані за креслення.
2 В площині, перпендикулярній до провідника зі струмом, побудувати силову лінію (або її частину) – коло, яке проходить через досліджувану точку. Центр силової лінії повинен міститись в точці перетину провідника з площиною розміщення силової лінії, а радіус силової лінії дорівнює відстані від її центра до точки, в якій визначаються $\vec{B}$ і $\vec{H}$ (ці точки рекомендовано передусім з'єднати штриховою лінією).
3 В досліджуваній точці поля по дотичній до відповідної силової (тобто перпендикулярно до радіуса цієї силової лінії) будується вектор індукції (напруженості). Напрямок векторів визначається правилом правого буравчика. Отже, вектори $\vec{B}$ і $\vec{H}$ завжди містяться в тій же площині, що й відповідна їм силова лінія, тобто в площині, перпендикулярній до провідника зі струмом.

Точкою прикладення всіх доданків векторів індукції (напруженості) та вектора $\vec{B}$ (або $\vec{H}$) результуючого поля є завжди точка поля, для якої визначається індукція (напруженість) поля.

В даній задачі струми є перпендикулярні до площини креслення, отже, всі вектори індукції будуть розміщені в площині креслення.

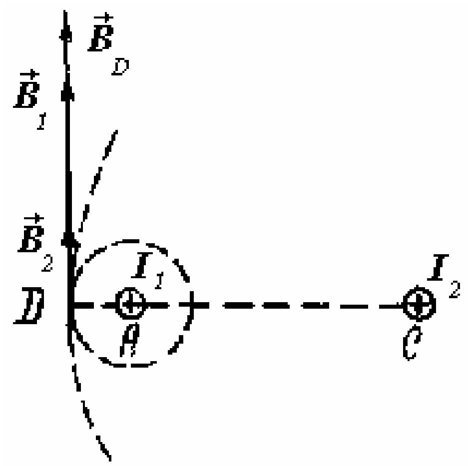

Рисунок 7

Розв'язання

I Визначення індукції в точці *D* (рис. 7).
На підставі формул (11) та (17):

$$\vec{B}_D = \vec{B}_1 + \vec{B}_2;$$

$\vec{B}_1 = \mu\mu_0 \dfrac{I_1}{}$

;

$\vec{B}_2 = \mu\mu_0$

,

де $r_1 = AD = 0{,}02$; $r2 = CD = AC + AD = 0{,}12$ м.
Оскільки $I_1 < I_2$, але також і $r_1 < r_2$, нічого певного у відношенні модулів векторів, що складаються, поки що сказати нічого. Тому виконаємо розрахунок:

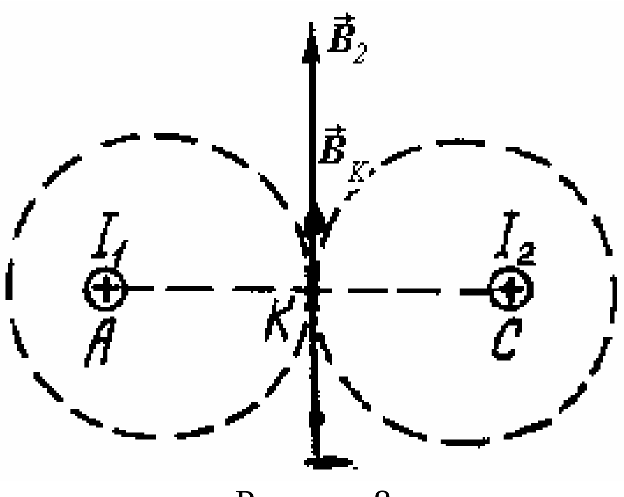

Рисунок 8

$$B_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20}{2\pi \cdot 0{,}02} = 2 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл}; \qquad [B] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{А}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл},$$

$$B_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30}{2\pi \cdot 0{,}12} = 5 \cdot 10^{-5}\ \text{Тл}.$$

Отже, $B_1 > B_2$, що й враховуємо при побудові векторів. Проведемо побудову векторів (див. рис. 7) з центром у точці A і радіусом AD, а після цього з центром в точці C і радіусом CD будуємо кола – силові лінії магнітних полів струмів I_1 та I_2, що проходять через точку D. Вектори $\vec{B}_1$ та $\vec{B}_2$ розміщені в площині креслення, перпендикулярні до лінії CD і, за правилом буравчика, в точці D направлені вгору. Оскільки обидва вектори розміщені на одній прямій і направлені в один бік, то результуючий вектор індукції буде направлений в той самий бік, а модуль його дорівнюватиме сумі модулів векторів, що складаються:

$$B_D = B_1 + B_2. \tag{18}$$

Підставимо числові значення величин, що входять до формули (18):

$$B_D = (2 \cdot 10^{-4} + 0{,}5 \cdot 10^{-4})\text{ТТ} = 2.5 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

2 Визначення індукції в точці K (рис. 8). На підставі формули (17)

$$\vec{B}_K = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Використовуючи формулу (11) та аналогічні першому випадку міркування дістаємо:

$$r_1 = AK = 0{,}05\ \text{м};$$

$$r_2 = KC - AK = 0{,}05\ \text{м},$$

тобто $r_1 = r_2 = r$.

Але оскільки $I_2 > I_1$, то $B_2 > B_1$, що й враховуємо при побудові. Оскільки співвідношення модулів векторів встановлено, то нема необхідності розраховувати ці величини. Радіусами, дорівнюваними 0,05 м з центрами в точках A і C побудуємо обидві силові лінії, що проходять через точку K. Згідно з правилами побудови, наведеними вище, вектори $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ розташовані в точці K на одній прямій, перпендикулярній до AC, і направлені в різні боки так, як вказано на рис. 8. Отже, модуль векторної сумми дорівнює

$$B_K = B_2 - B_1 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi r}(I_2 - I_1). \tag{19}$$

Після підстановки числових значень дістаємо:

$$B_K = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 0{,}05}(30 - 20) = 4 \cdot 10^{-5}\,\text{Тл}.$$

Направлений вектор $\vec{B}_K$ вздовж тієї самої прямої, на якій розміщено вектори, що складаються, в бік більшого з них ($\vec{B}_2$). Побудова цього вектора здійснюється за правилами векторного аналізу.

3 Визначення індукції в точці *M* (рис. 9).

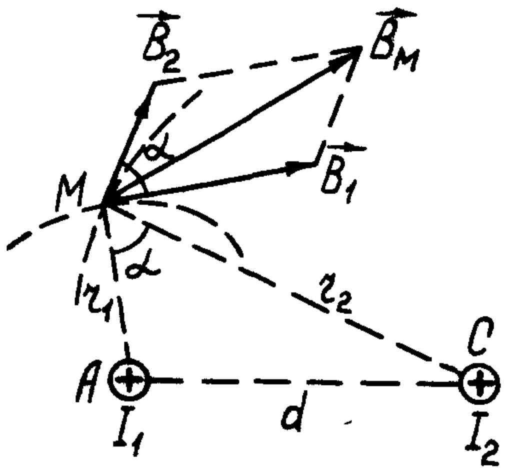

Рисунок 9

Аналогічно попереднім випадкам $\vec{B}_M = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$.

Розрахуємо модулі складових векторів, використовуючи формулу (11):

$r_1 = AM = 0{,}05$ м, $r_2 = CM = 0{,}12$ м,

$$B_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20}{2\pi \cdot 0{,}05}\ \text{Тл} = 8 \cdot 10^{-5}\ \text{Тл};$$

$$B_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30}{2\pi \cdot 0{,}12}\ \text{Тл} = 5 \cdot 10^{-5}\ \text{Тл}.$$

Отже, $B_1 > B_2$, що і враховуємо при побудові векторів. Для побудови векторів, що складаються, з'єднаємо точку *M* з точками *A* і *C* з центром в точці *A* та радіусом *AM*, а після цього – з центром в точці *C* і радіусом *CM*, побудуємо ділянки силових ліній, що проходять через точку *M*. Згідно з правилами побудови, вектори $\vec{B}_1 \perp AM$, $\vec{B}_2 \perp CM$ і направлені так, як показано на рис. 9. Оскільки вектори $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ розміщені під деяким кутом α один до одного, то результуючий вектор $\vec{B}_M$ за модулем і напрямком збігається з діагоналлю паралелограма, побудованого на векторах $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$. Модуль вектора $\vec{B}_M$ розраховується за теоремою косинусів (8):

$$B_M = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2\cos\alpha},$$

де α – кут між векторами, що складаються.

Обчислимо cos α. Зазначимо, що в трикутникові *AMC* кут *AMC* = α, як кут із взаємно перпендикулярними сторонами. Тому, застосовуючи теорему косинусів для цього трикутника, дістаємо:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\alpha,$$

де $d = AC$, $r_1 = AM$, $r_2 = CM$.

Звідси

$$\cos\alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1r_2}. \qquad (20)$$

Виконаємо розрахунок

$$\cos\alpha = \frac{0{,}05^2 + 0{,}12^2 - 0{,}1^2}{2 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}12} = 0{,}576;$$

$$B_M = \sqrt{(8 \cdot 10^{-5})^2 + (5 \cdot 10^{-5})^2 + 2 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 0{,}576} \cong 1{,}2 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

Проаналізувавши за величиною індукції характер досліджуваного магнітного поля, дійдемо висновку, що воно неоднорідне, бо індукція є функцією відстані від провідника зі струмом. Із співвідношення модулів вектора індукції результуючого поля випливає, що більш сильне поле з найбільш густо розташованими лініями повинно бути біля точки *D*, а більш слабке поле – між струмами в точці *K*.

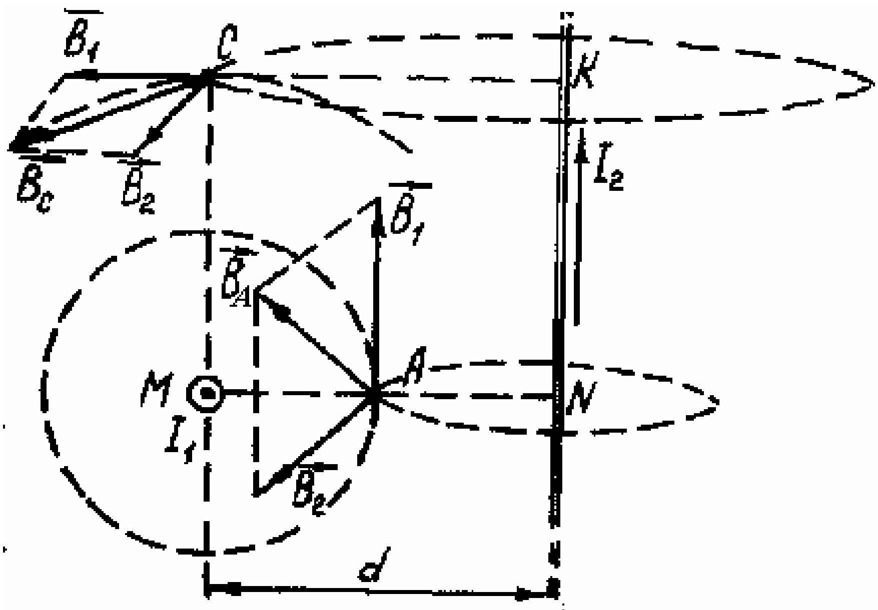

Рисунок 10

Приклад 2

Двома нескінченно довгими прямими проводами, схрещеними під прямим кутом (провідники розміщені перпендикулярно один до одного і знаходяться у взаємно перпендикулярних площинах), течуть струми 80 і 60 А. Відстань поміж проводами 10 см. Визначити магнітну індукцію в точці *A*, що міститься поміж провідниками на однаковій відстані від них, і в точці *C*, однаково віддаленій від обох провідників на відстань 10 см (рис. 10).

Аналіз

Магнітне поле в кожній з точок, що досліджуються, створюється двома нескінченними прямолінійними провідниками зі струмом. Тому індукція результуючого магнітного поля в кожній точці, згідно з принципом суперпозиції полів (формули (7) і (17)), визначається рівнянням

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Модуль кожного з векторів $\vec{B}_1$ та $\vec{B}_2$ може бути визначений за формулою (11):

Дано:
$\mu = 1$
$I = 80$ А, $I2 = 60$ А
$D = MN = MC = KC = 0{,}1$ м
$AM = AN = 0{,}05$ м

Визначити: $\vec{B}_A, \vec{B}_C$

$$B_i = \mu\mu_0 \frac{I_i}{2\pi r_i},\ i = 1,\ 2.$$

Визначаємо співвідношення модулів векторів індукції.

Для точки *A*: $r_1 = AM = d/2$, $r_2 = AN = d/2$, $r_1 = r_2$**.**

Величина струмів: $I_1 > I_2$. Отже, $B_1 >$

B_2.
Для точки C: $r_1 = CM = d$, $r_2 = KC = d$, $r_1 = r_2$ і $I_1 > I_2$.
Отже, так само $B_1 > B_2$.

Оскільки провідники схрещені, то силові лінії їхніх полів будуть розташовуватися у взаємно перпендикулярних площинах: для струму I_1, напрямленого перпендикулярно до площини креслення до нас – в площині креслення, для струму I_2, що перебуває в площині креслення, – в перпендикулярній кресленню площині (див. рис. 10). Отже, і вектори індукції, як дотичні до відповідних силових ліній, в точках, що досліджуються, будуть взаємно перпендикулярні: вектор $\vec{B}_1$ міститься в площині креслення і в точці A $\vec{B}_1 \perp AM$, а в точці C $\vec{B}_1 \perp MC$**;** вектор $\vec{B}_2$ є перпендикулярний до площини креслення, тобто $\vec{B}_1 \perp \vec{B}_2$ в кожній з точок. Отже, ці результуючі вектори $\vec{B}_A$ і $\vec{B}_C$ будуть міститись в площині, перпендикулярній до площини креслення, направлені до нас по діагоналях відповідних прямокутників, побудованих на векторах, що додаються, $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ (див. рис. 10). Модулі цих векторів можуть бути розраховані за теоремою Піфагора.

Розв'язання

1 Індукція магнітного поля в точці А

$$r_1 = r_2 = d/2;$$

$$B_A = \sqrt{B_1 + B_2} = \frac{\mu\mu_0}{\pi d}\sqrt{I_1 + I_2}; \qquad (21)$$

$$[B_A] = \frac{\text{Н}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}}(\text{А}^2)^{1/2} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}.$$

Виконаємо розрахунок B_A:

$$B_A = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 0{,}1}\sqrt{80^2 + 60^2} = 4 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

2 Індукція магнітного поля в точці C

$$r_1 = r_2 = d.$$

$$B_C = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi d}\sqrt{I_1^2 + I_2^2}, \qquad (22)$$

$$B_C = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 0{,}1}\sqrt{80^2 + 60^2} = 2 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

Поле є неоднорідне і сильніше в точці поміж провідниками.

Приклад 3

Виток дроту радіусом 10 см розміщений в площині магнітного меридіана. В центрі витка встановлена магнітна стрілка, здатна обертатися навколо 60^o. Горизонтальну складову індукції земного магнітного поля прийняти дорівнюваною 20 мкТл.

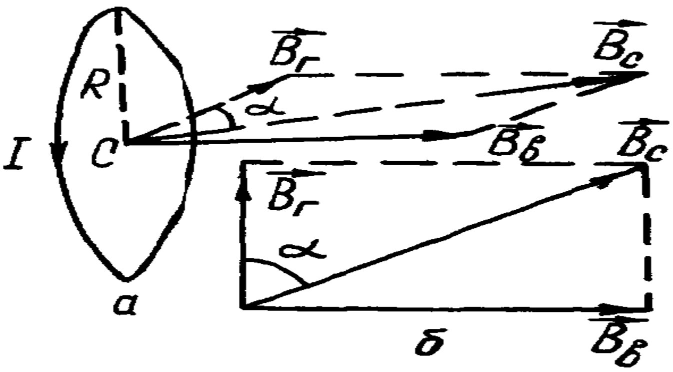

Рисунок 11

Дано:
$\mu = 1$
$I_1 = 80$ А, $I_2 = 60$ А
$d = MN = MC = KC = 0{,}1$ м
$AM = AN = 0{,}05$ м

Визначити: I

Аналіз

Земля являє собою природний магніт. Магнітна стрілка, укріплена так, що вона може обертатися навколо вертикальної і горизонтальної осей, в різних точках Землі встановлюється під різними кутами до її поверхні. Це свідчить про те, що силові лінії поля Землі, а отже, і вектор індукції (напруженості) в різних точках Землі утворюють різні кути з її поверхнею. Вектор індукції (напруженості) поля Землі можна розкласти на дві складові: горизонтальну $\vec{B}_r$ і вертикальну. Магнітна стрілка, насаджена на вертикальне вістря, може обертатися в горизонтальній площині. Під дією магнітного поля Землі вона встановлюється в певному положенні, вказуючи своїм північним полюсом направлення горизонтальної складової індукції. Вертикальна площина, проведена через магнітну стрілку, називається площиною магнітного меридіана.

Прилад, описаний в умові задачі, називається тангенс-буссоллю і може бути використаний для експериментального визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.

Коли струм у витку відсутній, на магнітну стрілку впливає тільки поле Землі, під дією якого стрілка встановлюється так, що своїм північним полюсом вона в горизонтальній площині вказує напрямлення горизонтальної складової магнітного поля Землі $\vec{B}_r$. Оскільки за умовою задачі виток розміщений в площині магнітного меридіана, то стрілка розміститься вздовж горизонтального діаметра витка. Вектор $\vec{B}_r$ лежить в площині витка, перпендикулярного до площини креслення і напрямлений за креслення (рис. 11, а).

Якщо витком пропустити струм, виникає додаткове магнітне поле ланцюгового струму з індукцією $\vec{B}_C$, напрямленою перпендикулярно до площини витка. В даному випадку (див. рис. 11, а) $\vec{B}_C$ лежить в площині креслення і напрямлений (для даного напрямлення струму) праворуч (застосовується згорнуте правило буравчика).

Таким чином, в горизонтальній площині, перпендикулярній до площини креслення, накладаються два магнітних поля: поле Землі з індукцією $\vec{B}_r$ і поле ланцюгового витка зі струмом – з індукцією $\vec{B}_C$. Магнітна стрілка при цьому встановиться в напрямку індукції результуючого поля $\vec{B}_c$, відхиляючись на кут α від початкового напрямку вздовж $\vec{B}_r$.

В силу вищесказаного $\vec{B}_r \perp \vec{B}_C$. В цьому випадку паралелограм, побудований на векторах $\vec{B}_r$ та $\vec{B}_C$, являє собою прямокутник, а вектор $\vec{B}_C$ результуючого поля напрямлений по діагоналі прямокутника (рис. 11, а, б). З рис. 11,б випливає, що

$$B_C / B_r = \operatorname{tg} \alpha . \qquad (23)$$

Розв’язання

Величина індукції магнітного поля ланцюгового провідника зі струмом в його центрі може бути визначена за формулою (13):

$$B_C = \mu\mu_0 \frac{I}{2R} .$$

З урахуванням формули розрахунку $\vec{B}_C$ формула (23) перепишеться у вигляді

$$\mu\mu_0 \frac{I}{2RB_r} = \operatorname{tg} \alpha ,$$

Дано:
$I = I_1 = I_2 = I_3 = 6{,}28$ A
$R = 0{,}05$ Ом
$\mu = 1$, $AC = 2\,R = 0{,}1$ м
Визначити: $\vec{B}_C$

звідки

$$I = \frac{2RB_r \operatorname{tg} \alpha}{\mu\mu_0}, \quad [I] = \frac{\text{м} \cdot \text{Тл}}{\text{Н}/\text{А}^2} = \frac{\text{м} \cdot \text{Н} \cdot \text{А}^2}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}}. \qquad (24)$$

Виконаємо розрахунок:

$$I = \frac{2 \cdot 0{,}1 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{12{,}56 \cdot 10^{-7}} - 1{,}73 = 5{,}6 \text{ А} .$$

Приклад 4

Магнітне поле створене нескінченно довгим проводом, що утворює ланцюгову петлю, дотичну до проводу, та іншим нескінченним прямим проводом, перпендикулярним до площини петлі і розташованим на відстані 0,1 м від центра петлі, радіус якої 5 см (рис. 12). Струми в проводах однакові й дорівнюють 6,28 А. Визначити індукцію магнітного поля в центрі петлі.

Аналіз

Для зручності побудови розмістимо петлю в площині креслення, а прямолінійний провідник зі струмом – перпендикулярно до цієї площини (рис. 12). Виберемо напрямки струмів в провідниках так, як вказано на рисунку.

Індукцію магнітного поля, створюваного в точці з прямолінійним провідником зі струмом I_3, можна визначити за формулою (11):

$$B_3 = \mu\mu_0 \frac{I_3}{2\pi \cdot AC}.$$

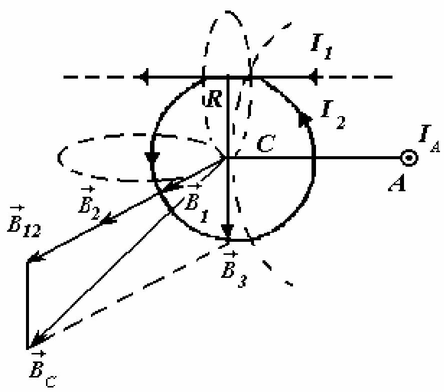

Рисунок 12

Що стосується петлі, то готової табличної формули разрахунку силової характеристики поля в її центрі у нас немає. В подібних випадках провідник складної конфігурації слід розглядати як сукупність провідників більш простої конфігурації, для яких є відомі формули розрахунку силових характеристик їхніх полів. Тоді індукція (напруженість) поля провідника складної форми може бути розрахована за допомогою принципу суперпозиції полів (формула (7)).

В даному випадку петлю можна розглядати як сукупність двох провідників простої форми з однаковими струмами: нескінченно довгий прямолінійний провідник зі струмом I_1, що створює в точці C магнітне поле з індукцією $\vec{B}_1$, і коловий провідник зі струмом $I_2 = I_1$, який є дотичний до першого і створює в точці C магнітне поле з індукцією $\vec{B}_2$. Обидва провідники розміщені в площині креслення. Для розрахунку $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ використаємо формули (11) і (13).

Отже, отримуємо, що результуюче поле в точці C створено трьома провідниками з однаковими величинами струмів. Тоді, згідно з принципом суперпозиції полів (7), індукція в точці C результуючого поля

$$\vec{B}_C = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3. \tag{25}$$

Модулі складених векторів розраховуються за формулами

$$\vec{B}_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r_1} = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}; \tag{26}$$

$$\vec{B}_1 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2R} = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}; \tag{27}$$

$$\vec{B}_1 = \mu\mu_0 \frac{I_3}{2\pi \cdot AC} = \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi R}. \tag{28}$$

При порівнянні модулів векторів індукції з формул (26), (27) та (28) очевидно, що $B_2 > B_1 > B_3$, що необхідно враховувати при побудові.

Для визначення цього вектора $\vec{B}_c$ необхідно розрахувати модулі складених векторів і, побудувавши вектори, визначити їхнє взаємне положення.

Розв’язання

Побудуємо силові лінії і вектори індукції для всіх провідників згідно з викладеними раніше правилами (див. рис. 12). Силові лінії провідників, що утворюють петлю, повинні лежати в площині, перпендикулярній до площини креслення. Отже, вектори $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ в точці *C* розміщені на одному перпендикулярі до площини креслення в цій точці і при обраному напрямку струму направлені до нас. Силові лінії поля струму I_3 розміщені в площині креслення. В цій самій площині по дотичній до силової лінії в точці *C* (перпендикулярно до *AC*) розміщується $\vec{B}_3$, направлений вниз.

Додавання векторів зручно провести в наступному порядку: спочатку скласти вектори $\vec{B}_1$ і $\vec{B}_2$ ($\vec{B}_1+\vec{B}_2=\vec{B}_{12}$), а після цього вектор $\vec{B}_{12}$ скласти з $\vec{B}_3$. В силу розміщення силових ліній у взаємно перпендикулярних площинах, ці вектори є перпендикулярні один до одного. Тому цей вектор буде направлений по діагоналі прямокутника, побудованого на векторах $\vec{B}_{12}$ і $\vec{B}_3$, розміщений в площині, перпендикулярній до площини креслення, а його модуль може бути визначений за теоремою Піфагора:

$$B_C=\sqrt{B_{12}^2+B_3^2}\,. \qquad (29)$$

Виконаємо розрахунки, використовуючи формули (26), (27), (28) і (29).

$$B_{12}=B_1+B_2=\mu\mu_0\frac{I}{2\pi R}+\mu\mu_0\frac{I}{2R}=\frac{\mu\mu_0 I}{2R}\left(\frac{1}{\pi}+1\right); \qquad (30)$$

$$[B_{12}]=\frac{\text{А}\cdot N\,/\,\text{А}^2}{\text{м}}=\frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}}=\text{Тл};$$

$$B_{12}=\frac{12{,}56\cdot10^{-7}\cdot6{,}28}{2\cdot0{,}05}\left(\frac{1}{3{,}14}+1\right)=331\pi\cdot10^{-7}\ \text{Тл};$$

$$B_3=\frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot6{,}28}{4\pi\cdot0{,}05}=4\pi\cdot10^{-6}\ \text{Тл};$$

$$B_C=\sqrt{(331\pi3^2\cdot10^{-14}+(4\pi4^2\cdot10^{-12}}\cong1{,}06\cdot10^{-4}\ \text{Тл}.$$

Магнітне поле даної системи провідників неоднорідне.

Приклад 5

Нескінченно довгим прямим провідником, зігнутим під кутом 120°, тече струм величиною 50 А. Визначити магнітну індукцію поля в точці, котра лежить на бісектрисі цього кута й віддалена від вершини кута на відстані 5 см.

Аналіз

Оскільки для провідника заданої конфігурації формула розрахунку індукції його магнітного поля нам невідома, необхідно уявити даний провідник як сукупність двох нескінченних відрізків провідника, для поля кожного з яких індукція може бути визначена за формулою (9):

$$B_i = \mu\mu_0 \frac{I_i}{4\pi r_i}\left(\cos\alpha_{1i} + \cos\alpha_{2i}\right), \quad i = 1, 2.$$

Тоді ця індукція результуючого магнітного поля, згідно з принципом суперпозиції (7):

$$\vec{B}_A = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Встановимо напрямок і взаємне розташування векторів, що складаються. Провідник в площині креслення і струм напрямлений так, як вказано на рис. 13, отже, і силові лінії, і вектори індукції будуть розміщені в площині, перпендикулярній до креслення. З точки *A* опустимо перпендикуляри *AC* і *AD* на кожний з відрізків провідника в площинах, перпендикулярних до кожного з відрізків провідника, побудуємо силові лінії, радіуси яких $r_1 = AC$ і $r_2 = AD$.

Дано:
$\mu=1$
$I = 50$ А
$\beta = 120^0$
$AK = l = 0{,}05$ м

Визначити: $\vec{B}_A$

В точці А силові лінії дотикаються і їхні площини розміщені під кутом 60° одна до одної. Вектори $\vec{B}_1$ та $\vec{B}_2$ при обраному напрямленні струму, перпендикулярному до площини креслення, розташовуються в точці *A* на одній прямій і напрямлені до нас. Оскільки обидва вектори мають однакові напрямки і розташовуються на одній прямій, то модуль результуючого вектора $\vec{B}_A$ дорівнює сумі модулів векторів, що складаються:

$$B_A = B_1 + B_2.$$

Цей вектор напрямлений так само, як і вектори, що додаються: перпендикулярно до площини креслення до нас (див. рис. 13).

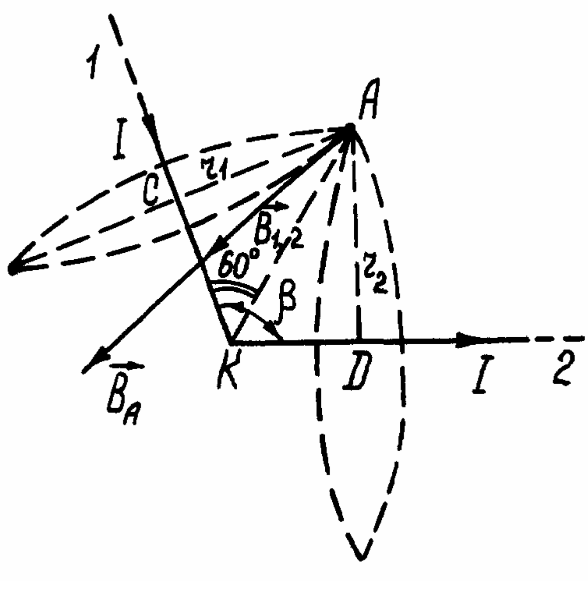

Рисунок 13

Розв'язання

Встановимо співвідношення модулів векторів, що складаються. Величини струмів $I_1 = I_2 = I$. В силу симетрії розташування точки A:

$$r = r_1 = r_2 = l \sin 60^o = l\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Кути α_1 і α_2, створені напрямленням струму та радіус-векторами, проведеними із досліджуваної точки до кінців відрізків провідника, для двох даних напівнескінн-чених рівних відрізків однакові: для відрізка 1 – $\alpha_1 = 0^o$; $\alpha_2 = 60^o$; для відрізка 2 – $\alpha_1 = 60^o$; $\alpha_2 = 0^o$. Отже, сума косинусів цих кутів для обох відрізків однакова. З наведеного вище аналізу випливає, що $B_1 = B_2$. Тому $B_A = B_1 + B_2 = 2B_1$.

$$B_A = 2\mu\mu_0\frac{I}{4\pi r}(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)\ . \tag{31}$$

З урахуванням значень r та косинусів кутів формула може бути спрощена:

$$B_A = 2\mu\mu_0\frac{2I}{4\pi l\sqrt{3}}(1+\frac{1}{2}) = \mu\mu_0\frac{\sqrt{3}I}{2\pi l}\ ; \tag{31a}$$

$$[B_A] = \frac{\text{АН/А}^2}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}} = \text{Тл}.$$

Виконаємо розрахунок модуля вектора B_A:

$$B_A = \frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 1{,}73\cdot 50}{2\pi\cdot 0{,}05} = 3{,}46\cdot 10^{-4}\ \text{Тл}.$$

Приклад 6

Провідником, вигнутим у вигляді кола, тече струм. Напруженість поля в центрі кола дорівнює $20\,\text{А/м}$. Не змінюючи струму в провіднику, йому надали форму квадрата. Визначити напруженість і індукцію магнітного поля в центрі квадрата (рис. 14).

Аналіз

Дано:
μ = I
H_0 = 20 А/м
I = const

Визначити: $\vec{H}_C, \vec{B}_C$

Оскільки формула розрахунку напруженості та індукції магнітного поля в центрі квадрата не належить до табличних, тоді будемо розглядати задану конфігурацію провідника як сукупність чотирьох однакових відрізків провідника кінцевої довжини з однаковим струмом, розташованих симетрично відносно точки C.

Для кожного з таких відрізків напруженість поля в точці C може бути розрахована за формулою (10):

$$H_i = \frac{I}{4\pi r_i}(\cos\alpha_{1i} + \cos\alpha_{2i}),\ i = 1, 2.$$

Тоді, згідно з принципом суперпозиції полів, напруженість результуючого поля в точці C дорівнює

$$\vec{H}_C = \sum_{i=1}^{4} \vec{H}_i\ .$$

Оскільки провідник розміщено в площині креслення, то всі силові лінії і кожний із складових векторів, що додаються, будуть перпендикулярні до площини креслення. В досліджуваній точці C поля всі вектори напруженості лежать на одній прямій, перпендикулярній до площини креслення, і при обраному напрямку струму (проти годинникової стрілки) напрямлені до нас (рис. 14). Тому вектор напруженості результуючого поля буде напрямлений так само, як і вектори, що складаються, і за модулем дорівнює сумі модулів цих векторів:

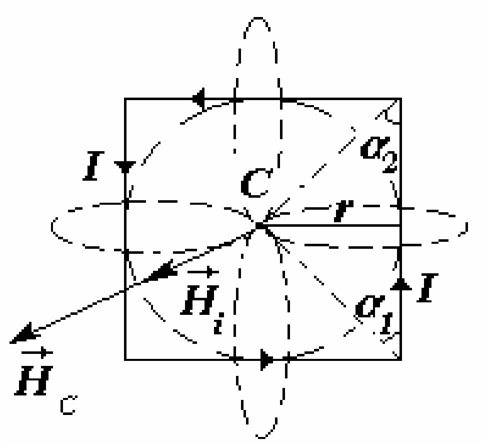

Рисунок 14

$$H_C = \sum_{i=1}^{4} H_i\ . \qquad (32)$$

Розв'язання

Аналізуючи формулу розрахунку H_i, встановимо співвідношення модулів векторів, що складаються: 1) струми в усіх відрізках однакові й задаються величиною струму в ланцюговому витку; 2) в силу симетрії найкоротші відстані r_i від точки C до кожного з відрізків провідника теж однакові; 3) в силу тієї ж симетрії для всіх відрізків кути $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^0$. Отже, модулі всіх векторів, що складаються, рівні: $H_1 = H_2 = H_3 = H_4$. Тому модуль цього вектора

$$H_C = 4H_1 = 4\frac{I \cdot 2\cos 45^\circ}{4\pi r} = \frac{2I}{\pi r}\cos 45^\circ . \qquad (33)$$

Відстань r від центра квадрата до відрізків провідника дорівнює $r = L/8$, де периметр квадрата L може бути знайдений за довжиною кола ланцюгового провідника, з якого зроблена квадратна рамка, тобто $L = 2\pi R$, де R – радіус ланцюгового витка. Тоді, $r = \frac{2\pi R}{8} = \frac{\pi R}{4}$ підставимо в формулу розрахунку H_C:

$$H_C = \frac{2I\cos 45^\circ}{\pi(\pi R/4)} = \frac{8I}{\pi^2 R}\cos 45^\circ . \qquad (33а)$$

Невідомий у формулі (33а) радіус кола може бути знайдений за значенням напруженості в центрі ланцюгового витка, що розраховується за формулою (12), звідки

$$R = \frac{I}{2H_0} . \qquad (34)$$

Підставляючи (34) в формулу (33а), дістанемо остаточну формулу розрахунку цієї напруженості:

$$H_C = \frac{16 H_0 \cos 45^\circ}{\pi^2} . \qquad (35)$$

Виконаємо розрахунок:

$$H_C = \frac{16 \cdot 20 \cdot 0{,}707}{3{,}14^2} = 22{,}6 \text{ А/м}.$$

Знаючи H_C і формулу зв'язку індукції та напруженості (5), легко визначити індукцію в точці C:

$$B_C = \mu\mu_0 H_C; \; B_C = 12{,}56 \cdot 10^{-7} \cdot 22{,}6 \cdot 2{,}82 \cdot 10^{-5} \text{ Тл};$$

$$B_C = \frac{\text{НА}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}.$$

В однорідному ізотропному середовищі вектори $\vec{B}_C$ і $\vec{H}_C$ збігаються за напрямком.

Приклад 7

Два ланцюгових витка радіусом 4 см кожний розміщені в паралельних площинах на відстані 5 см один від одного. По витках течуть в протилежних напрямках однакові за величиною струми 8 А. Знайти напруженість магнітного поля в центрі другого витка.

Дано:
$\mu = 1$
$I = I_1 = I_2 = 8$ А
$R = R_1 = R_2 = 0{,}04$
$OC = l = 0{,}05$

Визначити: $\vec{H}_C$

Аналіз

Для зручності побудови векторів напруженості розмістимо площини ланцюгових витків перпендикулярно до площини креслення (рис. 15). Тоді всі вектори напруженості будуть розташовуватися в площині креслення. Оскільки магнітне поле в центрі другого витка (точка C) створюється двома ланцюговими провідниками зі струмом, то напруженість результуючого поля може бути визначена за принципом суперпозиції полів:

$$\vec{H}_C = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 ,$$

де $\vec{H}_1$, $\vec{H}_2$ – напруженості полів, створених в цій точці струмами I_1 та I_2 відповідно. Модуль вектора може бути розрахований за формулою (16), оскільки точка *C* лежить на осі *OC* першого витка:

$$H = \frac{IR^2}{2r^2},$$

де r – відстань від точки *C* до першого ланцюгового витка; згідно з кресленням

$$r^2 = R^2 + l^2.$$

Вектор $\vec{H}_1$ повинен бути спрямований в точці *C* вздовж осі витків *OC* перпендикулярно до площин витків в бік, котрий визначається оберненим правилом буравчика (див. рис. 15).

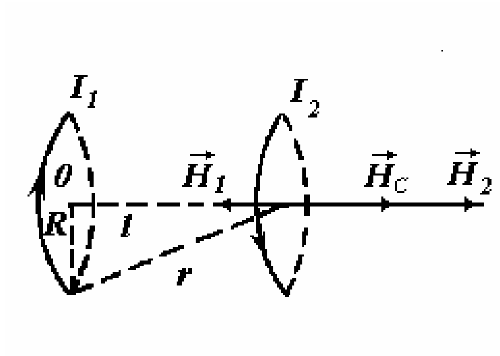

Рисунок 15

Напруженість поля, створюваного в точці *C* струмом I_2, може бути розрахована за формулою (14):

$$H_2 = \frac{I_2}{2R_2} = \frac{I}{2R}.$$

Застосувавши правило буравчика, дістаємо, що вектор $\vec{H}_2$ також є перпендикулярний до площини витків і напрямлений вздовж їхньої осі. При вибраному напрямі струмів у витках дістаємо, що обидва вектори, котрі складаються, розміщені вздовж однієї прямої, але спрямовані в протилежні боки так, як показано на рис. 15.

Отже, цей вектор напруженості буде напрямлений вздовж більшого з них $\vec{H}_2$ і за модулем дорівнює різниці модулів векторів, що складаються:

$$H_C = H_2 - H_1. \qquad (36)$$

Розв'язання

Розрахуємо модулі векторів, що складаються:

$$H_1 = \frac{IR^2}{2(R^2 + l^2)^{3/2}}; \qquad (37)$$

$$[H_1] = \frac{\text{А} \cdot \text{м}^2}{(\text{м}^2 + \text{м}^2)^{3/2}} = \frac{\text{А}}{\text{м}};$$

$$H_1 = \frac{8 \cdot 0{,}04^2}{2(0{,}04^2 + 0{,}05^2)^{3/2}} \cong 24{,}4\ \frac{\text{А}}{\text{м}};$$

$$H_2 = \frac{8\ \text{А}}{2 \cdot 0{,}04\ \text{м}} = 100\ \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Підставимо числові значення модулів цих векторів у формулу (36):

$$H_C = (100 - 24{,}4)\,\frac{\text{А}}{\text{м}} = 75{,}6\,\frac{\text{А}}{\text{м}}\ .$$

Напрямок $\vec{H}_C$ вказано на рис. 15.

Задачі для самостійного розв’язання

1 Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. – М.: Наука, 1985.– § 11. – № 1-9, 11-12, 15-20, 22-26.
2 Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1981. – Гл. 5.– § 21.– № 21-4, 21-8, 21-14...21-31.

З М І С Т