

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя

Кафедра фізики

**МАГНІТНЕ ПОЛЕ.
ЯВИЩЕ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ
ІНДУКЦІЇ**

**Методичні вказівки
до самостійної роботи студентів
із розв'язування задач**

Тернопіль

2013

Магнітне поле. Явище електромагнітної індукції: Методичні вказівки до самостійної роботи студентів із розв'язування задач / В.І. Кульчицький, укладач. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2013. – 60 с.

Навчально-методичний посібник містить вказівки до самостійної роботи студентів із розв'язування задач із розділів «Магнітне поле. Явище електромагнітної індукції» курсу «Електрика та магнетизм» для стаціонарної та заочної форм навчання у ТНТУ імені Івана Пулюя за навчальними планами підготовки бакалаврів з напрямку 6.050101 – комп'ютерні науки. У посібнику викладено короткі теоретичні відомості із розділів «Магнітне поле. Явище електромагнітної індукції» курсу «Електрика та магнетизм», розроблено методичні вказівки та приклади розв'язування задач з детальним поясненням, подані деякі довідникові матеріали, перелік задач для самостійної роботи, основну та додаткову літературу.

Пропоноване видання є третьою складовою частиною навчально-методичного посібника для студентів інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів, яка призначена для самостійного оволодіння студентами практичними навичками із розв'язування задач.

Навчально-методичний посібник можуть використовувати при вивченні курсу фізики студенти напрямку 6.050101 – «Комп'ютерні науки».

Укладач – канд. пед. наук, доцент кафедри фізики Віктор Кульчицький.

Рецензенти – докт. фіз.-мат. наук, професор кафедри фізики Леонід Дідух;
канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики Богдан Ковальюк.

Рекомендовано до друку на засіданні кафедри фізики ТНТУ імені Івана Пулюя, протокол № від 2013 р.

Схвалено на засіданні методичної ради факультету по роботі з іноземними студентами ТНТУ імені Івана Пулюя, протокол № від 2013 р.

Зміст	
Вступ	4
1. Зміст дисципліни	6
2. Рекомендована література	
2.1. Основна література	6
2.2. Додаткова література	7
3. Розділ 1. Статичне магнітне поле	
§1 Теоретичний довідник	8
§2. Приклади розв'язування задач	17
4. Розділ 2. Явище електромагнітної індукції.	
§1 Теоретичний довідник	25
§2. Приклади розв'язування задач	30
5. Розділ 3. Задачі для самостійного розв'язування	41
5. Таблиці основних фізичних величин	60

ВСТУП

До навчальних планів підготовки бакалаврів галузі знань 0501 – інформатика та обчислювальна техніка, напряму підготовки: 6.050101 – комп'ютерні науки включено «Фізику» як обов'язкову навчальну дисципліну, оскільки оволодіння фізичними знаннями дає змогу майбутнім інженерам успішно засвоювати спеціальні дисципліни та використовувати у подальшому здобуті фізичні знання на виробництві.

З метою формування предметних компетентностей студентів з фізики передбачено виконання ними самостійних розрахункових робіт. Це індивідуальні завдання, виконання яких має за мету закріплення навичок самостійного розв'язування студентами текстових та графічних фізичних задач. Розв'язування й аналіз задач дозволяє студентам зрозуміти та запам'ятати основні закони фізики, сформувані уявлення про характерні особливості й межі (границі) їх застосування. Уміння розв'язувати задачі є безпомилковим критерієм оцінки глибини засвоєння програмного матеріалу.

На допомогу студентам у виконанні самостійних розрахункових робіт розроблено цей навчально-методичний посібник, який містить короткі теоретичні відомості з кожного розділу фізики, методичні вказівки та приклади розв'язування задач з детальним поясненням, деякі довідкові матеріали, перелік задач для самостійної роботи, основну та додаткову літературу.

Пропоноване видання «Магнітне поле. Явище електромагнітної індукції» є третьою складовою частиною навчально-методичного посібника для студентів інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів, яка призначена для самостійного оволодіння студентами практичними навичками розв'язування задач із розділів «Магнітне поле» та «Явище електромагнітної індукції».

Під час виконання самостійних розрахункових робіт необхідно дотримуватись наступних правил:

- 1) опрацювати теоретичний матеріал з відповідних розділів фізики;

- 2) уважно ознайомитися з прикладами розв'язання типових задач з даних тем;
- 3) роботу виконувати у зошиті;
- 4) на титульній сторінці вказати назву дисципліни, прізвище, ім'я та по-батькові студента;
- 5) роботи виконувати акуратно, залишаючи поля для заміток викладача, кожену задачу починати з нової сторінки;
- 6) умову задачі свого варіанту переписати повністю; провести після слова «дано» її скорочений запис, залишаючи місце для табличних даних; перевести числові значення в СІ; шукані величини записати зі знаком питання;
- 7) після слова «аналіз» акуратно і чітко виконати рисунок чи графік для пояснення розв'язку задачі;
- 8) розв'язок задачі обов'язково супроводжувати детальним поясненням кожної формули; перетворення проводити до отримання кінцевої формули, у лівій частині якої знаходиться шукана величина, а у правій величини, які задані в умові задачі;
- 9) після слова «обчислення» підставити числові значення фізичних величин у розрахункову формулу; точність отриманої відповіді не повинна перевищувати тієї точності, з якою задані величини, що зустрічаються в обчисленні;
- 10) одержавши шукану величину, проаналізувати її, щоб переконатися, що вона відповідає умові задачі.

У посібнику наведено таку кількість задач, яка охоплює практично всю програму з розділів «Магнітне поле» та «Явище електромагнітної індукції» і дає змогу кожному студенту працювати за окремим варіантом. Запропоновано 20 приблизно однакових за складністю варіантів, кожен з них складається з 8 задач. Номер варіанту для студента визначає викладач.

1. ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Відповідно до діючих навчальних програм підготовки бакалаврів, студенти, вивчаючи фізику, повинні засвоїти наведений нижче матеріал з розділів «Магнітне поле» та «Явище електромагнітної індукції».

Номер лекції	Перелік змістовних модулів, тем лекцій, їх анотації
Змістовний модуль 11. СТАТИЧНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ.	
21	Тема 21 Магнітне поле. Магнітна взаємодія струмів. Сила Ампера. Магнітне поле і його характеристики. Сила Лоренца. Магнітне поле провідника зі струмом. Закон Біо-Савара-Лапласа, його застосування. Магнітний момент витка зі струмом.
22	Тема 22. Намагнічування речовини. Намагнічування речовини. Типи магнетиків. Вектор намагнічування. Магнітна проникливість середовища. Феромагнетики.
23	Тема 23 Робота по переміщенню провідника у магнітному полі. Магнітний потік Циркуляція магнітної індукції. Поле соленоїда. Робота по переміщенню витка зі струмом в магнітному полі. Магнітний потік.
Змістовний модуль 13. ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ. ДИНАМІЧНЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ.	
24	Тема 25. Явище електромагнітної індукції. Явище електромагнітної індукції. Закон Фарадея-Максвелла. Самоіндукція і взаємоіндукція. Індуктивність. Об'ємна густина енергії магнітного поля.

2. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

2.1. Основна

Детлаф, А.А. Курс фізики [Текст] / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: ВШ, 1989.

Курс фізики [Текст]; за ред. І.С.Лопатинського. – Львів: Бескид-Біт, 2002.

Нікіфоров, Ю.М. Фізика: конспект вибраних лекцій для студентів заочної форми навчання. Видання третє, доповнене [Текст] / Ю.М. Нікіфоров. – Тернопіль: ТНТУ, 2011. – 176 с.

Пундик, А.В. Курс фізики: опорний конспект лекцій для студентів заочної форми навчання (електрика та магнетизм) [Текст] / А.В. Пундик. – Тернопіль: ТДТУ, 2003.

Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст] / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1982, – Т. 1 – 3.

Сивухин, Д.В. Общий курс физики [Текст] / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977 – 1987. – Т. 1 – 5.

Трофимова Т.И. Курс физики для студентов вузов [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: Высшая школа, 1985. – 432 с.

Яворський, Б.М. Курс фізики [Текст] / Б.М. Яворський. – К.: ВШ, 1972, – Т. 1 – 3.

1. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики [Текст] / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука, 1979. – 352 с.

2. Загальний курс фізики: збірник задач [Текст] / І.П. Гаркуша, І.Т. Горбачук, В.П. Курінний та ін.; за заг. ред. І.П. Гаркуші. – К.: Техніка, 2003. – 506 с.

2.2. Додаткова

1. Бушок, Г.Ф. Курс фізики [Текст] / Г.Ф. Бушок, Г.Ф. Півень. – К.: Вища школа, 1981. – 408 с.

Джанколи, Дж. Физика [Текст] / Дж. Джанколи. – М.: Мир, 1989. – Т. 1,2.

2. Матвеев, А.Н. Молекулярная физика [Текст] / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1987. – 360 с.

Пундик, А.В. Електрика та магнетизм: методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу фізики [Текст] / А.В. Пундик – Тернопіль: ТНТУ, 2010.

3. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: ВШ, 1991.

4. Фирганг, Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики [Текст] / Е.В. Фирганг. – М.: Высшая школа, 1978. – 352 с.

5. Чертов, А.Г. Задачник по физике: учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – 5-е изд. пер. и доп. – М.: Высшая школа, 1988. – 527 с.

Розділ 1. СТАТИЧНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ

§1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ДОВІДНИК

1.1. Магнітна індукція. Сили Лоренца і Ампера

Магнітна взаємодія струмів

Орієнтаційна дія магнітного поля Землі на стрілку компаса (зробленої з магнетика, яким в природі є Fe_3O_4) відома давно. Але лише на початку 19 ст. Ерстед виявив аналогічну властивість для провідників зі струмом (рис. 1, а). Наступні досліди Ампера виявили особливу взаємодію двох провідників зі струмом, що не екранується металевою сіткою (рис. 1, б та рис. 1, в).

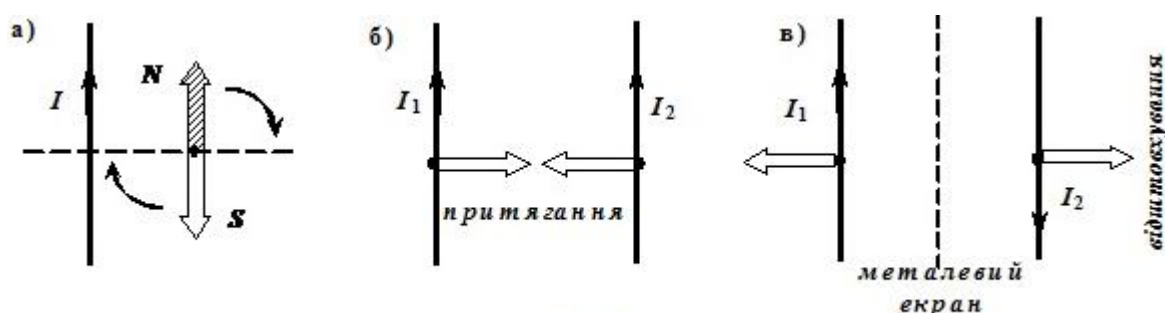


Рис. 1

Таким чином було доведено, що рухомі заряди (струми) здатні породжувати в просторі магнітне поле, подібно до природних джерел такого поля, і це поле діє з певною силою на контур зі струмом. Формулювання аналітичного виразу для так званих магнітних сил можливе на основі аналогії з електричними силами. Відомо, що математичний вираз сили взаємодії між двома тонкими прямолінійними паралельними провідниками, по яких тече струм, було встановлено експериментально і має вигляд:

$$F_{12} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{r} \Delta l, \quad (1)$$

де F_{12} – сила, з якою провідник, із силою струму I_1 , діє на елемент довжиною Δl провідника, по якому тече струм силою I_2 . Знак «мінус» показує, що при однакових напрямках I_1 і I_2 між провідниками діє сила притягання; якщо напрямки I_1 і I_2 протилежні, то виникає сила відштовхування.

Якщо об'єкти не діють один на одного безпосередньо, але між ними виникають сили взаємодії, то, за аналогією із електростатикою, робимо висновок, що ці об'єкти створюють в просторі поля, які і діють на відповідні

об'єкти. Тому аналогічно з польовим трактуванням кулонівської взаємодії процес виникнення сили (1) пояснюється так:

- а) струм I_l створює у оточуючому просторі магнітне поле (МП);
- б) МП діє на струми чи заряди.

Вектор індукції магнітного поля. Сила Лоренца.

Дослід показує, що на заряджену частинку, яка влітає зі швидкістю \vec{v} в МП, діє сила \vec{F} , яка характеризується такими ознаками:

- 1) \vec{F} перпендикулярна до швидкості \vec{v} заряджених частинок;
- 2) \vec{F} перпендикулярна до визначеного напрямку у просторі, де існує МП;

3) для всіх частинок відношення $\frac{|\vec{F}|}{qv_{\perp}}$ є однаковим, де $|\vec{F}|$ – модуль розглядуваної сили; q - заряд частинки; v_{\perp} - перпендикулярна складова швидкості до вказаного вище напрямку у просторі, в якому існує МП.

Оскільки в просторі, де існує МП, є деякий виділений напрямок, з яким зв'язана сила, що діє на рухомий заряд, то для опису цієї сили вводимо векторну характеристику МП.

Те, що для всіх частинок, який би не був у них заряд q і яка б не була у них складова швидкості v_{\perp} , залишається постійним відношення $\frac{|\vec{F}|}{qv_{\perp}}$, говорить

про те, що саме ця величина є *характеристикою* МП і називається *магнітною індукцією*. Отже, **магнітна індукція** – це вектор, рівний за модулем $|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}|}{qv_{\perp}}$ і напрямлений перпендикулярно до площини, утвореної векторами \vec{v} і \vec{F}

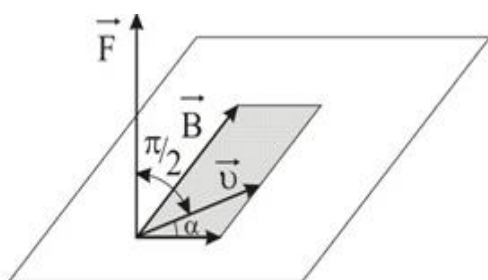


Рис. 2

Із співвідношення $|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}|}{qv_{\perp}}$ знаходимо

(рис.2):

$$|\vec{F}| = |qv_{\perp} \vec{B}| = qv \cos \alpha |\vec{B}| = q|\vec{v}| |\vec{B}| \sin(90^{\circ} - \alpha)$$

Модуль сили \vec{F} дорівнює модулю векторного добутку векторів \vec{v} і \vec{B} ,

помноженому на q . Як видно із рис. 2, сила \vec{F} напрямлена перпендикулярно до площини, яку утворюють вектори \vec{v} і \vec{B} .

Отже, сила, яка діє на заряд q , що рухається у МП, являє собою векторний добуток векторів \vec{v} і \vec{B} , помножений на q

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (2)$$

Ця сила напрямлена завжди перпендикулярно до швидкості руху зарядженої частинки і отже, ніколи не виконує роботу при русі заряду в МП.

Якщо ж ЕП і МП діють на заряд q незалежно, то при сумісній дії ЕП і МП виникає сила $\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m$, тобто

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{v}\vec{B}]). \quad (3)$$

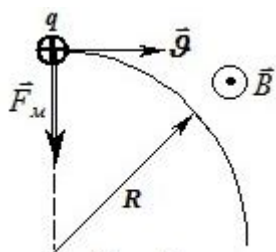


Рис. 3

Ця сила називається силою Лоренца.

Зауважимо, що: 1) магнітна сила $\vec{F}_m \perp \vec{v}$ і тому не виконує роботи над зарядом, що рухається (а лише змінює траєкторію руху - рис. 3); 2) магнітна складова сили Лоренца \vec{F}_m змінюється при переході від одної інерційної

системи відліку до другої (а повна сила Лоренца (3) не змінюється!); 3) вираз (3) справедливий для постійних і змінних полів та при будь-яких \vec{v} (навіть релятивістських).

Практичними проявами сили Лоренца є: 1) радіаційні пояси заряджених частинок космічного походження навколо Землі; 2) принцип роботи циклічного прискорювача частинок (циклотрона); 3) ефект Холла; 4) спосіб вимірювання маси заряджених частинок у мас-спектрометрах; 5) принцип роботи електромагнітної помпи в системі штучного кровообігу тощо.

У нерелятивістському наближенні сила Лоренца, як і всяка інша сила не залежить від вибору інерціальної системи відліку (ІСВ). Але другий доданок у (3) змінюється при переході від однієї СВ до іншої. Тому змінюється і перший доданок $q\vec{E}$. Отже, поділ повної сили \vec{F} на електричну і магнітну залежить від вибору СВ.

Силу Лоренца не можна розглядати як звичайний вектор, який визначається трьома проекціями на осі координат. Вона визначається шістьма

компонентами – проєкціями векторів \vec{v} і \vec{B} . Такі вектори називаються аксіальними (на відміну від полярних).

Магнітна взаємодія між рухомими зарядами є релятивістським ефектом. Це є доказом фундаментальної єдності законів природи.

При протіканні струму по малому відрізку тонкого дроту напрямком вектора \vec{B} визначається за правилом правого гвинта (свердлика): правий гвинт слід обертати так, щоб його переміщення співпадало з напрямком протікання струму; при цьому дотична до головки гвинта у кожній точці співпадатиме з напрямком вектора магнітної індукції (рис. 4 а).

Принцип суперпозиції магнітних полів: індукція магнітного поля у заданій точці простору, створеного декількома провідниками зі струмом, дорівнює сумі векторів магнітної індукції, створених кожним з них у цій точці:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i. \quad (4)$$

Індукцію магнітного поля вимірюють у **теслах** (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ кз/А} \cdot \text{с}^2$.

Сила Ампера

Дослідами з рухомим контуром Ампер показав, що магнітна дія на провідник зі струмом залежить від добутку $I \cdot d\vec{l}$ (названого *елементом струму*), де $d\vec{l}$ - вектор, що зображає невеликий відрізок провідника за напрямком струму, I – сила струму. Елемент струму, таким чином, відіграє ту ж роль в означенні магнітних сил, що і електричний заряд в означенні електричних сил. По аналогії з електростатикою, можемо записати для магнітної сили (сили Ампера), що діє на елемент струму,

$$d\vec{F}_m = I \cdot [d\vec{l} \times \vec{B}]. \quad (5)$$

Якщо лінії індукції магнітного поля лінійного провідника побудувати за орієнтацією магнітних стрілок (рис. 4, а), то притягання двох

паралельних провідників зі струмом легко пояснюється на основі (5) (рис. 4, б).

Сила Ампера \vec{F}_A діє на провідник зі струмом, який знаходиться у зовнішньому магнітному полі. У випадку, коли в однорідному магнітному полі

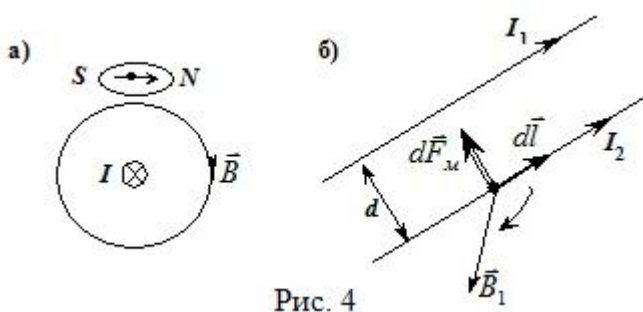


Рис. 4

з індукцією \vec{B} знаходиться відрізок тонкого провідника довжиною l , по якому тече струм I , на нього діє сила $\vec{F}_A = IBl \sin \alpha$, де α - кут між напрямком струму та вектором \vec{B} . У тонкому провіднику струм тече вздовж осі, отже α - це кут між віссю провідника та вектором \vec{B} .

Напрямок вектора \vec{F}_A визначається таким же чином, як і напрямок магнітної складової \vec{F}_m сили Лоренца. За напрямком струму приймається напрямок руху позитивних зарядів. Характерним проявом сили Ампера є робота двигуна постійного струму.

1.2. Закон Біо - Савара - Лапласа

Аналогія між елементом струму і точковим зарядом у задачі про джерела поля дозволяє подати магнітне поле елемента струму $I \cdot d\vec{l}$ у деякій точці з

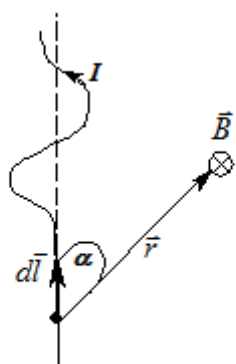


Рис. 5

(6)

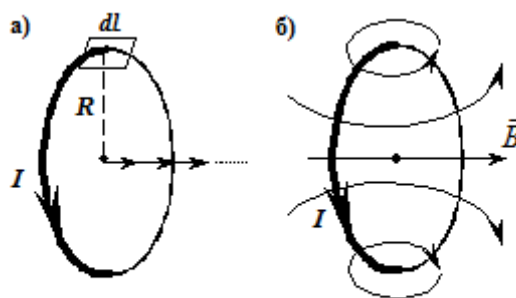


Рис. 6

радіус-вектором \vec{r} у вигляді (закон Біо - Савара - Лапласа)

$$d\vec{B} = k \frac{I \cdot [d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}$$

де в системі одиниць СІ $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ (μ_0 – магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$). Магнітне поле будь-якого струму тепер може бути підраховане як векторна сума (суперпозиція) полів, створених окремими елементарними ділянками цього струму (рис. 5). Таке сумування зводиться до інтегрування вздовж контуру зі струмом. Так, магнітне поле в центрі колового витка (рис. 6, а) рівне

$$B = \int_{(L)} dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I}{2R}, \quad (7)$$

а напрямок \vec{B} задається правилом правого свердлика. Підсумкова картина поля витка зі струмом зображена на рис. 6, б.

Магнітний момент витка зі струмом

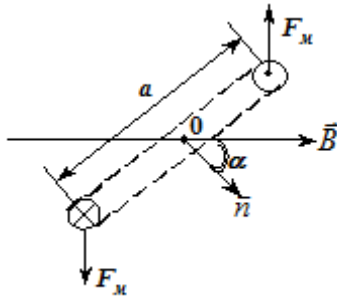


Рис. 7

Магнітне поле орієнтує контур зі струмом у просторі подібно до того, як електричний диполь орієнтується в електричному полі. Для формулювання моменту сил, що спричиняють таку орієнтацію, розглянемо квадратну рамку зі струмом в однорідному магнітному полі (рис. 7). Момент магнітних сил F_m відносно точки

O рівний $M = F_m \cdot a \cdot \sin \alpha \Rightarrow I \cdot a^2 \cdot B \cdot \sin \alpha \Rightarrow p_m \cdot B \cdot \sin \alpha$, або у векторній формі

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \quad (8)$$

де вектор $\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n}$ називають магнітним моментом витка (S – площа витка, \vec{n} – додатна одинична нормаль, $[p_m]=1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$). Величина обертового моменту не залежить від форми контуру, а лише від значення p_m . Значимість поняття магнітного моменту підкреслюється тим, що всі елементарні частинки характеризуються власним магнітним моментом.

Під впливом моменту \vec{M} вільний контур зі струмом в магнітному полі займає положення, для якого \vec{p}_m є паралельним до \vec{B} . Виток зі струмом можна розглядати, таким чином, як магнітний диполь (подібно до електричного диполя чи магнітної стрілки компаса).

1.3. Закон повного струму

Важливою властивістю статичного електричного поля \vec{E} його потенціальність: $\int_1^2 \vec{E}_t d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2 \Rightarrow \oint_{(L)} \vec{E}_t d\vec{l} = 0$ для довільного замкнутого

контуру L . У випадку статичного магнітного поля лінійного струму подібний контурний інтеграл для вектора \vec{B} (циркуляція вектора індукції поля) рівний (рис. 8)

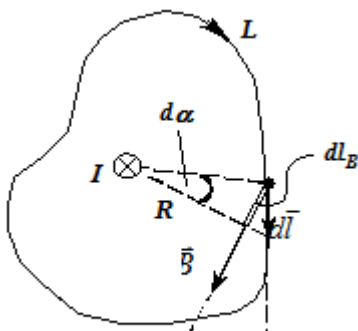


Рис. 8

$$\oint_{(L)} \vec{B}_t d\vec{l} \Rightarrow \oint_{(L)} \vec{B} d\vec{l} = \int_{(L)} B \cdot R d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha = \mu_0 I;$$

або, у загальному випадку, «циркуляція вектора індукції магнітного поля вздовж деякого замкнутого контуру рівна добуткові магнітної сталої на алгебраїчну суму струмів, що охоплюються цим

контуром» (закон повного струму):

$$\oint_{(L)} \vec{B}_1 d\vec{l} = \mu_0 \sum_{(k)} I_k, \quad (9)$$

де додатний знак струму визначається напрямком обходу контуру L за правилом свердлика. Сформульована теорема пов'язує магнітне поле з його джерелом (струмами), еквівалентна закону Біо – Савара - Лапласа і служить

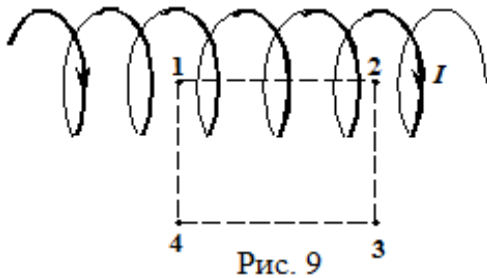


Рис. 9

методом розрахунку поля контурних струмів.

Так, для безмежно довгого соленоїда (рис. 9) отримуємо (з міркувань симетрії \vec{B} паралельний осі соленоїда та спадає з віддаллю за межами обмотки)

$$\oint_{(L)} \vec{B}_1 d\vec{l} \Rightarrow B \int_1^2 dl \Rightarrow Bl_{12} = \mu_0 N_{12} I; B = \mu_0 \frac{N}{l} I, \quad (10)$$

де N – число витків на ділянці соленоїда довжиною l . Поле безмежного соленоїда однорідне і зосереджене в об'ємі соленоїда (аналогія із полем площинного конденсатора).

1.4. Магнітне поле в речовині

При перенесенні провідника зі струмом в середовище його магнітне поле змінюється – речовина намагнічується. Базовою ідеєю при поясненні намагнічування стала *гіпотеза Ампера про молекулярні струми* (мікроскопічні кільцеподібні струми, що відображають магнітну поведінку атома чи молекули

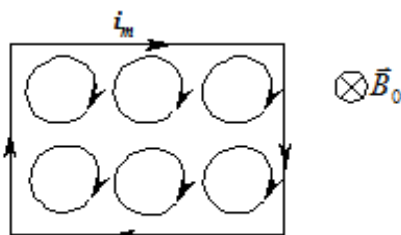


Рис. 10

та існування яких пов'язується з їх внутрішньою будовою). В присутності зовнішнього магнітного поля \vec{B}_0 такі молекулярні струми впорядковуються (рис. 10), що веде до появи набутого магнітного моменту в кожному елементі об'єму речовини

(характеризується вектором намагнічення \vec{J}_m):
$$\vec{J}_m = \frac{\sum \vec{P}_m}{\Delta V}, \quad (11)$$

де $[J_m] = 1$ А/м. Це можна формально пов'язати з існуванням деяких наведених поверхневих струмів i_m , які створюють в магнетиках додаткове поле \vec{B}' :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'. \quad (12)$$

На основі формули соленоїда (10) формально запишемо

$$B' = \mu_0 \frac{N}{l} i_m \Rightarrow \mu_0 \frac{N \cdot i_m \cdot S}{\Delta V} \Rightarrow \mu_0 \cdot J_m, \text{ а для поля в об'ємі магнетика маємо}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \cdot \vec{J}_m. \quad (13)$$

Для більшості речовин $J_m \sim B_0$, що зображають співвідношенням

$$\vec{J}_m = \chi \cdot \vec{H}, \quad (14)$$

де $\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}_0$ (напруженість магнітного поля), а χ - магнітна сприйнятливість

$$\text{речовини. Маємо, } \vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (15)$$

$$\text{де } \mu = 1 + \chi \text{ (магнітна проникність речовини) та } \mu = \frac{B}{B_0}. \quad (16)$$

Вектор \vec{H} зображає поле макроскопічних струмів (тих, що породжують індукцію \vec{B}_0) і використання його спрощує записи багатьох важливих формул; $[H]=1$ А/м. Лінії напруженості \vec{H} є неперервними на межі магнетика.

За законом Біо – Савара - Лапласа елемент контуру dl , у якому протікає струм I , створює в деякій точці A простору магнітне поле з напруженістю $dH = \frac{I \sin \alpha dl}{4\pi r^2}$, де r – відстань від елемента струму dl до точки A , α – кут між радіус-вектором r і елементом струму dl . Застосовуючи закон Біо – Савара - Лапласа до контурів різних типів, можна знайти:

а) напруженість магнітного поля, створеного нескінченно довгим прямолінійним провідником $H = \frac{I}{2\pi \cdot b}$, де b – відстань від точки, де визначається напруженість, до провідника зі струмом.

б) напруженість магнітного поля на осі колового струму $H = \frac{R^2 I}{2(R^2 + r^2)^{3/2}}$, де R – радіус колового контуру зі струмом I , r – відстань від точки, де визначається напруженість, до площини контуру.

в) напруженість магнітного поля всередині тороїду та нескінченно довгого соленоїда $H = In$, де n - кількість витків на одиницю довжини соленоїда.

г) напруженість магнітного поля на осі соленоїда скінченної довжини

$$H = \frac{In}{2} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2),$$

де β_1 і β_2 – кути між віссю соленоїда і радіус-вектором, проведеним із розглядуваної точки до кінців соленоїда.

Класифікація магнетиків

Для діелектриків проникність $\varepsilon \geq 1$ і поле всередині завжди послаблюється у порівнянні із зовнішнім. Для магнетиків простий дослід (рис. 11) виявляє певну відмінність в характері намагнічення різних речовин:

$\mu > 1$ – парамагнетизм (Al, Pt, ...);

$\mu < 1$ – діамагнетизм (H₂O, NaCl, органічні речовини, ...);

$\mu \gg 1$ – феромагнетизм (Fe, Ni, Co, ...).

Ця відмінність пов'язується з проявами різних механізмів намагнічування

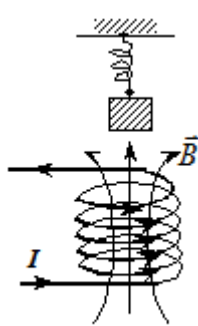


Рис. 11

в тій чи іншій речовині. Так, парамагнетизм можна пояснити на основі моделі молекулярних струмів – як впорядкування відповідних магнітних моментів. Діамагнетизм пов'язується з наведеними в електронній хмарі атомів і молекул коловими струмами. Ці струми породжують, згідно правила Ленца для електромагнітної індукції, магнітне поле, протилежне до

зовнішнього.

Феромагнетики

Феромагнітні речовини характеризуються наступним: 1) мають велике значення магнітної проникності ($\mu \sim 10^4$); 2) значення μ не є сталою величиною, а залежить від величини зовнішнього магнітного поля; 3) їм властива «магнітна пам'ять», або залишкове намагнічення, яке проявляється у подальшій поведінці магнетика у полі (магнітний гістерезис); 4) вище деякої критичної температури (точки Кюрі) феромагнетики переходять у стан звичайного парамагнетика. Перераховані особливості пов'язуються із наявністю у феромагнетиків областей спонтанного (самочинного) намагнічення.

§2 Приклади розв'язання типових задач

Задача 1. Протон рівномірно обертається у вакуумі по коловій орбіті, площина якої перпендикулярна до напрямку магнітного поля, з кутовою швидкістю $\omega = 10^8 \text{ рад/с}$. Знайдіть величину індукції магнітного поля (рис. 3).

Розв'язування. Доцентрова сила при коловому русі протона є силою Лоренца, яка діє з боку магнітного поля, тобто, за другим законом Ньютона:

$$F_m = \frac{m\vartheta^2}{R} = e\vartheta B,$$

де $\vartheta = \omega R$ - лінійна швидкість колового руху вздовж: кола радіуса R причому враховано, що заряд протона дорівнює зарядові електрона e (за абсолютною величиною). Звідси:

$$B = \frac{m\vartheta}{eR} = \frac{m\omega}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 10^8 \text{ рад/с}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} \approx 1 \text{ Тл}.$$

Відповідь: $B = 1 \text{ Тл}$.

Задача 2. Частинка з масою m та від'ємним зарядом q влітає у магнітне

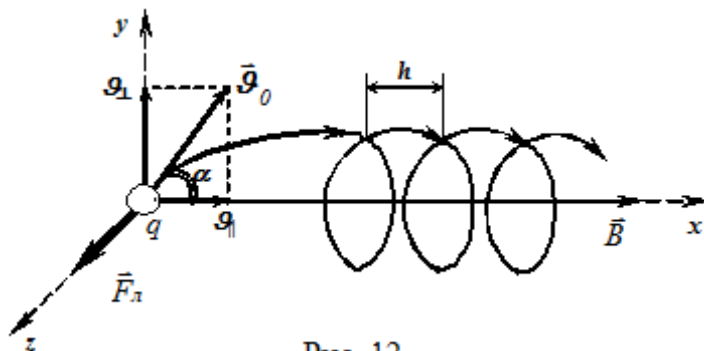


Рис. 12

поле з початковою швидкістю ϑ_0 під кутом α до напрямку вектора індукції \vec{B} . Знайти крок гвинтової лінії, вздовж якої рухатиметься частинка (рис.12).

Розв'язування. Оскільки сила Лоренца перпендикулярна

до вектора \vec{B} , то складова сили вздовж \vec{B} відсутня. Відповідно, вздовж \vec{B} немає прискорення і компонента швидкості заряду $\vartheta_{||} = \vartheta_0 \cos \alpha$, що паралельна \vec{B} (див. рис. 12), залишається незмінною.

Розглянемо тепер проекцію траєкторії частинки на площину, перпендикулярну \vec{B} . У цій площині рух відбувається незалежно від $\vartheta_{||}$, тобто таким же чином, як за відсутності поздовжньої компоненти швидкості: заряд обертається по колу, (див. попередню задачу), причому радіус колового руху R знаходимо з рівняння для доцентрової сили:

$$\frac{m g_{\perp}^2}{R} = q g_{\perp} B \Rightarrow \omega = \frac{g_{\perp}}{R} = \frac{qB}{m},$$

отже, період обертання $T = \frac{2\pi m}{qB}$.

За час T частинка переміститься вздовж вектора \vec{B} на відстань

$$h = \frac{2\pi m g_0 \cos \alpha}{qB}, \text{ яка і є кроком гвинтової лінії.}$$

Відповідь: $h = \frac{2\pi m g_0 \cos \alpha}{qB}$.

Задача 3. У точках A та C , розділених на колі дугою 90° у площині кола розміщені два однакових магніти, причому вісь кожного проходить через центр кола. Знайдіть модуль індукції $|\vec{B}| = B$ магнітного поля у центрі кола, якщо за відсутності магніту у точці C індукція у центрі кола була 1 Тл .

Розв'язування. Поля обох магнітів однакові за абсолютною величиною, а кут між ними - 90° . Враховуючи принцип суперпозиції та обчислюючи суму векторів \vec{B} за правилом паралелограма, маємо $B = \sqrt{2} Tл \approx 1,4 Tл$.

Відповідь: $B = \sqrt{2} Tл \approx 1,4 Tл$.

Задача 4. Прямокутна рамка $AECD$ площею $S = 0,01 \text{ м}^2$ зі струмом $I = 1 \text{ А}$ може обертатись навколо осі OO_1 (рис. 13). Вектор індукції магнітного поля

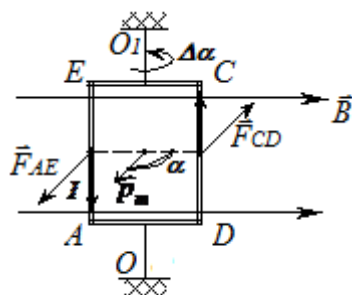


Рис. 13

величиною $B = 1 \text{ Тл}$ лежить у площині рамки і паралельний EC . Знайдіть момент сили Ампера, що діє на рамку, відносно OO_1 .

Розв'язування. Сила Ампера \vec{F}_{AE} , яка діє на сторону AE , перпендикулярна площині рисунка, і діє на нас. Сила \vec{F}_{CD} , яка діє на CD також перпендикулярна площині рисунка, але діє у напрямку від нас. Нехай $AE = a$, $EC = b$. Плече сили \vec{F}_{AE} відносно OO_1 рівне $b/2$, тому момент цієї сили відносно OO_1 становитиме:

$$M_{AE} = \frac{F_{AE} b}{2} = \frac{IaBb}{2}.$$

Сила \vec{F}_{CD} створює такий самий момент і обертає рамку в такому ж напрямі, що й \vec{F}_{AE} (проти годинникової стрілки, якщо дивитись з боку O_1).

Сили, що діють на EC та AD не дають внеску у момент. Сумарний момент дорівнює $M = M_{AE} + M_{CD} = IabB = ISB$. $M = 1A \cdot 0,01\text{м}^2 \cdot 1\text{Тл} = 0,01\text{Н} \cdot \text{м}$.

Відповідь: $M = 0,01\text{Н} \cdot \text{м}$.

Задача 5. На двох товстих паралельних металевих шинах, які утворюють кут $\theta = 30^\circ$ з горизонтом, лежить металева перетинка маси $m = 10 \text{ г}$, розташована перпендикулярно до шин (рис. 14). Вся конструкція знаходиться у вертикальному магнітному полі з індукцією $B = 100 \text{ мТл}$. Знайти мінімальну силу струму I , який треба пропустити по перетинці, щоб вона почала рухатись вгору по шинах. Довжина перетинки $l = 10 \text{ см}$, коефіцієнт тертя між нею та шинами $\mu = 0,1$.

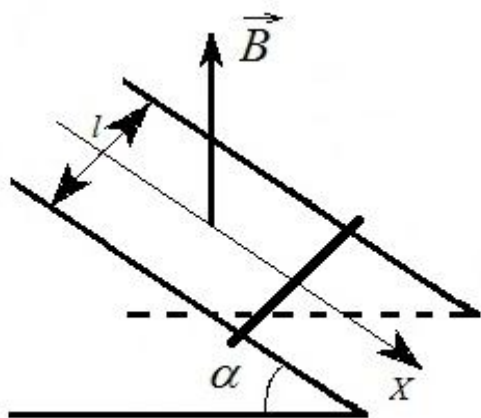


Рис. 14

Розв'язування. Для того, щоб металева перетинка почала рухатися вгору, на неї повинна діяти сила, яка має складову вздовж осі Ox (рис. 14). Такою силою у даному випадку може бути лише сила Ампера \vec{F}_A за умови, що струм напрямлений перпендикулярно до площини рисунка «на нас». Напрямок вектора \vec{F}_A визначається за

правилом лівої руки, а його модуль дорівнює $F_A = IBl$. (1)

Крім сили Ампера на перетинку діють: сила тяжіння $m\vec{g}$, сила нормальної реакції опори \vec{N} та сила тертя \vec{F}_T . За другим законом Ньютона сума векторів діючих на перетинку сил дорівнює $m\vec{a}$, але якщо перетинка почала рухатися, можна вважати $a = 0$, тобто, $\vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_T = 0$.

У проекціях на координатні осі маємо:

$$Ox: F_A \cos \alpha - mg \sin \alpha - F_T = 0, \quad (2)$$

$$Oy: -F_A \sin \alpha - mg \cos \alpha + N = 0. \quad (3)$$

Сила тертя ковзання $F_T = \mu N$, тому знайшовши N із рівняння (3) і підставивши його у (2), а також врахувавши вираз (1) маємо:

$$IBl \cos \alpha - mg \sin \alpha - \mu (IBl \sin \alpha + mg \cos \alpha) = 0.$$

Після нескладних перетворень знаходимо:

$$I = \frac{mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{Bl(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)} = \frac{10^{-2} \cdot 9,8(\sin 30^\circ + 0,1 \cdot \cos 30^\circ)}{10^{-1} \cdot 0,1(\cos 30^\circ - 0,1 \cdot \sin 30^\circ)} = 7,04 A.$$

Відповідь: $I = 7,04 A.$

Задача 6. Вздовж двох довгих паралельних провідників течуть однакові струми силою $I = 10 A$. Віддаль d між провідниками рівна 20 см . Знайти силу взаємодії струмів у розрахунку на 1 м довжини провідника.

Розв'язування. Сила, яка діє на елемент струму другого провідника зі сторони першого, рівна (рис.1, б та формули (1)) $\Delta F_m = I_2 \Delta l \cdot B_1$, або на одиницю довжини (використовуємо формулу поля лінійного провідника $B_1 = \mu_0 I_1 / 2\pi d$)

$$\frac{\Delta F_m}{\Delta l} = I_2 B_1 \Rightarrow \frac{\Delta F_m}{\Delta l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \Rightarrow \frac{\mu_0 I^2}{2\pi d} = 10^{-4} \text{ Н/м.}$$

Відповідь: 10^{-4} Н/м.

Задача 7. У замкнутому колі постійного струму $I = 20 A$ є ділянка у вигляді зігнутого під прямим кутом лінійного провідника достатньо великої довжини (впливом далеких від вершини кута ділянок можна нехтувати). Розрахувати магнітну індукцію в точці M (рис. 15, а), якщо $R = 5 \text{ см}$.

Розв'язування.

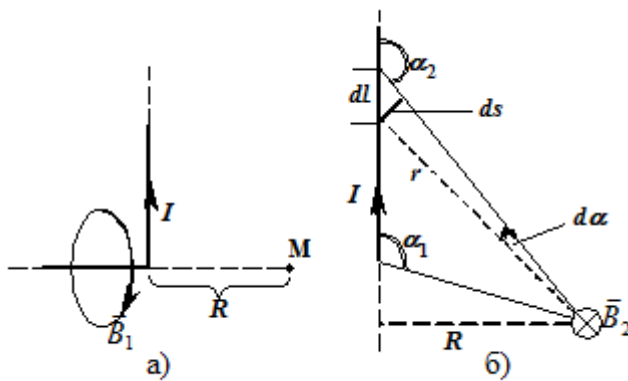


Рис. 15

Поле в т. M є векторною сумою поля \vec{B}_1 горизонтальної частини провідника і поля \vec{B}_2 його вертикальної частини. З форми силових ліній \vec{B}_1 випливає, що відповідний внесок в т. M , яка лежить на осі дротини, рівний нулю. Для

розрахунку поля вертикального відрізка (рис. 15, б) скористаємося законом Біо – Савара - Лапласа та підсумуємо внески окремих елементів струму:

$$B_2 = \int_{(L)} dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{(L)} \frac{dl \cdot \sin \alpha}{r^2} \Rightarrow \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

після заміни змінних $dl = \frac{ds}{\sin \alpha}$, $ds = r \cdot d\alpha$ та $r = \frac{R}{\sin \alpha}$.

$$\text{Остаточно, } B_m = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\cos 90^\circ - \cos 180^\circ) = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} = 40 \text{ мкТл.}$$

Відповідь: $B_m = 40$ мкТл

Задача 8. Рамка гальванометра, що містить $N = 200$ витків тонкого дроту, підвішена на пружній нитці. Площина рамки розміром $S = 1$ см² паралельна до ліній магнітної індукції величиною $B = 5$ мТл. Коли через гальванометр пропустили струм силою $I = 2$ мкА, рамка повернулась на кут $\Delta\alpha = 30^\circ$. Знайти постійну кручення C нитки.

Розв'язування. Механічний момент магнітних сил \vec{M} , що діють на рамку в полі \vec{B} , задається рівнянням (α - кут між \vec{p}_m і \vec{B} , який у вихідному положенні рамки рівний 90° , рис. 13) $\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] \Rightarrow M = NISB \sin \alpha$, а момент пружних сил закрученої нитки $M_{np} = C \cdot \Delta\alpha$. З рівності моментів, після повороту рамки на кут $\Delta\alpha$, знаходимо ($\sin(90^\circ - \Delta\alpha) = \cos \Delta\alpha$)

$$C = \frac{N \cdot I \cdot S \cdot B \cos \Delta\alpha}{\Delta\alpha} = 3,3 \text{ нНм/р\textcircled{d}}$$

Відповідь: $C = 3,3$ нНм/р\textcircled{d}.

Задача 9. У суцільному нескінченному циліндричному провіднику, який має радіус R , тече струм густини j . Розрахувати магнітне поле всередині провідника та за його межами.

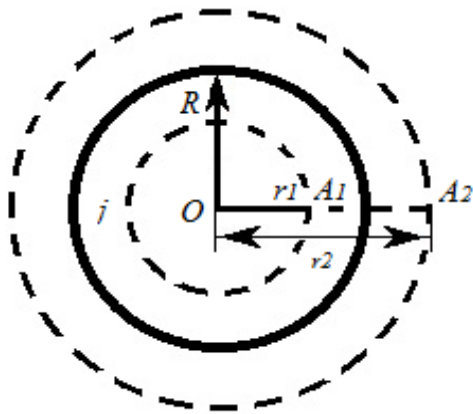


Рис. 16 а)

Розв'язування. Оскільки провідник не тонкий, то закон Біо - Савара - Лапласа та його наслідок застосовувати не можна. Використовуємо теорему про циркуляцію вектора \vec{B} . Розглянемо точку A , розташовану на відстані r_1 від осі провідника (рис. 16 а)). Проведемо коло радіусом r_1 з центром у точці O

на осі провідника. Внаслідок принципу симетрії модуль вектора B_1 , в кожній точці цього кола однаковий. Сума струмів $\sum I$ охоплена цим контуром (колом з радіусом r_1), дорівнює $j\pi r_1^2$. Таким чином, з теореми про циркуляцію вектора \vec{B} маємо $B_1 \cdot 2\pi r_1 = \mu_0 j\pi r_1^2$.

Звідси визначаємо модуль вектора B_1 магнітної індукції у точці A_1 : $B_1 = \frac{1}{2} \mu_0 j r_1$.

Розглянемо точку A_2 , розміщену на відстані $r_2 > R$ від осі провідника.

Застосовуючи теорему про циркуляцію, знаходимо: $B_2 \cdot 2\pi r_2 = \mu_0 j \pi R^2$.

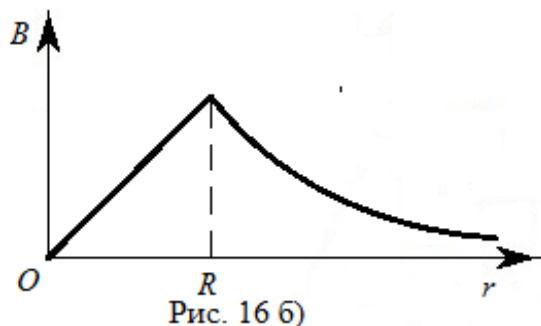


Рис. 16 б)

Звідси, магнітне поле поза провідником:

$$B_2 = \frac{\mu_0 j R^2}{2r_2}$$

Графік індукції магнітного поля суцільного циліндричного провідника зображений на (рис. 16 б).

Відповідь: $B_1 = \frac{1}{2} \mu_0 j r_1$, $B_2 = \frac{\mu_0 j R^2}{2r_2}$.

Задача 10. У тонкій прямій нескінченній стрічці шириною l тече струм. Сила цього струму дорівнює I . Розрахувати індукцію магнітного поля цього струму у довільній точці O (рис. 17).

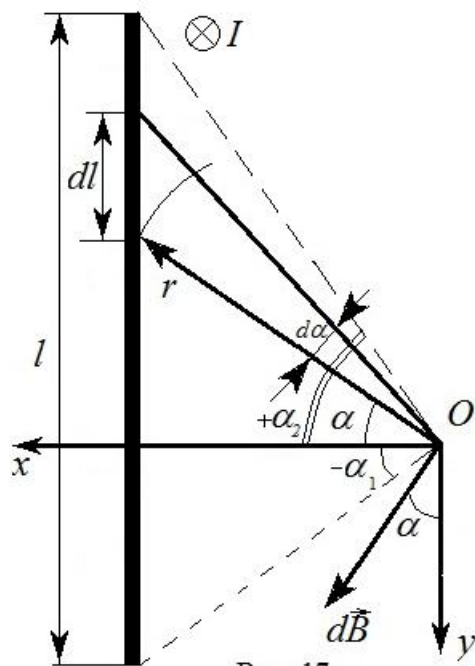


Рис. 17

Розв'язування. Зв'яжемо з точкою O систему координат, осі якої направимо, як показано на рис. 17. Для розрахунку магнітного поля застосуємо методи диференціального та інтегрального числення (безпосередньо застосовувати закон Біо - Савара - Лапласа та його наслідки не можна).

Розділимо нескінченну стрічку на настільки вузькі прямі і нескінченні ділянки, щоб кожна з них можна було прийняти за тонкий прямий нескінченний провідник.

Розглянемо одну таку ділянку провідника шириною dl (рис. 17). Елементарний

струм цієї ділянки $dI = \frac{dl}{l} I$ створює в точці O магнітне поле, модуль магнітної

індукції якого $dB = \frac{\mu_0 dl}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I dl}{2\pi r}$.

Нехай точка O віддалена від площини стрічки на відстань r_0 . Тоді

$$r = \frac{r_0}{\cos \alpha}, dl = \frac{r d\alpha}{\cos \alpha} = \frac{r_0 d\alpha}{\cos^2 \alpha}$$

Таким чином, $dB = \frac{\mu_0 I d\alpha}{2\pi l \cos \alpha}$.

Знайдемо проекції вектора dB на вісь OX та OY :

$$dB_x = dB \sin \alpha = \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{2\pi l \cos \alpha}, dB_y = dB \cos \alpha = \frac{\mu_0 I d\alpha}{2\pi l}.$$

Звідси після інтегрування отримаємо

$$B_x = \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_2} \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{2\pi l \cos \alpha} = \frac{\mu_0 I}{2\pi l} \ln \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2},$$
$$B_y = \int_{-\alpha_1}^{+\alpha_2} \frac{\mu_0 I d\alpha}{2\pi l} = \frac{\mu_0 I (\alpha_2 + \alpha_1)}{2\pi l}.$$

Ввівши струм на одиничну ширину стрічки $I_0 = I/l$, знайдемо

$$B_x = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \ln \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2}, B_y = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} (\alpha_2 + \alpha_1).$$

У випадку симетричного розташування точки O (при $\alpha_1 = \alpha_2$) маємо $B_x = 0, B_y = \mu_0 I_0 / \pi$. Для стрічки нескінченної ширини $B_x = 0, B_y = \mu_0 I_0 / 2$ (поле площини з рівномірно розподіленим струмом I).

Відповідь: $B_x = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \ln \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2}, B_y = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} (\alpha_2 + \alpha_1).$

Якщо індукція магнітного поля відома (або розрахована методами, розглянутими вище), то більшість завдань зводиться надалі до вирішення відповідних задач механіки (нерідко із застосуванням методів диференціального та інтегрального числення). Найбільш поширеними тут є завдання, зв'язані з поведінкою плоского контуру зі струмом у магнітному полі. Часто доводиться розраховувати сили і їхні механічні моменти, що діють на контур, знаходити роботу переміщення контуру у магнітному полі.

Задача 10. Струм I тече по довгому прямому провіднику, переріз якого має форму тонкої дуги довжиною l та радіусом R (рис. 18). Визначити індукцію магнітного поля в точці O .

Розв'язування. Легко побачити, що провідник не можна вважати ні тонким прямим провідником, ні елементом струму. Отже, ми не можемо безпосередньо використати закон Біо – Савара – Лапласа чи його наслідок.

Враховуючи те, що магнітне поле не симетричне, то використання теореми про циркуляцію вектора \vec{B} не дасть позитивного результату.

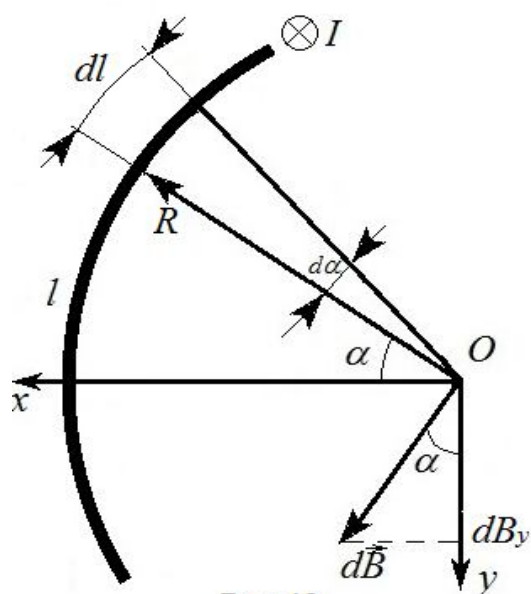


Рис. 18

Застосуємо методи диференціального та інтегрального числення. Розділимо провідник на настільки вузькі довгі прямі провідники, щоб кожен з них можна було вважати тонким довгим прямим провідником. Магнітне поле тонкого прямого нескінченного провідника визначається за формулою $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r_0}$ (1) Розглянемо один такий провідник шириною dl (рис. 18).

Елементарний струм цього провідника $dl = \frac{dl}{l} I$ в точці O створює магнітне

поле, елементарна магнітна індукція якого (за (1)) $dB = \frac{\mu_0 dl}{2\pi R} = \frac{\mu_0 Idl}{2\pi l R}$.

Легко побачити, що результуючий вектор \vec{B} напрямлений по осі OY (тобто $B_x = 0$). Проекція вектора dB на вісь OY $dB_y = \frac{\mu_0 Idl}{2\pi l R} \cos \alpha$.

Змінною інтегрування виберемо кут α . Враховуючи те, що $dl = R d\alpha$, то

$dB_y = \frac{\mu_0 I \cos \alpha d\alpha}{2\pi}$. Звідси після інтегрування отримуємо

$$B_y = \int_{-\alpha_0/2}^{+\alpha_0/2} \frac{\mu_0 I \cos \alpha d\alpha}{2\pi} = \frac{\mu_0 I}{\pi l} \sin \frac{\alpha_0}{2}, \quad (2)$$

де $\alpha_0 = l/R$ - центральний кут дуги l . Якщо $\alpha_0 = \pi$, то (2) дає $B_y = \frac{\mu_0 I}{\pi^2 R}$.

Відповідь: $B_y = \frac{\mu_0 I}{\pi^2 R}$.

Розділ 2. ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

§1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ДОВІДНИК

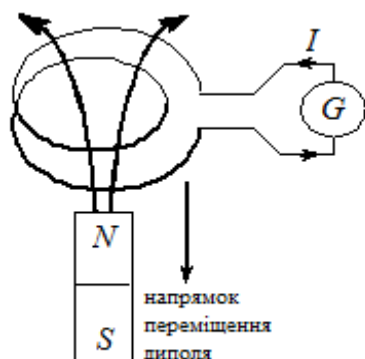


Рис. 1

2.1. Явище електромагнітної індукції

Електричні струми породжують магнітне поле.

Процес намагнічування речовини можна звести до впорядкування магнітних моментів (молекулярних струмів чи власних моментів електронів). Отже, магнетизм можна тлумачити як електричне явище (таке, що походить від руху зарядів). Але чи

реалізується зворотне – породження струмів магнітним полем? На поставлене питання дають відповідь досліди Фарадея (рис. 1): індукційні струми виникають тоді, коли провідник перетинає лінії магнітної індукції (останні є завжди замкнутими). При такому перетині змінюється число силових ліній, що пронизують контур (або змінюється магнітний потік – потік вектора магнітної індукції):

$$\Phi_B = B \cdot S \cdot \cos \alpha \Rightarrow \Phi_B = \int_{(S)} \vec{B}_n d\vec{S}, \quad (1)$$

де S – поверхня, обмежена контуром, а B_n зображає проекцію вектора індукції на нормаль до поверхні в точці перетину; $[\Phi_B] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб}$. Отже, суть явища електромагнітної індукції зводиться до наступного: «у будь-якому замкнутому контурі при зміні магнітного потоку, що пронизує контур, в останньому виникає індукційний струм» (формулювання Фарадея).

Напрямок індукційних струмів в експерименті на рис. 1 залежить від напрямку переміщення магнітного диполя і відповідає правилу Ленца: «індукційний струм у замкнутому контурі завжди напрямлений так, щоб протидіяти змінам магнітного потоку який пронизує цей контур».

2.2 Електрорушійна сила індукції

Отже, експериментально встановлено *дві якісно різних причини* появи індукційного джерела струму у провідному контурі в цілому або на його окремих ділянках:

1. дія **магнітної сили** \vec{F}_m на вільні заряди, які **рухаються** разом із ланками контуру щодо **стаціонарного магнітного поля** (МП): $\vec{F}_m = q[\vec{v} \times \vec{B}]$

де q – заряд носія струму ($q = -e$ у випадку металевого провідника);

\vec{v} – швидкість руху ланки контуру щодо МП (джерела МП);

\vec{B} – індукція МП в області руху ланки контуру.

2. дія **електричної сили** \vec{F}_e на вільні заряди ланок контуру, які перебувають в **стані спокою** щодо **нестационарного МП**: $\vec{F}_e = q\vec{E}$, де \vec{E} – напруженість вихрового ЕП, яке збуджується в області перебування ланки контуру під час зміни \vec{B} .

Візьмемо контур із рухомою перемичкою завдовжки l . Помістимо його у однорідне МП, яке перпендикулярне площині контуру і напрямлене за площину (рис. 2). Рухатимемо перемичку зі швидкістю \vec{v} . Із такою ж швидкістю будуть переміщатися відносно поля і носії струму – електрони. На кожен електрон діє сила: $\vec{F}_H = -e[\vec{v} \times \vec{B}]$, яка напрямлена вздовж перемички (рис. 4). Дія цієї сили еквівалентна дії на електрон електричного поля з напруженістю $\vec{E} = -e[\vec{v} \times \vec{B}]$.

Це поле не електростатичного походження. Його циркуляція по контуру дає величину е.р.с., яка індукується у контурі: $\mathcal{E}_i = \oint \vec{E} d\vec{l} = \oint [\vec{v} \times \vec{B}] d\vec{l} = \int_1^2 [\vec{v} \times \vec{B}] d\vec{l}$.

Виберемо нормаль як показано на рис. 2. Тоді потрібно обходити контур за годинниковою стрілкою, тому $d\vec{l}$ має напрямок, вказаний на малюнку.

$$\text{Отримаємо, } \mathcal{E}_i = [\vec{v} \times \vec{B}] \int_1^2 d\vec{l} = [\vec{v} \times \vec{B}] \vec{l}$$

$$\mathcal{E}_i = \vec{B}[\vec{l} \times \vec{v}] = \frac{\vec{B}[\vec{l} \times \vec{v} dt]}{dt} = \frac{-\vec{B}\vec{n}dS}{dt} = \frac{-d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

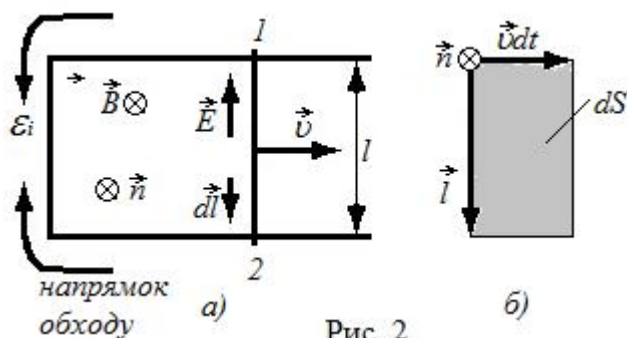


Рис. 2

Отримали, що \mathcal{E}_i та $\frac{d\Phi}{dt}$ мають протилежні знаки, або «е.р.с. індукції пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує контур» (закон Фарадея-Максвелла). Якщо магнітний потік лінійно

змінюється з часом, або розглядаються його зміни за досить короткі проміжки часу, то е.р.с. індукції записується у вигляді: $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, де $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ - зміна магнітного потоку за час Δt . В інтегральній формі (2) записується:

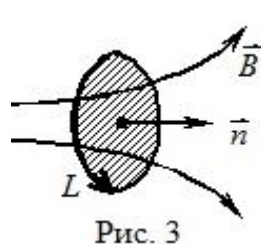


Рис. 3

$$\oint_{(L)} \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \left(\oint_{(S)} \vec{B}_n \cdot d\vec{S} \right), \quad (3)$$

де обхід контуру L , який обмежує поверхню S , та напрямок нормалі \vec{n} пов'язані правилом свердлика (рис. 3), а \vec{E} позначає напруженість поля сторонніх сил. Співвідношення (3) є формалізованим описом однієї із **фундаментальних властивостей ЕМП: нестационарне (змінне у часі) МП збуджує вихрове ЕП, для якого $\vec{E} \perp \Delta\vec{B}$, причому циркуляція напруженості ЕП по довільному контуру рівна з протилежним знаком швидкості зміни потоку магнітної індукції цього МП через довільну поверхню, натягнуту на контур** (перше основне положення теорії Максвелла).

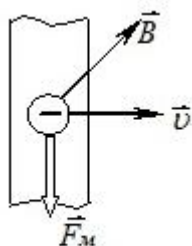


Рис. 4

У випадку переміщення провідника відносно джерела поля природа сторонніх сил зводиться до сили Лоренца (рис. 4). Якщо ж зміна магнітного потоку пов'язана зі зміною величини і напрямку поля \vec{B} , то явище електромагнітної індукції пояснюється на основі (3): «будь-яке змінне магнітне поле збуджує у просторі вихрове електричне поле». Замкнутість силових ліній \vec{E} для вихрового поля забезпечує відмінне від нуля значення контурного інтегралу у лівій частині (3).

Одиницею потоку магнітної індукції у SI є вебер (1 Вб), який являє собою потік через поверхню 1 м^2 , яку перетинають нормальні до неї лінії МП з магнітною індукцією, яка рівна 1 Тл . При швидкості зміни потоку $1 \text{ Вб}/\text{с}$ у контурі індукується е.р.с., рівна 1 В . Якщо маємо N витків, з'єднаних послідовно, то $\mathcal{E}_i = -\sum \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\sum \Phi)$.

Величину $\psi = \sum \Phi$ називають потокозчепленням, або повним магнітним потоком.

Якщо прямиий стержень довжиною l , орієнтований вздовж осі Ox рухається зі швидкістю \vec{v} вздовж осі Oy в однорідному магнітному полі з вектором індукції \vec{B} , напрямленому вдовж осі Oz , то е.р.с. індукції між кінцями стержня дорівнює $\mathcal{E} = Blv$.

У більш складних випадках, коли провідник, вектор індукції магнітного поля та вектор швидкості напрямлені під довільними кутами один до одного, треба спочатку знайти напрямок магнітної складової сили Лоренца \vec{F}_m відносно провідника (див. рис. 5.8). Тоді ЕРС індукції визначається за формулою

$$\mathcal{E} = \frac{(F_m \cos \alpha)l}{q}, \text{ або } \mathcal{E} = lBv \cos \alpha \sin \phi, \text{ де } \phi - \text{кут між векторами } \vec{B} \text{ і } \vec{v}.$$

При зміні магнітного потоку крізь площу замкненого контуру в ньому проходить заряд $q = \frac{1}{R}(\Phi_1 - \Phi_2)$, де R - опір контуру, Φ_1 , Φ_2 - початкове та кінцеве значення магнітного потоку.

2.3 Самоіндукція і взаємоіндукція

Явище електромагнітної індукції спостерігається завжди при зміні магнітного потоку, що пронизує контур. Тому будь-яка зміна струму у контурі генерує у ньому е.р.с. (явище самоіндукції). Для соленоїда, у якому тече струм силою I , що містить N витків на довжині l , потік Φ крізь контур можна пов'язати з величиною струму

$$\Phi = N \cdot \Phi_1 \Rightarrow N \cdot BS \Rightarrow \mu_0 \left(\frac{N}{l} \right)^2 \cdot I \cdot Sl, \text{ або}$$

$$\Phi = L \cdot I, \tag{4}$$

де L називають індуктивністю контуру (характеризує «зчеплення» власного магнітного поля з контуром); для соленоїда у вакуумі $L = \mu_0 \left(\frac{N}{l} \right)^2 V$, де V – об'єм соленоїда (там, в основному, зосереджене поле). Співвідношення (4) є універсальним для будь-якого контуру, тому індуктивність L є важливою його характеристикою (залежить від геометрії контуру і середовища); $[L] = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ Гн}$. Індуктивність соленоїда $L = \mu \mu_0 n^2 l S$, де l – довжина соленоїда, S – площа його поперечного перерізу, n – кількість витків на одиницю його довжини.

Рівняння для е.р.с. самоіндукції при $L = const$ має вигляд (за відсутності феромагнетиків)

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}, \quad (5)$$

тобто, велика індуктивність спричиняє велике значення е.р.с. Проявляється самоіндукція у сповільненні процесів встановлення і зникнення струмів у контурі з індуктивністю, у реалізації електромагнітних коливань в LC -контурі, через виникнення дуги у контактах потужного електромагніта при від'єднанні його від джерела живлення, тощо.

Між двома різними контурами зі струмом теж може існувати магнітний зв'язок

$$\Phi_2 = L_{21} \cdot I_1, \quad (6)$$

що веде до явища взаємоіндукції (L_{21} – коефіцієнт взаємної індукції). На ньому базується робота трансформатора напруги. Іншими важливими практичними застосуваннями відкриття Фарадея є: 1) принцип роботи генератора змінного струму 2) індукційні печі; 3) електромагнітні мікрофони, тощо.

2.4 Енергія магнітного поля

Самоіндукція, за правилом Ленца, протидіє зростанню струму у контурі при його проходженні. Робота джерела, затрачена на подолання цієї протидії, характеризує енергію магнітного поля струму. Відповідна елементарна робота рівна (при $L = const$, яка порушується для феромагнітного середовища)

$dA = I \cdot d\Phi \Rightarrow dA = LI \cdot dI$, що дає для магнітної енергії провідника зі струмом

$$W_m = \int_0^I dA = L \int_0^I I \cdot dI = \frac{LI^2}{2}, \quad (7)$$

де L - індуктивність провідника. Тоді для об'ємної густини енергії магнітного поля (Дж/м³) матимемо

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \Rightarrow \frac{(\vec{B}\vec{H})}{2} = \frac{\mu_0 H^2}{2} + \frac{(\vec{J}_m \vec{B}_0)}{2}, \quad (8)$$

де останній доданок $\frac{(\vec{J}_m \vec{B}_0)}{2}$ зображає енергію намагнічення одиниці об'єму середовища в зовнішньому полі \vec{B}_0 .

Внаслідок явища самоіндукції при розмиканні кола із джерелом е.р.с. сила струму спадає з часом за законом $I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$, а при вмиканні у коло джерела е.р.с. сила струму зростає за законом $I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)$, де R – опір кола, L – індуктивність котушки, I_0 – сила струму у початковий момент часу.

§2 Приклади розв'язання типових задач

Задача 1. Каркас із товстого дроту, зігнутий у вигляді літери П, встановлений під кутом $\theta = 30^\circ$ до горизонту (рис. 5) в однорідному магнітному полі $B = 0,5$ Тл, вектор індукції якого перпендикулярний до площини каркасу. Відстань між сторонами каркасу $l = 20$ см. По каркасу починає ковзати провідник, який розташований перпендикулярно до шин і має масу $m = 10$ г та опір $R = 10$ мОм. Знайти швидкість рівномірного руху провідника. Опором каркасу та тертям знехтувати.

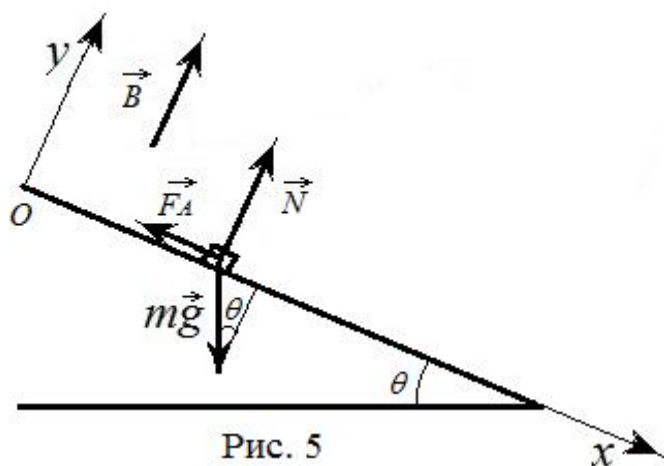


Рис. 5

Розв'язування. Каркас утворює похилу площину, у якій провідник починає рухатись під дією сили тяжіння $m\vec{g}$ та нормальної реакції опори \vec{N} (рис. 5).

Оскільки провідник рухається у магнітному полі, у ньому індукується е.р.с. $\mathcal{E}_i = Blv$ (за умовою задачі вектор \vec{B} перпендикулярний до площини каркасу та провідника). При цьому у замкнутому контурі, утвореному провідником та каркасом, тече струм, сила якого за законом Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{Blv}{R}. \quad (1)$$

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера $\vec{F}_A = IBl \sin \alpha$, де α – кут між напрямком струму та вектором \vec{B} , $\alpha = \pi/2$, $\sin \alpha = 1$. Ця сила за

правилом Ленца повинна перешкоджати руху провідника, тобто вектор \vec{F}_A має бути напрямлений проти вектора швидкості \vec{v} (рис. 5).

При русі провідника по похилій площині його швидкість зростає, відтак зростають е.р.с., сила струму i , відповідно, сила Ампера. Через деякий час швидкість провідника досягає такого значення, коли сума проєкцій сил на вісь Ox стає рівною нулю. Відповідна швидкість v є швидкістю рівномірного руху. За другим законом Ньютона для проєкцій сил маємо:

$$mg \sin \theta - F_A = 0 \Rightarrow mg \sin \theta = IBl.$$

Підставивши сюди вираз для сили струму (1), знаходимо:

$$mg \sin \theta = \frac{B^2 l^2 v}{R} \Rightarrow v = \frac{mgR \sin \theta}{B^2 l^2}. \text{ Перевіримо розмірність:}$$

$$[v] = \left[\frac{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{Ом}}{\text{Тл}^2 \cdot \text{М}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{Ом}}{\left(\frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}\right)^2 \cdot \text{М}^2} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{А}^2}{\text{кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = \frac{\text{Ом} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{Ом} \cdot \text{с}}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \text{М}}{\text{с}}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} \right] = \left[\frac{\text{М}}{\text{с}} \right].$$

$$\text{Обчислюємо: } v = \frac{10^{-2} \cdot 9,8 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5}{0,25 \cdot 0,04} \approx 0,05 (\text{м/с}).$$

Відповідь: $v = 0,05 (\text{м/с})$.

Задача 2. Потік через поверхню, обмежену контуром тонкого провідника з опором R , змінюється від Φ_1 до Φ_2 . Який заряд пройде при цьому через поперечний переріз провідника?

Розв'язування. У провіднику індукується е.р.с. і відповідний індукційний струм, абсолютну величину якого обчислимо за законом Ома:

$$I = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R} = \left| \frac{\Delta \Phi}{R \Delta t} \right|, \text{ де } \Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 - \text{ зміна потоку за час } \Delta t. \text{ Заряд, що}$$

проходить через переріз провідника за цей час у відповідності із означенням

$$\text{сили струму: } \Delta q = I \Delta t = \left| \frac{\Delta \Phi}{R \Delta t} \right| \cdot \Delta t = \left| \frac{\Delta \Phi}{R} \right|.$$

$$\text{Відповідь: } \Delta q = \left| \frac{\Delta \Phi}{R} \right|.$$

Задача 3. Квадратна рамка зі стороною $l = 1 \text{ см}$, що має $N = 10$ витків тонкого дроту, вміщена в магнітне поле, вектор \vec{B} якого утворює кут $\varphi = 30^\circ$ із

площиною рамки. До кінців дроту приєднаний гальванометр з опором $R = 10$ Ом. При вимиканні магнітного поля через гальванометр проходить заряд $q = 25$ мкКл. Знайти індукцію магнітного поля B . Опором дроту знехтувати.

Розв'язування. Кожний виток рамки, що знаходиться у магнітному полі, у вихідному стані пронизує магнітний потік $\Phi = BS \cos \alpha$, де $S = l^2$ - площа витка, α - кут між; перпендикуляром до площини витка та вектором \vec{B} . Цей кут та заданий в умові кут φ зв'язані співвідношенням $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi$, тому

$$\Phi_1 = Bl^2 \sin \varphi. \quad (1)$$

Після вимикання поля магнітний потік дорівнює нулю, тому $\Phi_2 = 0$. За законом електромагнітної індукції у кожному витку індукується е.р.с.

$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, а оскільки рамка має N витків, то е.р.с. у ній становить

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = N \frac{\Phi_1}{\Delta t}. \quad (2)$$

При наявності е.р.с. у замкнутому контурі тече струм $I = \mathcal{E}_i/R$ і за час Δt проходить заряд $q = I\Delta t = \mathcal{E}_i\Delta t/R$. Підставивши сюди вираз (2) для е.р.с., знаходимо $q = N \frac{\Phi_1}{R}$. Врахувавши вираз (1), остаточно одержимо

$$q = N \frac{Bl^2 \sin \varphi}{R} \Rightarrow B = \frac{qR}{Nl^2 \sin \varphi}.$$

$$\text{Перевіримо розмірність: } [B] = \left[\frac{\text{Кл} \cdot \text{Ом}}{\text{м}^2} = \frac{A \cdot \text{с} \cdot B}{\text{м}^2 \cdot A} = \frac{B \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Тл}]$$

$$\text{Обчислюємо: } B = \frac{2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10}{10 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5} = 0,5(\text{Тл}).$$

Відповідь: $B = 0,5\text{Тл}$.

Задача 4. Котушку з індуктивністю 3 Гн підключили до джерела е.р.с. $\mathcal{E}_0 = 15$ В. Опори джерела та котушки дуже малі. Через який час струм у котушці досягне величини 50 А?

Розв'язування. За відсутності зовнішнього магнітного поля е.р.с., що виникає у котушці, є е.р.с. самоіндукції, яка визначається формулою: $\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$,

Повна е.р.с. у колі складається з е.р.с. самоіндукції та е.р.с. джерела \mathcal{E}_0 .

За законом Ома для повного кола зі струмом I та опором R :

$$\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_c = RI, \text{ або підставивши вираз для } \mathcal{E}_c \text{ маємо } \mathcal{E}_0 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = RI.$$

$$\text{Для дуже малого } R \text{ маємо: } \mathcal{E}_0 = L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

$$\text{Отже, для зміни струму на } \Delta I \text{ потрібний час } \Delta t = L \frac{\Delta I}{\mathcal{E}_0} = \frac{3 \cdot 50}{15} = 10(c).$$

Відповідь: $\Delta t = 10c$.

Задача 5. У початковий момент сила струму I у тонкому провідному витку з індуктивністю L дорівнює нулю, причому зовнішній потік Φ_0 через поверхню, обмежену контуром витка, також дорівнює нулю. Потім потік зовнішнього поля починає швидко змінюватись за деяким законом $\Phi_0(t)$. Як буде змінюватись сила струму у витку, якщо опір дротів R дуже малий?

Розв'язування. Повний потік Φ через поверхню, натягнуту на виток, складається із зовнішнього потоку та потоку, який створюється індукційним струмом: $\Phi = \Phi_0 + LI$. За законом Ома для витка зі струмом $IR = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, а оскільки опір дуже малий, то з цього випливає, що загальний потік має залишитись майже незмінним:

$$\Delta \Phi = 0 \Rightarrow \Phi = \Phi_0 + LI = \text{const.}$$

Оскільки у початковий момент сила струму та потоки дорівнюють нулю, звідси отримуємо відповідь:

$$I(t) = -\frac{\Phi_0(t)}{L},$$

де знак «мінус» відповідає напрямку індукційного струму, що протидіє змінам зовнішнього потоку за правилом Ленца.

$$\text{Відповідь: } I(t) = -\frac{\Phi_0(t)}{L}.$$

Для з'ясування природи сторонніх у випадку контуру, ланки якого нерухомі щодо МП ($\Delta \alpha = 0$, $\Delta S = 0$), модуль магнітної індукції якого з часом змінюється ($\Delta B \neq 0$), розглядаємо наступну задачу.

Задача 6. Нехай тонке металеве кільце радіусом r з вузьким розрізом перебуває в МП, магнітна індукція якого \vec{B} перпендикулярна площині кільця і модуль якої наростає зі швидкістю $\Delta B/\Delta t$ ($\Delta B/\Delta t > 0$). До кінців розрізу приєднано високоомний вольтметр. Знайти напруженість ЕП у кільці.

Розв'язування. Оскільки $\Delta B \neq 0$, то, як відомо із дослідів М. Фарадея, у контурі існує індукційне джерело, полярність якого і напрямок дії сторонніх сил \vec{F}_{cm} у якому можуть бути знайдені згідно з правилом Е. Х. Ленца (рис. 6). Оскільки всі точки джерела знаходяться в однакових умовах щодо МП, то в кожній з них повинні діяти однакові сторонні сили: індукційне джерело розподілене вздовж всього кільця, а вольтметр реєструє напругу (різницю потенціалів), яка дорівнює е.р.с. Згідно із законом Фарадея вона рівна $U = \mathcal{E}_i = \Delta\Phi/\Delta t = \Delta(BS \cos \alpha)/\Delta t = \pi r^2 (\Delta B/\Delta t)$, оскільки $\alpha = 0$ а $S = \pi r^2$.

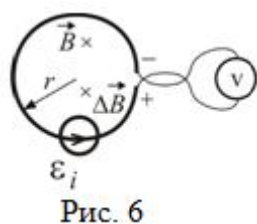


Рис. 6

У свою чергу, наявність напруги на провіднику свідчить про існування у ньому ЕП. При необмеженому зменшенні ширини розриву кільця лінія напруженості цього поля (кільце тонке) повинна була б стати замкненою, тобто колом, яке співпадає із кільцем. У такому випадку напруженість ЕП у кільці становила б

$$E = U/l = (r/2)(\Delta B/\Delta t) \quad (1).$$

Відповідь: $E = U/l = (r/2)(\Delta B/\Delta t)$.

Ця задача підводить нас до принципово важливого висновку, який поки що має характер гіпотези, честь формулювання якої належить Д. К. Максвеллу: **змінне магнітне поле породжує вихрове електричне поле**. Наявність провідного контуру в області, де з часом відбуваються зміни \vec{B} за модулем або напрямком, несуттєва: протікання електричного струму у цьому контурі, точніше існування у ньому індукційного джерела струму, лише свідчить про збудження в цій області ЕП із замкненими лініями напруженості. Усунення цього контуру з МП на вихрове ЕП не впливає, хоч і втрачається можливість його реєстрації. Справедливість гіпотези Максвелла була підтверджена численними дослідями, а явища, передбачені на її основі, застосовуються у багатьох технологіях.

Таким чином, внесення провідного контуру в змінне МП зумовлює дію в ньому сторонніх сил, електричних за своєю природою. Якщо позначити напруженість вихрового ЕП \vec{E}_e , то ЕМІ у даному випадку може бути зображена схематично: $\Delta\vec{B} \Rightarrow \vec{E}_e \Rightarrow \vec{F}_e \Rightarrow \mathcal{E}_i$. Що стосується сторонніх сил, то для них: $F_{cm} = eE_e = e(r/2)(\Delta B/\Delta t)$.

Зв'язок змінного магнітного та вихрового ЕП є фундаментальним, а рівняння, отримане Максвеллом для зв'язку \vec{E}_e та $\Delta\vec{B}/\Delta t$ більш загальним, ніж рівняння закону Фарадея для ЕМІ, яке визначає зв'язок \mathcal{E}_i та $\Delta\Phi/\Delta t$. Повертаючись до (рис. 6) відмічаємо, що лінії напруженості вихрового ЕП

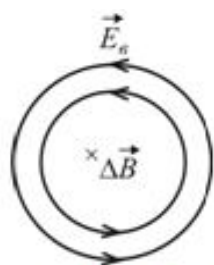


Рис. 6 а)

лежать у площині, перпендикулярній напрямку зміни $\Delta\vec{B}$, а напрямок \vec{E}_e у кожній точці може бути встановлений аналогічно до визначення полярності індукційного джерела (напрямок \vec{F}_{cm}) згідно з правилом Ленца: **якщо відставлений великий палець лівої руки співпадає з напрямком $\Delta\vec{B}$, то інші зігнуті пальці показують напрямок \vec{E}_e** (рис. 6 а).

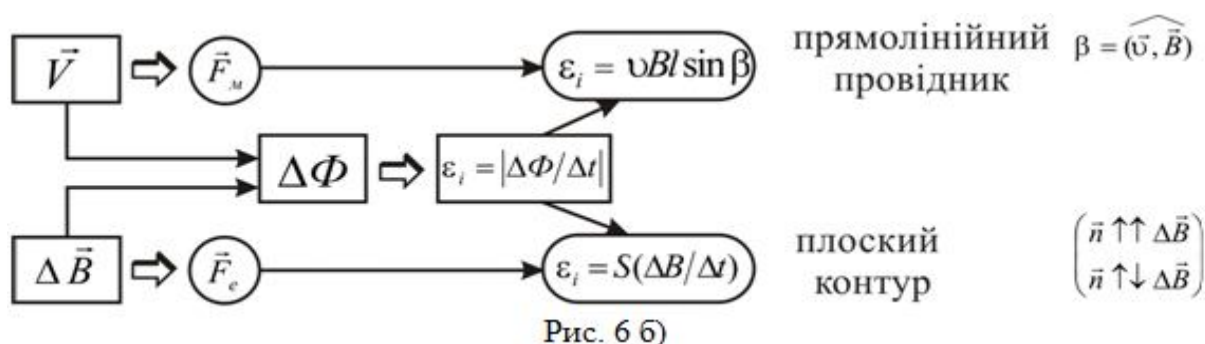
Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика *електростатичного* та *вихрового ЕП*

<i>Електростатичне поле</i>	<i>Вихрове електричне поле</i>
Зв'язане з нерухомими (стаціонарними) зарядами	Зв'язане зі змінним (нестационарним) МП
Лінії напруженості незамкнені і мають початок на q^+ і кінець на q^-	Лінії напруженості замкнені (вихрові); напрямок \vec{E}_e – правило лівої руки
Потенціальне	Непотенціальне

Хоч і ЕРС індукції у провідних контурах в усіх випадках підлягає одному і тому ж закону – закону Фарадея, однак природа відповідних явищ може бути різною, оскільки сторонні сили можуть мати різну природу — магнітну або електричну (рис. 6 б).).

Нехай СВ зв'язана з контуром, що перебуває у полі, магнітна індукція якого по відношенню до цієї СВ змінюється лише за напрямком ($\Delta\vec{B} \neq 0$, хоча $\Delta B = 0$). У такій СВ сторонні сили, що діють у контурі, мають електричну природу, оскільки зумовлені наявністю вихрового ЕП в області зміни магнітної індукції \vec{B} . Розглянемо явище у СВ, зв'язаній з МП (джерелом МП). По відношенню до цієї СВ магнітна індукція $\vec{B} = \text{const}$. Тобто відбувається зміна орієнтації контуру щодо постійного МП. Таким чином, у даній СВ сторонні сили, які діють у контурі, мають магнітну природу, оскільки зумовлені перерозподілом зарядів у провіднику, що рухається в МП.

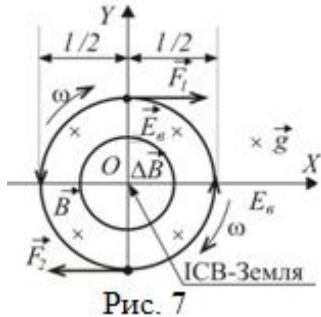


Індукційна е.р.с. у всіх випадках зумовлена сторонніми силами, електромагнітними за природою, тобто ($\vec{F}_{cm} = \vec{F}_m + \vec{F}_e$). Останнє пояснюється тим, що як фізична реальність існує лише **електромагнітне поле** (ЕМП), тоді як окремий розгляд електричного (ЕП) або магнітного (МП) полів можливий лише у зв'язку із вибором тієї чи іншої СВ. Це дозволяє ще раз відзначити відмінність у розумінні ЕМІ Фарадеєм і Максвеллом. Коли з точки зору першого ЕМІ полягає у збудженні електричного струму у провідному замкнутому контурі у випадках, перерахованих вище, то другий бачить сутність ЕМІ у збудженні в довільному середовищі (не обов'язково провідному) змінним МП вихрового ЕП. Саме цим пояснюється універсальність закону ЕМІ Фарадея і саме цієї точки зору притримується сучасна фізика

Задача 7. На гладенькій горизонтальній поверхні лежить тонкий невагомий стержень завдовжки l , до кінців якого прикріплені діелектричні кульки невеликих розмірів масою m із електричним зарядом q ($q > 0$). Стержень перебуває в однорідному МП, модуль магнітної індукції якого рівномірно зменшується від B_0 до 0 , а її напрямок у кожен момент часу

співнапрямлений з прискоренням вільного падіння. Якої кутової швидкості набуде стержень?

Розв'язування. Можна скористуватись як силовим, так і енергетичним підходом; ми спробуємо отримати розв'язок в рамках першого. Явище розглядаємо в ІСВ, зв'язаній із Землею. Оскільки $\vec{B} \neq \text{const}$ ($\Delta\vec{B} \neq 0$), то **має місце ЕМІ, внаслідок чого в області зміни \vec{B} збуджується вихрове ЕП**, лінії напруженості якого \vec{E}_e — кола, площини яких перпендикулярні $\Delta\vec{B}$, тобто у



даному випадку горизонтальні (рис. 7). На заряджені кульки, які можна вважати матеріальними точками (МТ), у цьому ЕП діють електричні сили — сили Кулона \vec{F}_K , механічний момент яких приводить в обертальний рух кульки разом зі стержнем щодо їх спільного центру мас (ЦМ). Він співпадає з серединою стержня O , оскільки він невагомий, а маси кульок однакові. Напруженість вихрового ЕП в області зміни \vec{B} згідно із (1) задачі 6 становить: $E_e = (r/2)|\Delta B/\Delta t|$ (тут $\Delta B/\Delta t < 0$). Оскільки \vec{B} зменшується рівномірно, то $|\Delta B/\Delta t| = B_0/\tau$, де τ - проміжок часу протягом якого зникає МП. Таким чином, сили Кулона, які діють на кульки ($F_1 = F_2 = F_K = |q|E_e$), впродовж τ лишаються сталими: на стержень з кульками діє сталий момент сил. Стержень вважаємо жорстким, так що систему можна розглядати як абсолютно тверде тіло (АТТ). Під дією сталого моменту сил АТТ обертається рівноприскорено.

Згідно з другим законом Ньютона для обертального руху АТТ $M = I\beta$.

Момент сил Кулона, які діють на систему: $M = 2F_K \cdot (l/2) = F_K l$. Сили Кулона, які діють на кульки: $F_K = qE_e$ ($q > 0$). Напруженість вихрового ЕП в області перебування кульок ($r = l/2$): $E_e = lB_0/(4\tau)$. Отримуємо для моменту сил: $M = ql^2 B_0/4\tau$. Момент інерції системи щодо осі обертання (кульки - МТ; стержень невагомий): $I = 2m(l/2)^2 = ml^2/2$. Кутове прискорення (обертання рівноприскорене): $\beta = (\omega - \omega_0)/\tau = \omega/\tau$ ($\omega_0 = 0$).

Отримуємо $\frac{ql^2 B_0}{4\tau} = \frac{ml^2}{2} \frac{\omega}{\tau}$. Знаходимо $\omega = \frac{q}{2m} B_0$.

Відповідь: $\omega = \frac{q}{2m} B_0$.

Зауваження. Можна довести, що отриманий результат не залежить від того, який вигляд має залежність $B = B(t)$, а введення умови про рівномірний характер зміни \vec{B} лише спрощує формальну частину розв'язку. Окрім того, такий самий результат отримується і у тому випадку, коли система складається з довільної кількості кульок або ж у граничному випадку є зарядженим кільцем.

Задача 8. По двох гладких мідних шинах, встановлених під кутом α до горизонту, ковзає під дією сили тяжіння мідна перемичка масою m (рис. 8). Зверху шини замкнуті на конденсатор ємності C . Відстань між шинами l . Система знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією \vec{B} , перпендикулярною площині, у якій переміщується перемичка. Опір шин, перемички і ковзних контурів, а також самоіндукція контуру, дуже малі. Знайти прискорення перемички.

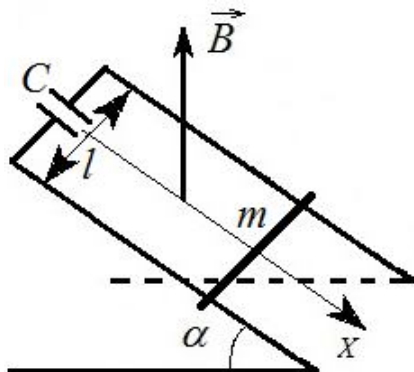


Рис. 8

Розв'язування. Зміна магнітного потоку через контур обумовлена рухом перемички. За законом Ома для неоднорідної ділянки кола е.р.с. індукції \mathcal{E}_i і в будь-який момент часу дорівнює різниці потенціалів $\Delta\phi$ на обкладках конденсатора

$$\mathcal{E}_i = \Delta\phi.$$

Але $\Delta\phi = Q/C$. Отже, сила індукційного

струму у контурі $I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{d(\Delta\phi)}{dt} = C \frac{d\mathcal{E}_i}{dt}$. Магнітне поле однорідне, тому

$$\mathcal{E}_i = B \frac{dS}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv, \text{ де } S - \text{ площа контуру. Таким чином,}$$

$$I = CBl \frac{dv}{dt} = CBla, \text{ де } a - \text{ шукане прискорення перемички.}$$

На перемичку діють дві сили: сила тяжіння mg і сила Ампера $IlB = CB^2 l^2 a$.

За другим законом Ньютона $ma = mg \sin \alpha - CB^2 l^2 a$. Звідки

$$a = \frac{mg \sin \alpha}{m + CB^2 l^2}.$$

Якщо на перемичку діє сила тертя, то легко показати, що

$$a = \frac{mg \sin \alpha - fmg \cos \alpha}{m + CB^2 l^2}, \text{ де } f - \text{ коефіцієнт тертя.}$$

Якщо зовнішнє магнітне поле відсутнє, але сила струму I у контурі змінюється з часом t , то власний магнітний потік $\Phi = LI$ через контур змінюється і виникає е.р.с. самоіндукції: $\mathcal{E}_i = -L \frac{dI}{dt}$. Е.р.с. самоіндукції створює індукційний струм. При розмиканні електричного кола струм змінюється за законом $I = I_0 e^{-(R/L)t}$, а при замиканні - за законом $I = I_0 (1 - e^{-(R/L)t})$, де $I_0 = \mathcal{E}_0 / R$ - значення струму в колі, \mathcal{E}_0 - е.р.с. джерела.

Відповідь: $a = \frac{mg \sin \alpha}{m + CB^2 l^2}$.

Задача 9. Соленоїд з індуктивністю $L = 10^{-1} \text{ Гн}$ і опором $R = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$ замикається на джерело е.р.с. $\mathcal{E}_0 = 2\text{В}$, внутрішній опір якого дуже малий. Який заряд пройде через соленоїд за перші 5 с після замикання?

Розв'язування. При замиканні соленоїда на е.р.с. \mathcal{E}_0 у ньому виникає е.р.с. індукції, яка приводить до появи індукційного струму. Тому для обчислення заряду, який пройде через соленоїд, застосуємо методи диференціального та інтегрального числення.

Розділимо проміжок часу t на настільки малі відрізки dt , щоб у межах кожного такого відрізка часу силу струму можна було вважати приблизно постійною. Тоді елементарний заряд dQ , який пройде через соленоїд за цей проміжок часу dt

$$dQ = Idt = \frac{\mathcal{E}_0}{R} (1 - e^{-(R/L)t}) dt.$$

Звідси після інтегрування по часу t знаходимо

$$Q = \int_0^5 \frac{\mathcal{E}_0}{R} (1 - e^{-(R/L)t}) dt = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \left(t + \frac{L}{R} e^{-(R/L)t} \right) \Big|_0^5.$$

$$Q \approx 181 \text{ Кл.}$$

Якщо б ми помилково припустили, що сила струму миттєво досягає свого усталеного значення $I_0 = \mathcal{E}_0 / R$ (що, втім, можливо, якщо L мале), то ми отримали б $Q = I_0 t = (\mathcal{E}_0 / R)t, Q = 500 \text{ Кл}$. Це помилковий результат та на значну

величину відрізняється від вірної відповіді. Відповідь $Q = 500 \text{ Кл}$ була би вірною, якщо би в умові задачі явищем самоіндукції можна було б знехтувати.

Відповідь: $Q = 181 \text{ Кл}$.

Задача 10. У площині квадратної рамки з омичним опором $R = 7 \text{ Ом}$ і стороною $a = 20 \text{ см}$ розташований на відстані $r_0 = 20 \text{ см}$ від рамки прямий нескінчений провідник (рис. 9). Сила струму у провіднику змінюється за законом $I = \alpha t^3$, де $\alpha = 2 \text{ А/с}^3$. Провідник паралельний одній із сторін рамки. Знайти силу струму у рамці в момент часу $t = 10 \text{ с}$.

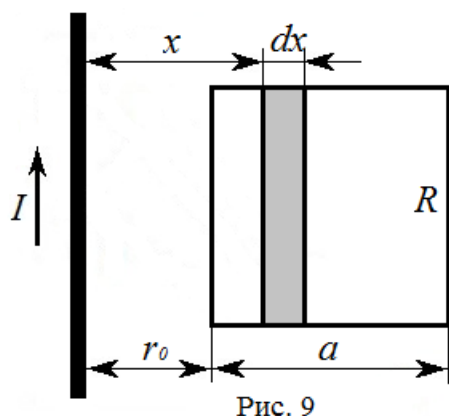


Рис. 9

Розв'язування. Внаслідок зміни сили струму у провіднику, магнітний потік через рамку змінюється і у ній виникає індукційний струм. Рамка знаходиться в неоднорідному магнітному полі. Тому для розрахунку магнітного потоку використаємо методи диференціального та інтегрального числення.

Розділимо площу рамки на настільки вузькі смужки (рис. 9), щоб у межах кожної смужки магнітне поле можна було вважати однорідним. Елементарний магнітний потік через вузьку смужку

$$d\Phi = B a dx = \frac{\mu_0 I a dx}{2\pi x}.$$

Інтегруючи це рівняння по x у межах від r_0 до r_0+a , знаходимо

$$\Phi = \int_{r_0}^{r_0+a} \frac{\mu_0 I a dx}{2\pi x} = \frac{\mu_0 a \alpha \ln(1 + a/r_0)}{2\pi} t^3.$$

За законом Фарадея визначаємо е.р.с. індукції

$$\mathcal{E}_i = \frac{3\mu_0 a \alpha \ln(1 + a/r_0)}{2\pi} t^2$$

та силу струму

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = \frac{3\mu_0 a \alpha \ln(1 + a/r_0)}{2\pi R} t^2, \quad I \approx 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Відповідь: $I = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ А}$.

Розділ 3. ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

3.1 З тонкого дроту спаяли квадрат. Дві протилежні вершини квадрата підключили до джерела струму, при цьому по дротах течуть струми 1 А . Яку індукцію має магнітне поле у центрі квадрата?

3.2 Чому дорівнює прискорення частинки з питомим зарядом (відношення заряду до маси) 10^7 Кл/кг , яка влітає під кутом 30° в однорідне магнітне поле з індукцією $0,4\text{ Тл}$, маючи швидкість 10^5 м/с ?

3.3 Заряджена частинка, кінетична енергія якої 10^{-16} Дж , рухається в однорідному магнітному полі по колу радіусом 2 см . Яка за величиною сила діє на частинку у полі?

3.4 Дві однакові заряджені частинки, вектори швидкостей яких паралельні, влітають в однорідне магнітне поле. Швидкість однієї частинки у 3 рази більша, ніж другої. Чому дорівнює відношення прискорень частинок?

3.5 Заряджена частинка рухається в однорідному магнітному полі з прискоренням 10^{10} м/с^2 . Яким буде прискорення цієї ж частинки, якщо індукція магнітного поля зросте у 2 рази?

3.6 Заряджена частинка рухається в однорідному магнітному полі з прискоренням 10^{10} м/с^2 . Яким було б прискорення цієї ж частинки, якби її швидкість була у 2 рази меншою?

3.7 Під яким найбільшим кутом має бути напрямлений вектор швидкості зарядженої частинки по відношенню до вектора індукції однорідного магнітного поля, щоб частинка рухалася у полі прямолінійно?

3.8 Протон і електрон, які мають однакові швидкості, потрапляють у однорідне магнітне поле, вектор магнітної індукції якого перпендикулярний до векторів швидкостей цих частинок. Як будуть відрізнятись радіуси їх траєкторій?

3.9 Яка сила діятиме на відрізок дроту довжиною 20 см зі струмом 1 А , який знаходиться в однорідному магнітному полі 50 мТл так, що вектор \vec{B} утворює кут 30° з віссю дроту?

3.10 Два довгі паралельні тонкі дроти розташовані у вакуумі на відстані

1 м один від одного. З якою силою на одиницю довжини взаємодіють дроти, якщо по них пропускають однакові струми силою 1 А?

3.11 Який магнітний потік пронизує прямокутний дротяний виток, розташований у магнітному полі з індукцією 20 мТл, якщо площа витка становить 100 см^2 , вектор \vec{B} орієнтований під кутом 60° до площини витка?

3.12 Плоска замкнута рамка, площа якої 100 см^2 , знаходиться у перпендикулярному до її площини однорідному магнітному полі 0,2 Тл. Рамку повертають на кут 60° навколо осі, яка лежить у площині рамки та перпендикулярна до вектора \vec{B} . На скільки змінюється при цьому магнітний потік, що пронизує рамку?

3.13 Плоска рамка площею 10 см^2 , яка виготовлена з тонкого дроту, знаходиться у магнітному полі 20 мТл так, що вектор \vec{B} перпендикулярний до площини рамки. Магнітне поле вимикають. На скільки при цьому змінюється магнітний потік, що пронизує рамку?

3.14 Плоска рамка площею 10 см^2 , яка виготовлена з тонкого дроту, знаходиться у магнітному полі 20 мТл так, що вектор \vec{B} перпендикулярний до площини рамки. Рамку повернули на кут 60° навколо осі, що лежить у площині рамки й перпендикулярна до вектора індукції. На скільки змінюється при цьому магнітний потік, що пронизує рамку?

3.15 Плоска рамка площею 10 см^2 , яка виготовлена з тонкого дроту, знаходиться у магнітному полі 20 мТл так, що вектор \vec{B} перпендикулярний до площини рамки. Рамку повернули на кут 90° навколо осі, що лежить у площині рамки й перпендикулярна до вектора індукції. На скільки змінюється при цьому магнітний потік, що пронизує рамку?

3.16 Плоска рамка площею 10 см^2 , яка виготовлена з тонкого дроту, знаходиться у магнітному полі 20 мТл так, що вектор \vec{B} перпендикулярний до площини рамки. Рамку повернули на кут 180° навколо осі, що лежить у площині рамки й перпендикулярна до вектора індукції. На скільки змінюється при цьому магнітний потік, що пронизує рамку?

3.17 Плоска рамка площею 100 см^2 має 50 витків дроту. Рамка знаходиться у магнітному полі 0,2 Тл так, що вектор індукції \vec{B} утворює з її

площиною кут 30° . Який магнітний потік пронизує всі витки рамки?

3.18 Плоска рамка площею 100 см^2 має 50 витків дроту. Рамка знаходиться у магнітному полі $0,2 \text{ Тл}$ так, що вектор індукції \vec{B} утворює з її площиною кут 30° . На скільки зміниться магнітний потік крізь всі витки рамки при вимиканні поля?

3.19 Плоска рамка площею 10 см^2 , яка виготовлена з тонкого дроту, знаходиться у магнітному полі 20 мТл так, що вектор \vec{B} перпендикулярний до площини рамки. Магнітне поле вимикають. Який заряд пройде при цьому по рамці, якщо її опір 10 мкОм ?

3.20 Магнітний потік, що пронизує плоску дротяну рамку, рівномірно зменшується зі швидкістю 10 мкВб/с . Яка е.р.с. індукується при цьому у рамці?

3.21 Магнітний потік, що пронизує плоску дротяну рамку, рівномірно зменшується зі швидкістю 10 мкВб/с . Знайти силу струму у рамці, якщо її опір дорівнює 200 мкОм .

3.22 В однорідному магнітному полі розташована плоска рамка з тонкого дроту, яка має площу 100 см^2 . При цьому вектор \vec{B} утворює кут 30° з площиною рамки. Індукція поля змінилася на 10 мТл . На скільки змінився магнітний потік, що пронизує рамку?

3.23 Індуктивність котушки, яка має 1000 витків тонкого дроту, дорівнює 1 мГн . Який магнітний потік пронизує кожний із витків котушки при силі струму у ній 1 А ?

3.24 На скільки зросте енергія магнітного поля котушки, індуктивність якої $0,2 \text{ Гн}$, якщо сила струму зросте від 2 А до 4 А ?

3.25 При зростанні сили струму у котушці індуктивності від 1 А до 3 А енергія магнітного поля змінилася на 40 мДж . Яку індуктивність має котушка?

3.26 Котушка, індуктивність якої $L = 100 \text{ мГн}$, має $N = 400$ витків. Який магнітний потік пронизує кожний із витків котушки при силі струму $I = 0,2 \text{ А}$?

3.27 Енергія магнітного поля котушки з індуктивністю 1 Гн становить $0,5 \text{ Дж}$. Чому дорівнює сила струму у котушці?

3.28 Енергія магнітного поля котушки індуктивності дорівнює $0,5 \text{ Дж}$ при силі струму 2 А . Який магнітний потік пронизує всі витки котушки?

3.29 Енергія магнітного поля котушки індуктивності дорівнює $0,5 \text{ Дж}$ при силі струму 2 А . Який магнітний потік пронизує кожний з 500 витків котушки?

3.30 При силі струму 1 А котушку індуктивності пронизує магнітний потік $0,2 \text{ Вб}$. Знайти енергію магнітного поля котушки.

3.31 Енергія магнітного поля котушки з індуктивністю $0,5 \text{ Гн}$ дорівнює 10 мДж . Який магнітний потік пронизує всі витки котушки?

3.32 Магнітний потік, що пронизує всі витки котушки з індуктивністю 10 мГн , дорівнює 1 мВб . Знайти енергію магнітного поля котушки.

3.33 Котушка з індуктивністю 10 мГн має 200 витків тонкого дроту. При проходженні по котушці струму кожний із витків пронизує магнітний потік 10 мкВб . Знайти енергію магнітного поля котушки.

3.34 При проходженні струму у котушці, індуктивність якої становить 5 Гн , кожний її виток пронизує магнітний потік 1 мкВб . При цьому енергія магнітного поля котушки дорівнює 25 мкДж . Скільки витків має котушка?

3.35 Частинка, питомий заряд (відношення заряду до маси) якої становить 10^7 Кл/кг , рухається у магнітному полі 100 мТл по колу. З якою кутовою швидкістю відбувається цей рух?

3.36 Заряджена частинка, яка пройшла прискорюючу різницю потенціалів U , у магнітному полі рухається по колу радіусом 1 см . Яким був би радіус кола, якби частинка пройшла прискорюючу різницю потенціалів $4U$?

3.37 Якої величини повинен бути радіус кола, по якому мав би рухатись електрон у однорідному магнітному полі з індукцією 10 Тл , щоб його прискорення під дією магнітної сили дорівнювало прискоренню вільного падіння?

3.38 Ядра атомів водню (відносна атомна маса 1 , заряд $+e$) та ядра гелію (відносна атомна маса 4 , заряд $+2e$), швидкості яких однакові, рухаються у однорідному магнітному полі по колових траєкторіях. Чому дорівнює відношення радіусів траєкторій ядер гелію та водню?

3.39 Яким має бути відношення швидкостей ядер водню (відносна атомна маса 1 , заряд $+e$) та ядер гелію (відносна атомна маса 4 , заряд $+2e$), щоб

у однорідному магнітному полі вони рухалися по колових траєкторіях однакового радіусу?

3.40 Крапелька води, маса якої $0,01 \text{ мг}$, заряд 10 мкКл , швидкість 100 м/с , влітає у однорідне магнітне поле з індукцією 1 Тл , що має різку межу. Вектор швидкості перпендикулярний до вектора \vec{B} . Під дією магнітної сили напрям швидкості крапельки змінюється на протилежний і вона вилітає з поля. На якій відстані від місця влітання крапелька вилетить з магнітного поля?

3.41 Заряджена частинка, питомий заряд (відношення заряду до маси) якої дорівнює 10^7 Кл/кг , влітає в однорідне магнітне поле з індукцією $0,2 \text{ Тл}$, що має різку межу. Вектор швидкості перпендикулярний до вектора \vec{B} . Під дією магнітної сили напрям швидкості частинки змінюється на протилежний і вона вилітає з поля на відстані 10 см від точки влітання. Яку швидкість має частинка?

3.42 У горизонтальній площині збуджені магнітні поля, вектори яких \vec{B}_1 та \vec{B}_2 напрямлені під кутом 60° один до одного, а їх модулі однакові. Під яким кутом до вектора \vec{B}_1 треба розташувати відрізок прямого дроту зі струмом, щоб на нього не діяла сила у цих полях?

3.43 Показати, що радіус траєкторії зарядженої частинки, яка рухається в однорідному магнітному полі, перпендикулярному до її швидкості, прямо пропорційний її імпульсові.

3.44 Циклотрон призначений до прискорення протонів до енергії у 5 МеВ . Визначити максимальний радіус орбіти, якою рухається протон, якщо індукція магнітного поля становить 1 Тл .

3.45 Відрізок дроту довжиною 20 см , по якому тече струм 5 А , лежить на горизонтальному столі у вертикальному магнітному полі. Коефіцієнт тертя між; дротом та столом $0,5$, маса провідника 100 г . Знайти величину індукції магнітного поля.

3.46 Відрізок тонкого дроту масою 10 г і довжиною 50 см , вздовж осі якого тече струм 1 А , лежить на горизонтальній поверхні у горизонтальному однорідному магнітному полі. Вектор індукції перпендикулярний до осі дроту. При якій мінімальній індукції магнітного поля сила нормальної реакції опори,

що діє на дріт, стане рівною нулю?

3.47 В однорідному горизонтальному магнітному полі на двох невагомих струмопровідних пружинах горизонтально висить прямолінійний провідник, який розташований перпендикулярно до ліній магнітного поля. Провідник знаходиться у стані спокою і по ньому проходить електричний струм. Сумарна сила пружності, що діє на провідник, напрямлена вниз і дорівнює його вазі. Індукція поля 1 Тл , маса одиниці довжини провідника $0,1 \text{ кг/м}$. Знайти силу струму у провіднику. Якщо такий струм пустити у зворотному напрямку, то чому буде дорівнювати сумарна сила пружності після встановлення рівноваги? Довжина провідника 20 см . Силою магнітної взаємодії пружин знехтувати.

3.48 Відрізок прямого дроту довжиною 20 см і масою 5 г знаходиться у перпендикулярному до його осі однорідному магнітному полі з індукцією 100 мТл . З яким прискоренням почне рухатися провідник, якщо по ньому пропустити струм 1 А ? Тертя та опір не враховувати.

3.49 Відрізок прямого дроту довжиною 20 см висить горизонтально на двох невагомих нитках довжиною 20 см кожна у вертикальному магнітному полі 50 мТл . При пропусканні по провіднику струму 5 А нитки відхиляються від вертикалі на кут 60° . Чому дорівнює момент сили Ампера, що діє на дріт?

3.50 Відрізок прямого дроту довжиною 20 см висить горизонтально на двох невагомих нитках довжиною 20 см кожна у вертикальному магнітному полі 50 мТл . При пропусканні по провіднику струму 5 А нитки відхиляються від вертикалі на кут 45° . Чому дорівнює маса дроту?

3.51 Відрізок прямого тонкого дроту завдовжки 20 см і масою 5 г , по якому тече струм 10 А , висить горизонтально на двох невагомих нитках в однорідному магнітному полі. Вектор \vec{B} перпендикулярний до осі дроту. При якій мінімальній індукції магнітного поля сила натягу ниток дорівнюватиме нулю?

3.52 Відрізок прямого дроту довжиною 20 см висить горизонтально на двох невагомих нитках довжиною 20 см кожна у вертикальному магнітному полі 50 мТл . При пропусканні по провіднику струму 5 А нитки відхиляються від

вертикалі на кут 60° . Чому дорівнює момент сили тяжіння, що діє на дріт?

3.53 Відрізок прямого тонкого дроту завдовжки 20 см і масою 20 г лежить на горизонтальній поверхні. Вздовж осі дроту тече струм 2 А . Якщо увімкнути вертикальне магнітне поле, дріт починає рухатися із прискоренням $0,5\text{ м/с}^2$. Чому дорівнює індукція магнітного поля? Силами тертя та опору знехтувати.

3.54 Відрізок прямого тонкого дроту знаходиться у перпендикулярному до його осі однорідному магнітному полі з індукцією 20 мТл . Який заряд проходить щосекунди через переріз дроту, якщо на кожний сантиметр довжини дроту діє сила Ампера 50 мкН ?

3.55 Прямокутна рамка $AECD$ площею $S = 0,01\text{ м}^2$ зі струмом $I = 1\text{ А}$ знаходиться в однорідному магнітному полі величиною $B = 1\text{ Тл}$ і може обертатися навколо осі OO_1 , яка проходить через середини сторін EC та AD . Знайдіть момент сили Ампера, що діє на рамку, відносно цієї осі. В момент $t = 0$ вектор індукції магнітного поля лежить у площині рамки і паралельний стороні EC .

3.56 Куб $ACDEA_1C_1D_1E_1$ зі стороною a розташований так, що індукція однорідного магнітного поля (величиною B) перпендикулярна до площини перерізу CC_1E_1E . Знайдіть потік магнітної індукції через поверхню, утворену гранями куба CC_1D_1D і DD_1E_1E .

3.57 Визначити індуктивність соленоїда, в якому при рівномірному збільшенні струму на 2 А енергія магнітного поля збільшується на 10^{-2} Дж . Середня сила струму 5 А .

3.58 Прямий відрізок тонкого дроту завдовжки 40 см рухається зі швидкістю 1 м/с в однорідному магнітному полі 50 мТл так, що вісь дроту утворює кут 30° з вектором \vec{B} , а вектор швидкості перпендикулярний до вектора \vec{B} . Чому дорівнює різниця потенціалів між кінцями дроту?

3.59 Плоска рамка площею 100 см^2 має 50 витків тонкого дроту. Рамка знаходиться у магнітному полі $0,2\text{ Тл}$ так, що вектор індукції утворює з її площиною кут 30° . Магнітне поле вимикають. Який заряд пройде при цьому по рамці, якщо її опір 10 мкОм ?

3.60 З товстого дроту виготовлений каркас у вигляді літери П. Відстань між паралельними сторонами каркасу 20 см. Каркас розташований горизонтально і знаходиться у магнітному полі 5 мТл так, що вектор індукції перпендикулярний до його площини. По каркасу без порушення контакту, перпендикулярно до його бокових сторін, рухається зі швидкістю 0,1 м/с перетинка. Знайти силу струму у контурі, якщо опір перетинки 10 мкОм. Опором каркасу та контактів знехтувати.

3.61 В однорідному магнітному полі розміщений виток дроту з опором 0,5 Ом і площею 100 см². Вектор магнітної індукції напрямлений під кутом 30° до площини витка. За час 0,5 с індукція поля рівномірно збільшується від 0,1 Тл до 0,6 Тл. Визначити кількість тепла, яка виділилася у витку та заряд, який пройшов через його поперечний переріз за цей час.

3.62 Відрізок прямого тонкого дроту завдовжки 20 см рухається у перпендикулярному до його осі магнітному полі 20 мТл так, що вектор швидкості перпендикулярний до осі дроту та до вектора індукції. Швидкість руху змінюється з часом за законом $v = 2 - 0,1t$ (всі величини задані в СІ). Яка е.р.с. індукується у дроті у момент часу 5 с після початку руху?

3.63 Відрізок прямого тонкого дроту завдовжки 20 см рухається у перпендикулярному до його осі магнітному полі 20 мТл так, що вектор швидкості перпендикулярний до осі дроту та до вектора індукції. Швидкість руху змінюється з часом за законом $v = 2 - 0,1t$ (всі величини задані в СІ). Яка е.р.с. індукується у дроті у момент $t = 0$?

3.64 У котушці з індуктивністю 1 мГн тече змінний струм, амплітуда якого 10 мА, циклічна частота 400 с⁻¹. Яку амплітуду має е.р.с. самоіндукції у котушці?

3.65 У котушці з індуктивністю 1 мГн тече змінний струм, амплітуда якого 10 мА, циклічна частота 400 с⁻¹. Чому дорівнює максимальне значення магнітного потоку, який пронизує всі витки котушки?

3.66 Плоский замкнутий контур, площа якого 100 см², опір 1 Ом, розташований в однорідному магнітному полі так, що вектор \vec{B} утворює кут 30° з площиною контуру. Індукція поля зростає зі швидкістю 1 мТл/с. Чому

дорівнює сила струму у контурі?

3.67 В однорідному магнітному полі розташована плоска рамка з тонкого дроту, яка має площу 100 см^2 і опір 1 мОм . При цьому вектор \vec{B} утворює кут 30° з площиною рамки. Індукція поля зменшується зі швидкістю 1 мТл/с . Який заряд щосекунди проходить у контурі?

3.68 В однорідному магнітному полі розташована плоска рамка з тонкого дроту, яка має площу 100 см^2 і опір 1 Ом . При цьому вектор \vec{B} утворює кут 30° з площиною рамки. При зміні магнітного потоку у рамці тече струм $0,1 \text{ мА}$. Чому дорівнює швидкість зміни індукції магнітного поля?

3.69 Плоска дротяна рамка, площа якої 100 см^2 і опір 1 Ом , знаходиться у перпендикулярному до її площини однорідному магнітному полі з індукцією 1 Тл . Який заряд пройде у рамці при вимкненні магнітного поля?

3.70 Сила струму у котушці, індуктивність якої 10 мГн , змінилася від $0,2 \text{ А}$ до $0,1 \text{ А}$. На скільки змінився магнітний потік, який пронизує всі витки котушки?

3.71 Сила струму у котушці, яка має 1000 витків дроту й індуктивність 10 мГн , змінилася від $0,2 \text{ А}$ до $0,1 \text{ А}$. На скільки змінився магнітний потік, що пронизує кожний з витків котушки?

3.72 Котушку з індуктивністю 3 Гн підключили до джерела з е.р.с. 15 В . Опори джерела та котушки дуже малі. Через який час струм у котушці досягне величини 50 А ?

3.73 Прямокутний дротяний виток, площа якого дорівнює 100 см^2 , обертається з кутовою швидкістю 10 рад/с навколо осі в однорідному магнітному полі з індукцією 10 мТл . Вісь обертання лежить у площині витка та перпендикулярна до вектора \vec{B} . Яка максимальна е.р.с. виникає у витку?

3.74 Прямокутний дротяний виток, площа якого дорівнює 100 см^2 , обертається в однорідному магнітному полі навколо осі з кутовою швидкістю 20 рад/с . Вісь обертання лежить у площині витка та перпендикулярна до вектора \vec{B} . Максимальна е.р.с., що індукується у витку, дорівнює 1 В . Яку індукцію має магнітне поле?

3.75 Прямокутна рамка, площа якої дорівнює 100 см^2 , обертається в

однорідному магнітному полі 5 мТл навколо осі, що лежить у площині рамки та перпендикулярна до вектора \vec{B} . Амплітуда е.р.с. індукції у рамці дорівнює 1 В . З якою кутовою швидкістю обертається рамка?

3.76 Прямокутна рамка з тонкого дроту, площа якої дорівнює 100 см^2 , обертається з кутовою швидкістю 10 рад/с в однорідному магнітному полі 50 мТл навколо осі, що лежить у площині рамки та перпендикулярна до вектора \vec{B} . Яку кількість витків має рамка, якщо максимальна е.р.с. індукції у ній дорівнює $0,5 \text{ В}$?

3.77 Рамка, площа якої дорівнює 50 см^2 , опір 1 Ом , знаходиться в однорідному магнітному полі 10 мТл . Вектор індукції перпендикулярний до площини рамки. Рамку повертають на кут 90° навколо осі, що лежить у площині витка та перпендикулярна до вектора \vec{B} . Який заряд при цьому проходить у рамці?

3.78 Електрон обертається по колу в однорідному магнітному полі з індукцією \vec{B} . Визначити силу струму.

3.79 Показати, що за будь-якої швидкості електрона \vec{v} , який влітає в однорідне магнітне поле з індукцією \vec{B} і за будь-якого кута α а між векторами \vec{v} і \vec{B} , значення часу t за який він опише виток гвинтової лінії, буде одним і тим самим.

3.80 На двох товстих паралельних шинах, які утворюють кут $\theta = 0^\circ$ з горизонтом, розташована перпендикулярно до шин перемичка маси $m = 10 \text{ г}$. Вся конструкція знаходиться у вертикальному магнітному полі з індукцією $B = 100 \text{ мТл}$. Знайти мінімальну силу струму I , який треба пропустити по перемичці, щоб вона почала рухатись вгору по шинах. Довжина перемички $l = 10 \text{ см}$, коефіцієнт тертя між нею та шинами $\mu = 0,1$.

3.81 Два паралельні прямі відрізки дроту з одного й того ж матеріалу, площі перерізу яких однакові, а довжини відрізняються у 2 рази, лежать поряд на горизонтальній поверхні в однорідному магнітному полі. При пропусканні струму 2 А по коротшому дроту, він перестає тиснути на опору. Якої сили струм слід пропустити по довшому дроту, щоб він також не тиснув на опору?

3.82 Два паралельні прямі відрізки дроту з одного й того ж матеріалу,

площі перерізу яких відрізняються у 2 рази, а довжини однакові, лежать поруч на горизонтальній поверхні в однорідному магнітному полі. При пропусканні струму 2 по тоншому дроту він перестає тиснути на опору. Якої сили струм слід пропустити по грубому дроту, щоб він також не тиснув на опору?

3.83 Провідник довжиною 1 м ковзає вздовж горизонтальних рейок у вертикальному магнітному полі з індукцією 0,01 Тл. Кінці рейок замкнені на опори 1 Ом та 2 Ом. Визначити силу струму, який тече у провіднику, якщо його швидкість є сталою і дорівнює 10 м/с. Опором рейок і провідника знехтувати. Провідник розташований перпендикулярно до рейок.

3.84 В однорідному магнітному полі розміщений виток з опором 1 Ом і площею 100 см^2 . Вектор магнітної індукції напрямлений під кутом 60° до площини витка. За 0,5 с індукція поля рівномірно збільшується від 0,10 Тл до 0,60 Тл. Визначити кількість тепла, яка виділилась у витку, та заряд, який пройшов через його поперечний переріз за цей час.

3.85 Провідник довжиною 15 см вміщено у однорідне магнітне поле з індукцією 2 Тл. Кінці провідника замкнено гнучким дротом, який знаходиться поза межами магнітного поля. Опір усього кола дорівнює 1 Ом. Яку потужність повинна розвивати зовнішня сила, щоб рухати провідник перпендикулярно до ліній індукції зі сталою швидкістю 10 м/с перпендикулярно до провідника.

3.86 Каркас з товстого дроту, зігнутий у вигляді літери П, встановлений під кутом $\theta = 30^\circ$ до горизонту в однорідному магнітному полі $B = 0,5 \text{ Тл}$, вектор індукції якого перпендикулярний до площини каркасу. Відстань між сторонами каркасу $l = 20 \text{ см}$. По каркасу починає ковзати перемичка, що має масу $m = 10 \text{ г}$ та опір $R = 10 \text{ Ом}$. Перемичка розташована перпендикулярно до сторін каркасу. Знайти швидкість рівномірного руху перемички. Опором каркасу та тертям знехтувати.

3.87 Прямий відрізок тонкого дроту завдовжки 20 см, який паралельний до осі Oy , починає рухатися вздовж осі Ox зі сталим прискоренням 2 м/с^2 . Вздовж осі Oz існує однорідне магнітне поле з індукцією 100 мТл. Знайти е.р.с. у дроті у момент часу $t = 2 \text{ с}$.

3.88 Прямий відрізок тонкого дроту завдовжки 20 см, який паралельний

до осі Oy , рухається вздовж; осі Ox так, що його координата x змінюється з часом за законом $x = 5 - 2t + t^2$ (всі величини задані в СІ). Вздовж; осі Oz існує однорідне магнітне поле з індукцією 100 мТл . Знайти е.р.с. у дроті у момент, коли $x = 29 \text{ м}$.

3.89 У початковий момент струм I у тонкому провідному витку з індуктивністю L дорівнює нулю, причому зовнішній потік Φ_0 через поверхню, обмежену контуром витка, також дорівнює нулю. Потім потік зовнішнього поля починає швидко змінюватись за деяким законом $\Phi_0(t)$. Як буде змінюватись сила струму у витку, якщо опір дротів R дуже малий?

3.90 До котушки індуктивності з числом витків $N = 1000$ і діаметром витка $d = 10 \text{ см}$ паралельно приєднали конденсатор ємністю $C = 100 \text{ мкФ}$. Система знаходиться в однорідному магнітному полі, індукція якого паралельна осі котушки. Поле змінюється з часом зі швидкістю 10 мТл/с . Знайти заряд на конденсаторі.

3.91 Кінці котушки індуктивності, вісь якої паралельна однорідному магнітному полю, з'єднані між собою. Електричний опір котушки дорівнює 9 Ом . Число витків котушки $N = 1000$, діаметр витка $d = 10 \text{ см}$. Поле змінюється з часом зі швидкістю 10 мТл/с . Знайти теплову потужність, яка виділяється у котушці.

3.92 Магнітний потік, який пронизує поверхню металевого кільця, змінюється з часом за законом $\Phi(t) = \Phi_0 \exp(-\alpha t^2)$. Знайти максимальне значення сили струму у кільці, якщо його електричний опір $R = 100 \text{ Ом}$, $\Phi_0 = 1 \text{ Вб}$, $\alpha = 1,36 \text{ с}^{-2}$.

3.93 Дві провідні горизонтальні рейки утворюють гострий кут 2α , перпендикулярно до бісектриси якого ковзає, не втрачаючи контакту із рейками, зі сталою швидкістю v перемичка. Магнітне поле з індукцією B напрямлене вертикально, електричний опір одиниці довжини рейок ρ . Опором перемички знехтувати. Який струм протікає через перемичку?

3.94 Коло складається з джерела ЕРС $0,5 \text{ В}$, змінного резистора та котушки з індуктивністю $0,1 \text{ Гн}$. Опори джерела та котушки дуже малі. Починаючи з деякого моменту, протягом 10 с струм у колі лінійно змінювався

від 1 А до 2 А завдяки поступовому зменшенню опору резистора. Чому дорівнював цей опір на початку та у кінці процесу?

3.95 Електрон рухається прямолінійно в схрещених електричному і магнітному полях так, що $\vec{g} \perp \vec{E} \perp \vec{B}$. Встановити швидкість електрона, якщо $E = 20 \text{ кВ/м}$ і $B = 5 \text{ мТл}$.

3.96 Два однозарядних іони, що пройшли однакову прискорюючу різницю потенціалів, влітають в однорідне магнітне поле перпендикулярно лініям індукції. Один іон масою 12 а.о.м. описує дугу кола радіусом $R_1 = 4 \text{ см}$, другий – дугу радіусом $R_2 = 6 \text{ см}$. Встановити масу другого іона.

3.97 Безмежно довгий провідник утворює кругову петлю, дотичну до провідника. Провідником тече струм силою 5 А . Знайти радіус петлі, якщо напруженість магнітного полі у центрі петлі рівна 41 А/м .

3.98 Дротяний виток радіусом $R = 20 \text{ см}$ розміщено у площині меридіану. У центрі витка встановлено компас. Якої величини струм I тече у колі витка, якщо магнітна стрілка компаса відхилилася на кут $\alpha = 9^\circ$ від площини меридіану? Горизонтальна складова індукції магнітного поля Землі складає $B_z = 20 \text{ мкТл}$.

3.99 Обмотка котушки зроблена з дроту діаметром $0,8 \text{ мм}$. Витки щільно прилягають один до одного. Вважаючи котушку досить довгою, знайти напруженість магнітного поля всередині котушки при силі струму 1 А .

3.100 Гвинтова лінія, по якій рухається електрон в однорідному магнітному полі з індукцією $B = 5,0 \text{ мТл}$, має діаметр $d = 80 \text{ мм}$ і крок $h = 200 \text{ мм}$. Встановити швидкість електрона g .

3.101 У невеликому циклотроні з максимальним радіусом $R = 0,50 \text{ м}$ протони пришвидшуються в магнітному полі з індукцією $B = 1,7 \text{ Тл}$. Розрахувати: 1) частоту прискорюючої напруги; 2) максимальну кінетичну енергію протонів, що залишають циклотрон (в MeV).

3.102 Магнітне поле створюється дуже довгим лінійним провідником з силою струму $I = 10 \text{ А}$. Знайти максимальну силу, що діє на точковий диполь з моментом $p_m = 2 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$ в точці на віддалі $a = 0,10 \text{ м}$ від осі провідника. (Енергія диполя в магнітному полі рівна $W_m = -(\vec{p}_m \cdot \vec{B})$.)

3.103 Провідник довжиною $l = 1 \text{ м}$ рухається зі швидкістю $v = 5 \text{ м/с}$ перпендикулярно до ліній індукції однорідного магнітного поля. Визначити магнітну індукцію B , якщо на кінцях провідника виникає різниця потенціалів $\Delta\varphi = 0,02 \text{ В}$. Встановити характер поляризації провідника (її полярність) для заданого напрямку поля.

3.104 Коловидний контур розміщено в однорідному магнітному полі напруженістю $H = 2 \cdot 10^3 \text{ А/м}$ так, що площа контуру перпендикулярна до силових ліній поля. В контурі, що має радіус $r = 20 \text{ см}$, підтримується струм силою $I = 2 \text{ А}$. Яку роботу проти магнітних сил необхідно виконати, щоб повернути контур на $\Delta\alpha = 90^\circ$ навколо осі, яка збігається з діаметром контуру?

3.105 Соленоїд містить $N = 800$ витків і має площу перерізу осердя (з немагнітного матеріалу) $S = 10 \text{ см}^2$. Обмоткою тече струм, який породжує всередині соленоїда поле з індукцією $B = 8 \text{ мТл}$. Визначити середнє значення е.р.с. самоіндукції $\langle E_S \rangle$, яка наводиться на затискачах соленоїда, якщо силу струму за допомогою перемикача зменшити до нуля можна практично за час $\Delta t = 5 \text{ мс}$.

3.106 На каркас, який не містить залізного осердя, намотано котушку довжиною $l = 50 \text{ см}$ та діаметром $d = 10 \text{ см}$ так, що утворилося $N = 1000$ витків провідника. Котушкою тече змінний струм $I(t) = 5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$, А. Встановити: 1) індуктивність котушки; 2) найбільше значення е.р.с. самоіндукції, що збуджується у котушці.