



- **Взаємодія струмів. Магнітне поле. Дія магнітного поля на провідник зі струмом**
- **Індукція магнітного поля. ПОТІК магнітної індукції**
- **Сила Ампера. Сила Лоренца**
- **Магнітні властивості речовини. Магнітний запис інформації**
- **Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції**
- **Індуктивність. Енергія магнітного поля котушки зі струмом**
- **Змінний струм. Генератор змінного струму**
- **Трансформатор. Виробництво, передача та використання енергії електричного струму**

§ 12. ВЗАЄМОДІЯ СТРУМІВ. МАГНІТНЕ ПОЛЕ. ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВІДНИК ЗІ СТРУМОМ

Вам уже відомо, що між нерухомими електричними зарядами діють сили, які визначаються за законом Кулона. Ця взаємодія відбувається так: кожний із зарядів створює електричне поле; поле одного заряду діє на другий заряд і навпаки. Проте між електричними зарядами можуть діяти сили й іншої природи. Взаємодії між провідниками зі струмом, тобто взаємодії між рухомими електричними зарядами, називають магнітними.

Учення про магніти та їх взаємодію тривалий час розвивалося відокремлено, як одна із галузей науки, аж поки низка відкриттів і теоретичних досліджень у ХІХ ст. не довела органічний зв'язок магніта з електрикою.

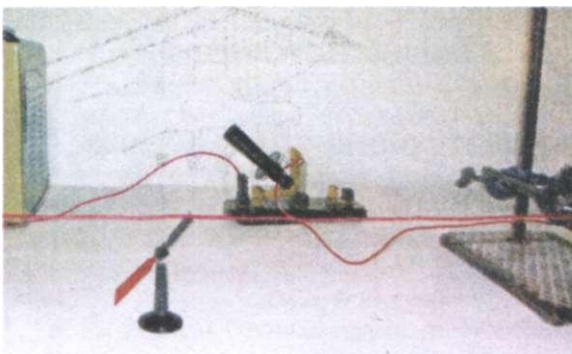
Одним із фундаментальних доведень єдності електричних і магнітних явищ є результат досліду Г.-К. Ерстеда, датського фізика, який у 1820 р. виявив, що магнітна стрілка змінює своє положення поблизу провідника зі струмом (мал. 51).

Очевидним було те, що причиною цього є електричний струм — напрямлений рух заряджених частинок у провіднику.

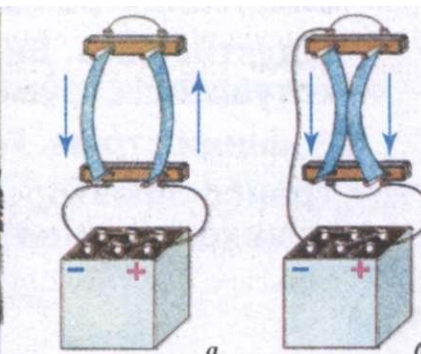
Магнітні явища хоча й пов'язані з електричними, проте не тотожні їм. Це також підтверджується дослідями. Якщо взяти два довгі паралельні провідники і приєднати їх до джерела струму, то ми побачимо, що провідники, по яких струм тече у різних напрямках, відштовхуються один від одного (мал. 52, а), а коли у провідниках струм проходить в одному напрямі, вони притягуються один до одного (мал. 52, б).

Електричний струм в одному з провідників створює навколо себе магнітне поле, яке діє на струм у другому провіднику. Поле, створене електричним струмом другого провідника, діє на перший.

Отже, подібно до того, як у просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, існує електричне поле, у просторі, що оточує струми, існує поле, яке називають магнітним.



Мал. 51



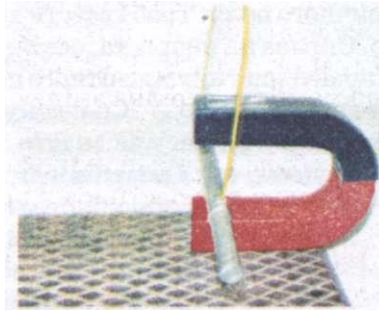
Мал. 52

Взаємодію між провідниками зі струмом, тобто взаємодію між рухомими електричними зарядами, називають магнітною. Сили, з якими провідники зі струмом діють один на одного, називають магнітними силами.

Магнітне поле — це особлива форма матерії, за допомогою якої здійснюється взаємодія між рухомими електрично зарядженими частинками.

Магнітне поле має такі особливості, які відрізняють його від інших полів: магнітне поле завжди зв'язане з рухом заряджених частинок або тіл; магнітне поле діє на рухомі заряджені частинки або тіла.

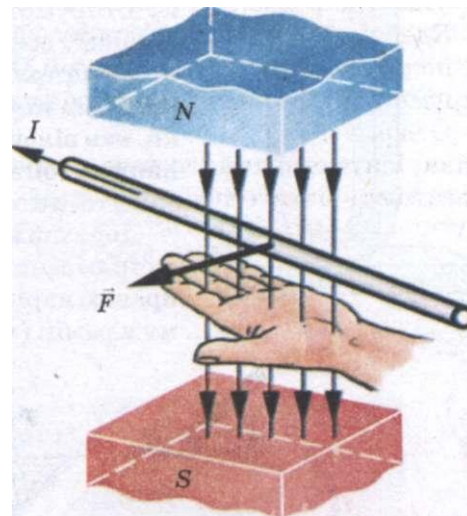
Ви вже знаєте, що два провідники зі струмом взаємодіють один з одним. Це явище пояснюється тим, що сила, яка діє на кожний з провідників, зумовлена магнітним полем, створеним струмом другого провідника. Тому зрозуміло, що коли ми помістимо провідник зі струмом у магнітне поле, наприклад в поле постійного магніту, то на нього діятиме сила. Перевіримо це на досліді. Замкнувши коло, пропустимо струм по вільно підвішеному провіднику, що перебуває в магнітному полі підковоподібного магніту. Ми помітимо, що провідник почне рухатися (мал. 53).



Мал. 53

Якщо ж забрати магніт, то провідник зупиниться. Отже, з боку магнітного поля на провідник зі струмом діє сила F так само, як діє сила з боку магнітного поля на магнітну стрілку. Змінюючи напрям струму або напрям силових ліній магнітного поля, ми помічаємо, що змінюється і напрям руху провідника, а отже, і напрям сили, що діє на провідник.

Напрямок сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, можна визначити, користуючись правилом лівої руки. Руку розміщують так, щоб силові лінії поля входили в долоню, а чотири пальці збігалися з напрямом струму у провіднику, тоді великий палець, відігнутий на 90° , покаже напрям сили, що діє на провідник (мал. 54).



Мал. 54

Рух провідника зі струмом у магнітному полі дуже широко застосовується в техніці: в електродвигунах, у вимірювальних приладах з котушкою, що обертається, і в багатьох інших пристроях.

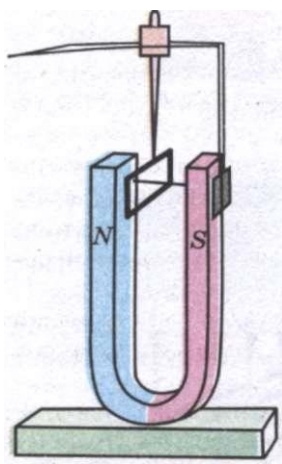
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які взаємодії називають магнітними і в чому їх відмінність від електростатичних взаємодій?
2. Які досліди підтверджують існування магнітного поля?
3. Які сили називаються магнітними?
4. Що таке магнітне поле?
5. Як визначити напрям руху провідника зі струмом у магнітному полі?

§ 13. ІНДУКЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ. ПОТІК МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Електричне поле характеризується векторною величиною — напруженістю електричного поля. Треба ввести величину, що характеризує магнітне поле кількісно. Справа ця не проста, оскільки магнітні взаємодії складніші за електричні. Характеристику магнітного поля називають вектором магнітної індукції і позначають літерою B . Спочатку ми розглянемо лише напрям вектора B .

З курсу фізики 9 класу ви знаєте, що магнітне поле створюється як електричним струмом, так і постійними магнітами. Якщо між полюсами підковоподібного магніту підвісити на гнучких дротах рамку зі струмом, то вона повертатиметься доти, поки її площина не встановиться перпендикулярно до ліній, які напрямлені від північного полюса магніту до південного (мал. 55).

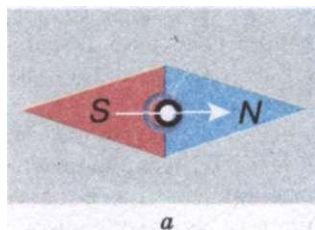


Мал. 55

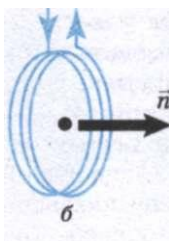
Отже, дія магнітного поля є дією, що орієнтує рамку зі струмом. Це можна використати для визначення напрямку вектора магнітної індукції.

За напрям вектора магнітної індукції беруть напрям від південного полюса S до північного N стрілки, яка вільно встановлюється в магнітному полі. Цей напрям збігається з напрямом додатної нормалі до замкнутого контуру зі струмом (мал. 56, *а, б*).

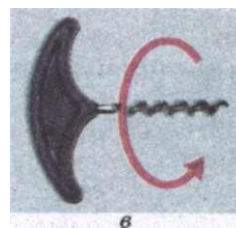
Додатна нормаль, якщо її порівняти зі свердликом, напрямлена у той бік, куди пересувається свердлик з правою нарізкою, якщо його обертати у напрямі струму в рамці (мал. 56, *в*).



а

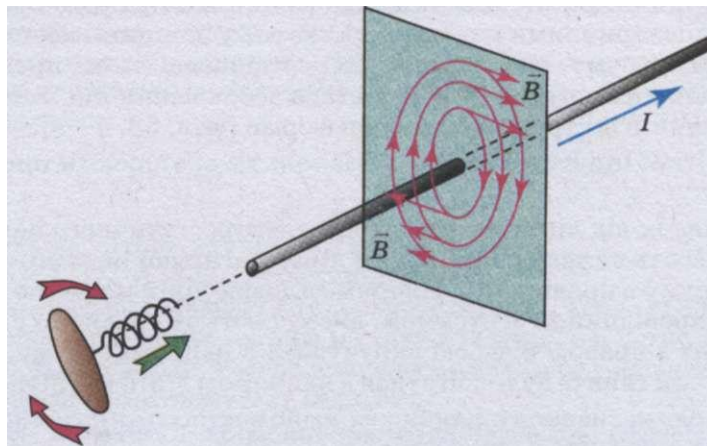


б



в

Мал. 56



Мал. 57

Маючи рамку зі струмом або магнітну стрілку, можна визначити напрям вектора магнітної індукції в будь-якій точці поля. У магнітному полі прямолінійного провідника зі струмом магнітна стрілка встановлюється по дотичній до кола (мал. 57).

Площина кола перпендикулярна до провідника, а його центр лежить на осі провідника. Напрямок вектора магнітної індукції встановлюють за допомогою правила свердлика. Правило свердлика формулюється так: якщо напрям поступального руху свердлика збігається з напрямом струму в провіднику, то напрям обертання ручки свердлика збігається з напрямом вектора магнітної індукції.

Подібно до того як електричні поля графічно зображують за допомогою ліній електричних силових ліній, магнітні поля зображують за допомогою ліній магнітної індукції (або магнітних силових ліній).

Лінії магнітної індукції — це уявні лінії, дотичні до яких у даній точці збігаються за напрямом з вектором \vec{B} у цій точці.

Лінії магнітної індукції можна зробити «видимими» за допомогою залізних ошуків. Якщо на скляну пластинку, крізь яку пропущено прямий провідник зі струмом, насипати залізних ошуків і злегка постукати по пластинці, то вони розмістяться вздовж силових ліній (мал. 58, а—в).



Мал. 58

З дослідів випливає, що лінії магнітної індукції прямого провідника зі струмом є концентричними колами, які лежать у площині, перпендикулярній до напрямку струму. Центри цих кіл розташовані на осі провідника. За допомогою залізних ошуків можна дістати зображення ліній магнітної індукції провідників із струмом будь-якої форми (мал. 58, а–в).

Лінії магнітної індукції завжди замкнені та охоплюють провідники зі струмами.

Це відрізняє їх від ліній напруженості електростатичного поля. Магнітні поля називають **вихровими**. Напрямок ліній магнітної індукції зв'язаний з напрямком струму в провіднику. Напрямок силових ліній магнітного поля, що створюється провідником зі струмом, визначають за правилом свердлика.

Якщо гвинт з правою різьбою вкручувати в напрямку струму, то напрям обертання ручки гвинта буде збігатися з напрямком ліній магнітної індукції.

Магнітне поле називають однорідним, якщо вектори магнітної індукції в усіх його точках однакові ($\vec{B} = \text{const}$).

Прикладом однорідного магнітного поля може бути поле всередині **соленоїда** — котушки, довжина якої значно більша за її діаметр (мал. 58, в). Лінії магнітної індукції однорідного поля паралельні, і їх густина скрізь однакова.

З'ясуємо, від чого залежить сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі. Це нам потрібно для того, щоб дати визначення модуля вектора магнітної індукції.

Горизонтально підвішений провідник перебуває в полі постійного підковподібного магніту. Поле магніту зосереджено в основному між полюсами, тому магнітна сила діє практично лише на частину провідника довжиною Δl , розміщену безпосередньо між полюсами. Силу вимірюють за допомогою спеціального динамометра, зв'язаного з провідником. Вона напрямлена горизонтально перпендикулярно до провідника і ліній магнітної індукції. Збільшуючи силу струму в 2 рази, можна помітити, що й сила, яка діє на провідник, також збільшується в 2 рази. Візьмемо ще один магніт і в 2 рази збільшимо розміри області, де існує магнітне поле, і тим самим у 2 рази збільшимо довжину частини провідника, на яку діє магнітне поле. При цьому сила також збільшиться в 2 рази. І, нарешті, сила залежить від кута, утвореного вектором \vec{B} з провідником. У цьому можна впевнитися, змінюючи нахил підставки, на якій встановлено магніти, так, щоб змінився кут між провідником і лініями магнітної індукції. **Сила досягне максимального значення \vec{F}_{max} , коли вектор магнітної індукції буде перпендикулярним до провідника.**

Отже, максимальна сила, що діє на відрізок провідника довжиною Δl , по якому проходить струм силою I , прямо пропорційна добутку сили струму на довжину відрізка Δl :

$$\vec{F}_{\text{max}} \sim I \Delta l.$$

Цей дослідний факт можна використати для визначення модуля вектора магнітної індукції. Дійсно, оскільки $\vec{F}_{\text{max}} \sim I \Delta l$, то відношення $\frac{\vec{F}_{\text{max}}}{I \Delta l}$ не залежатиме ні від сили струму в провіднику, ні від довжини відрізка провідника. Саме тому це відношення може характеризувати магнітне поле в тому місці, де знаходиться відрізок провідника.

Модулем вектора магнітної індукції називають відношення максимальної сили, що діє з боку магнітного поля на відрізок провідника зі струмом, до добутку сили струму на довжину цього відрізка:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_{\max}}{I\Delta l}.$$

Одиницею магнітної індукції в СІ є одна тесла (**1 Тл**). **1 Тл = 1 Н/1 А · 1 м**. Ця одиниця названа на честь відомого югославського електротехніка Н. Тесла (1857—1943).

Однією з характеристик вектора магнітної індукції є її потік. Магнітний потік позначають літерою Φ . Розглянемо плоску пластинку площею ΔS , розміщену в однорідному магнітному полі (мал. 59).

Магнітним потоком Φ крізь поверхню ΔS називають фізичну величину, яка визначається добутком B_n (проекції вектора магнітної індукції на нормаль до поверхні) і площею цієї поверхні:

$$\Phi = B_n \Delta S \cos \alpha,$$

де α — кут між напрямом нормалі \vec{n} і вектором індукції \vec{B} .

Оскільки $B_n = B \cos \alpha$ — величина скалярна, то скаляром є і магнітний потік.

Магнітний потік Φ характеризує кількість ліній магнітної індукції, що проходять крізь дану поверхню.

Для однорідного поля і плоскої поверхні, що перпендикулярна до вектора \vec{B} , $B_n = B = \text{const}$, маємо

$$\Phi = BS.$$

Одиницею магнітного потоку в СІ є один вебер (**1 Вб**).

1 вебер — потік через плоску поверхню площею **1 м²**, розміщену перпендикулярно до силових ліній однорідного магнітного поля, індукція якого дорівнює 1 Тл:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

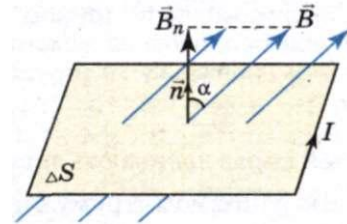
ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення модуля вектора магнітної індукції.
2. Що таке лінії магнітної індукції?
3. Що таке магнітний потік?
4. Які одиниці індукції магнітного поля і магнітного потоку в СІ?

§ 14. СИЛА АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА

Одним із проявів магнітного поля є його силова дія на рухомі електричні заряди і провідники зі струмом. У 1820 р. А. Ампер установив закон, який визначає силу, що діє на відрізок провідника зі струмом в магнітному полі.

Оскільки створити відокремлений елемент струму не можна, то Ампер вивчав поведінку рухомих дрітчастих замкнених контурів різної форми. Він установив, що



Мал. 59

на провідник зі струмом, вміщений в однорідне магнітне поле, індукція якого B , діє сила, пропорційна довжині відрізка провідника Δl , силі струму I , який проходить по провіднику, та індукції магнітного поля B :

$$F_A = BI\Delta l \sin \alpha,$$

цей вираз називають законом Ампера, а силу — силою Ампера. Тут α — кут між напрямом струму в провіднику і напрямом вектора \vec{B} . Ця сила буде мати максимальне значення при $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Якщо ж провідник розміщено уздовж ліній магнітної індукції, то ця сила дорівнює нулю.

Напрямок сили Ампера визначається за допомогою правила лівої руки, з яким ви ознайомилися раніше (див. мал. 54).

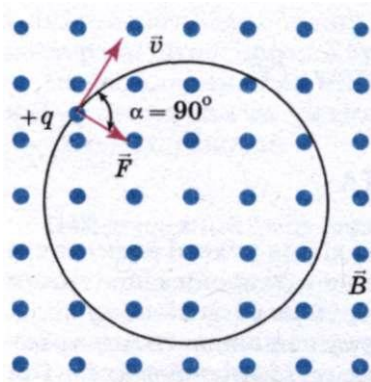
Як ми вже з'ясували, магнітне поле взаємодіє лише з провідниками, через які тече струм, і не впливає на провідники без струму. Це свідчить про те, що магнітне поле діє не на матеріал провідника, а на заряджені частинки (електрони чи йони), які в ньому переміщуються. В такому випадку сила Ампера є результуючою всіх сил, які діють на окремі рухомі заряджені частинки.

Визначимо силу, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі. Нехай на провідник довжиною l , по якому тече струм силою I і який знаходиться в магнітному полі з індукцією B , діє сила $F_A = BI l \sin \alpha$. Але сила струму визначається за формулою $I = envS$. Тоді $F_A = nevSB l \sin \alpha$, де добуток Sl — об'єм провідника, $N = nSl$ — кількість заряджених частинок, які рухаються в цьому провіднику. Тоді силу, яка діє на одну рухоми частинку, можна визначити, поділивши силу F_A , яка діє на всі частинки, на загальну кількість рухомих заряджених частинок N :

$$F_{\text{Л}} = \frac{F_A}{N} = evB \sin \alpha.$$

Отже, сила, яка діє на заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, пропорційна заряду частинки, швидкості її переміщення та індукції магнітного поля:

$$F_{\text{Л}} = evB \sin \alpha.$$



Мал. 60

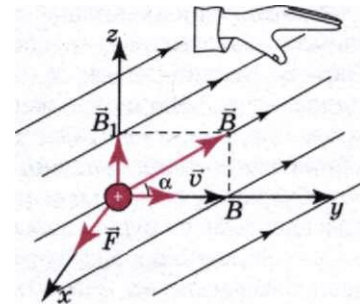
Цю формулу вперше одержав голландський фізик Г. Лоренц, і тому її звичайно називають формулою Лоренца, а силу, яка обчислюється за цією формулою, називають силою Лоренца.

З формули випливає, що сила Лоренца залежить від кута між напрямом руху зарядженої частинки і напрямом вектора індукції магнітного поля. Магнітне поле не діє на нерухомі заряджені частинки ($F_{\text{Л}} = 0$ при $v = 0$) і на частинки, які рухаються вздовж ліній індукції поля ($\sin \alpha = 0$). Сила Лоренца буде максимальною, якщо частинка влітає в магнітне поле перпендикулярно до ліній його індукції. У цьому випадку $F_{\text{Л}} = evB$. Якщо поле однорідне ($B = \text{const}$), то за-

ряджена частинка описуватиме коло (мал. 60), оскільки рух під дією сталої сили, напрямленої під прямим кутом до швидкості руху, згідно з другим законом динаміки, іншим бути не може.

Напрямок сили Лоренца, як і сили Ампера, визначається за правилом лівої руки:

якщо ліву руку розмістити так, щоб складова магнітної індукції \vec{B} , перпендикулярна до швидкості руху заряду, входила в долоню, а випрямлені чотири пальці були напрямлені за рухом позитивного заряду (проти руху негативного), то відігнутий на 90° великий палець покаже напрям сили Лоренца \vec{F}_L , яка діє на заряд, вміщений у магнітне поле (мал. 61).



Мал. 61

При цьому потрібно пам'ятати, що це справедливо для позитивно заряджених частинок. Якщо визначається напрям сили Лоренца, що діє на електрон (чи іншу негативно заряджену частинку), то при застосуванні правила потрібно змінювати напрям швидкості руху на протилежний.

Дія сили Лоренца застосовується в багатьох приладах і технічних установках. Так, зміщення електронного променя, що «малює» зображення на екрані кінескопа телевізора чи дисплея комп'ютера, здійснюється магнітним полем спеціальних котушок, в яких проходить електричний струм, що змінюється за певним законом. У наукових дослідженнях використовуються так звані циклічні прискорювачі заряджених частинок, в яких магнітне поле потужних електромагнітів утримує заряджені частинки на колових орбітах.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення сили Ампера.
2. Як визначається сила Лоренца?
3. За якими правилами визначається напрям сили Ампера і сили Лоренца? Що потрібно при цьому враховувати?



Це цікаво знати

Дослідження магнітного поля струму

1. «Правило плавця». У 1820 р. у Женеві на зборах натуралістів **Араго** побачив повторення дослідів Ерстеда. І, повернувшись до Франції, вирішив ознайомити із ними своїх співвітчизників. Для цього він сконструював нехитру установку з вольтовим стовпом і продумав хід експериментів.

Щоб стрілка компаса легше оберталася, він загострив опорну голку, увімкнув струм, і магнітна стрілка почала відхилятися срібним провідником зі струмом від свого напрямку. Але що це? Араго протирає срібний провідник і знімає з нього приліплені металеві ошурки. Потім кладе провідник знову на стіл, і ошурки відразу ж прилипають до нього... Араго вимикає струм, і ошурки осипаються зі срібного провідника, вмикає — вони обліплюють провідник, немов би срібло стало магнітом! Щасливе відкриття, значення якого Араго зрозумів відразу.

У той момент, коли Араго закінчив дослід, почувся стукіт у двері. Араго виглянув у вікно і побачив Ампера — академік Андре Марі Ампер — найгеніальніший і найрозсіяніший з його друзів. Вигляд Ампера свідчив проте, що вчений вже давно вишов із дому, бродячи вулицями Парижа і міркуючи над своїми геніальними відкриттями.

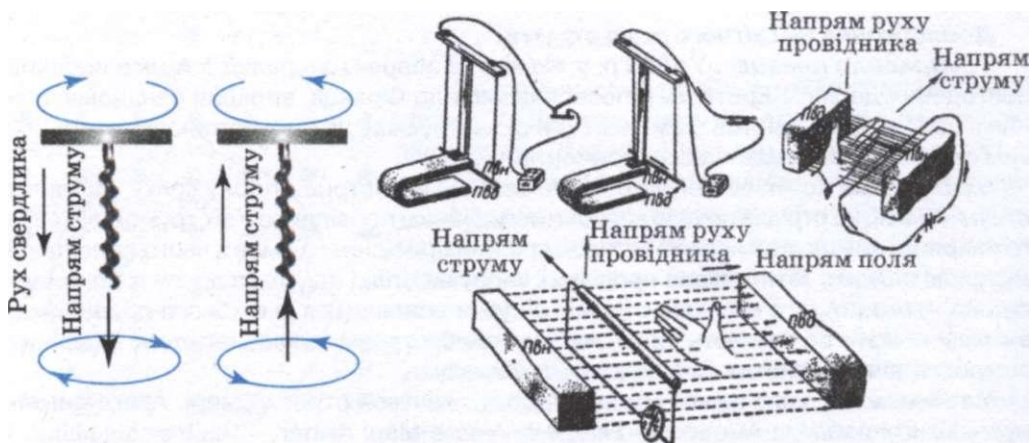
Ампер увійшов до кімнати, де Араго проводив свої досліди. «Я бачу, що Ви займаєтесь гальванічними дослідами», — зауважив Ампер. «Ви праві. Я відтворив дослід Ерстеда, і, як мені здається, натрапив на нове явище. Можливо воно зацікавить Вас», — відповів Араго. Він знову замикає коло і наближує провідник до ошурків, які обліплюють провідник, а коли вимикає струм, то ошурки висипаються на долоні Ампера. Радісний вчений вигукує: «Прекрасно, це лише зайвий раз доводить, що я правий. Заряди, які перебувають у спокої, не взаємодіють із магнітною стрілкою!» Ампер продовжує: «А як Вам здається, чи будуть взаємодіяти два провідники зі струмом, як магніти?»

Не очікуючи відповіді, Ампер виходить із помешкання Араго, у нього в голові визріває нова геніальна думка. Вчений крокує набережною Сени, перебуваючи у такому радісному та щасливому стані, який буває лише тоді, коли стає зрозумілим те, над чим довго і наполегливо працюєш і думаєш. Раптом Ампер звертає увагу на хлопчиків, які у річці плавали за течією, весело перегукуючись, і тут вченому приходить у голову геніальна думка про просте правило, за допомогою якого можна завжди визначити відхилення магнітної стрілки електричним струмом. Він вирішив назвати це правило «правилом плавця». Якщо людина буде плести за течією, напрям якої збігається з напрямом струму, то плавець завжди буде бачити, що північний кінець магнітної стрілки відхиляється під дією цього струму вправо. Bravo Ампер! Вчений оглянувся: як добре було б усе це накреслити тут, поставити стрілки, визначити напрями. Ось і кусочок крейди знайшовся у кишені, а ось і чорна дошка. Перехожі парижани почали здивовано обертатися на літнього (не дуже охайно одягнутого) джентльмена, який із великим захопленням розмальовував крейдою ... задню стінку чорної карети. 18 червня 1820 р. на засіданні Паризької академії наук А. Ампер розпочав свою знамениту серію доповідей із електромагнетизму.

2. «Правило свердлика».

На мал. 62 схематично проілюстровано «правило свердлика», відкрите Дж. Максвеллом. Гвинт рухається вниз за годинниковою стрілкою (точки зору спостерігача, який дивиться в напрямі поступального руху). Такий самий напрям має магнітний потік, що викликає коловий струм.

3. «Правила правої та лівої руки». До двох правил, відкритих Ампером («правило плавця») та Максвеллом («правило свердлика») англійський вчений, фізик та електротехнік **Д. Флемінг** додав два інші: «правила правої та лівої руки» для визначен-



Мал. 62

Мал. 63

ня напряму струму, магнітного поля і напряму руху провідника під впливом магнітного поля. На мал. 63 надано схему, що ілюструє ці два правила Флемінга.

На верхньому малюнку сила взаємодії полів магніту і провідника зі струмом приводить магніт у рух. Напрямок руху провідника визначається за «правилом лівої руки» (двигун), на нижньому малюнку напрям електрорушійної сили, індукованої у замкненому контурі при його переміщенні у магнітному полі, визначається за «правилом правої руки» (генератор).

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Які із заряджених космічних частинок — з більшою чи меншою швидкістю руху, — що пролітають поблизу екваторіальної площини Землі, найближче проникають до її поверхні? Чому?

Розв'язання

Оскільки радіус кола, яке описує заряджена частинка в магнітному полі, $r \sim v$, то найближче до Землі підлетять найшвидші частинки.

2. Прямий дріт довжиною 10 см, по якому тече струм 0,5 А, розміщений в однорідному магнітному полі перпендикулярно до силових ліній. Визначте індукцію магнітного поля, якщо воно діє на дріт силою 2,6 мН.

Розв'язання

Сила, з якою однорідне магнітне поле діє на прямий провідник, визначається за формулою Ампера $F_A = BIl \sin \alpha$.

$$\text{Звідси визначимо } B = \frac{F}{Il \sin \alpha}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо $B = 52$ мТл.

3. Протон, проходячи прискорюючу різницю потенціалів 400 В, влетів в однорідне магнітне поле з індукцією 0,2 Тл і почав рухатися по колу. Визначте радіус кола, по якому він рухався.

Розв'язання

На заряджену частинку, яка влетіла в магнітне поле діє сила Лоренца

$$F_L = qvB \sin \alpha.$$

За умовою задачі протон рухається по колу, тоді сила Лоренца є доцентровою силою $F = \frac{mv^2}{R}$. Отже, $qvB = \frac{mv^2}{R}$, звідки $R = \frac{mv}{qB \sin \alpha}$.

Протон отримав швидкість, пройшовши прискорюючу різницю потенціалів. За законом збереження енергії, робота, яку виконує поле при переміщенні протона, дорівнює кінетичній енергії, набутій протоном, тобто, $A = E_k = \frac{mv^2}{2}$. А робота сил

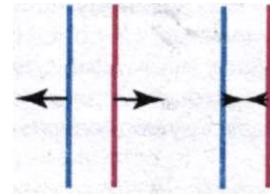
електричного поля при переміщенні заряду визначається за формулою $A = qU$. Тоді $qU = \frac{mv^2}{2}$, звідки $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$.

Отже, радіус кола, по якому рухався протон, визначимо за формулою $R = \frac{\sqrt{2qUm}}{qB \sin \alpha}$.

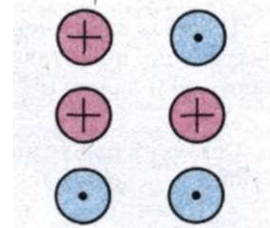
Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо $R = 1,45$ см.

Рівень А

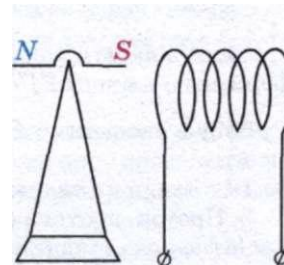
104. Які напрями має струм у проводах, коли сили взаємодії напрямлені так, як на мал. 64?
105. Як взаємодіють паралельні струми, напрямлені так, як зображено на мал. 65?
106. Позначте знаками «+» та «-» полюси джерела струму, яке живить соленоїд, щоб спостерігалася показана на мал. 66 взаємодія.
107. Яка індукція магнітного поля, що діє силою 50 мН на провідник довжиною 5 см, по якому тече струм силою 2,5 А, напрямлений перпендикулярно до ліній магнітної індукції?
108. Яка довжина активної частини провідника, якщо при силі струму в ньому 4 А на нього діє силою 0,2 Н магнітне поле, індукція якого 0,5 Тл? Напрями струму і поля взаємно перпендикулярні.
109. Якої сили струм тече провідником довжиною 40 см, вміщеним у магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції, якщо магнітне поле з індукцією 1 Тл діє на провідник з силою 0,8 Н?
110. Яка сила діє на провідник довжиною 10 см в однорідному магнітному полі, якщо його магнітна індукція становить 2,6 Тл, а сила струму у провіднику дорівнює 12 А. Кут між напрямом струму і лініями індукції: 1) 90° ; 2) 30° ?
111. На провідник довжиною 50 см із струмом силою 20 А, розміщений в однорідному магнітному полі, що має магнітну індукцію 0,1 Тл, діє сила 0,5 Н. Визначте кут між напрямом струму в провіднику і вектором магнітної індукції.
112. Яка сила струму в провіднику довжиною 20 см, розташованому в однорідному полі, що має магнітну індукцію 2 Тл, коли сила, яка діє на провідник, дорівнює 0,75 Н, а кут між напрямом ліній магнітної індукції і струму дорівнює 49° ?
113. Який магнітний потік пронизує плоску поверхню площею 50 см^2 при індукції поля 0,4 Тл, якщо ця поверхня: а) перпендикулярна до вектора індукції поля; б) розташована до вектора індукції під кутом 45° ; 30° ?
114. Магнітний потік у середині контуру, площа поперечного перерізу якого 60 см^2 , становить 0,3 мВб. Визначте індукцію поля в середині контуру. Вважати, що поле однорідне.
115. Визначте магнітний потік, що пронизує плоску прямокутну площину завдовжки 60 см і завширшки 25 см, якщо магнітна індукція в усіх її точках дорівнює 1,5 Тл, а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до цієї площини кут 90° .
116. Визначте знак заряду частинки за напрямом її руху і напрямом сили Лоренца (мал. 67 і 68).
117. Швидкість електрона e напрямлена до нас (мал. 69). А. В якому напрямі відхилиться електрон під дією маг-



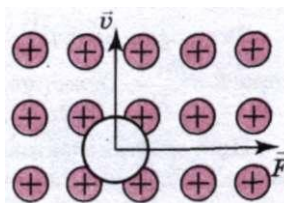
Мал. 64



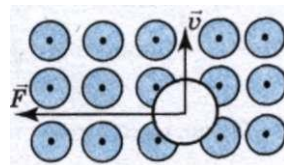
Мал. 65



Мал. 66

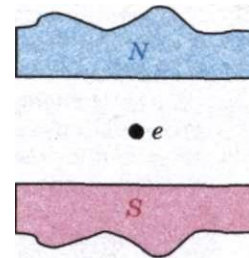


Мал. 67



Мал. 68

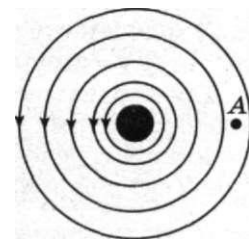
- нітного поля? Б. Відповісти на те саме запитання, якщо:
- 1) швидкість електрона напрямлена в протилежний бік;
 - 2) лінії магнітної індукції напрямлені в протилежний бік.
118. Електрон рухається у вакуумі в однорідному магнітному полі, індукція якого $0,1 \text{ Тл}$, зі швидкістю $3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Чому дорівнює сила, що діє на електрон, якщо кут між напрямом його швидкості і лініями індукції становить 90° ?
119. Яка сила діє на протон, що рухається зі швидкістю 10 Мм/с в магнітному полі з індукцією $0,2 \text{ Тл}$ перпендикулярно до лінії індукції?
120. Електрон рухається у вакуумі в однорідному полі, магнітна індукція якого $5 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$, зі швидкістю $1 \cdot 10^4 \text{ км/с}$, напрямленою перпендикулярно до лінії індукції. Визначте силу, що діє на електрон.



Мал. 69

Рівень В

121. На мал. 70 зображено магнітне поле прямого струму:
- а) який напрям має струм у провіднику? б) чи є поле в точці А? в) який напрям має вектор магнітної індукції у будь-якій точці поля? г) визначте напрям сил, які діють у цьому полі на полюси магнітної стрілки.
122. Чим відрізняється магнітне поле від електростатичного?
123. Чому струмінь розплавленого металу, коли пропускати крізь нього струм, звужується (зменшується площа поперечного перерізу)? Як можна застосувати це явище в металургії?
124. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими l , в одному напрямі течуть струми I_1 та I_2 . Визначте індукцію магнітного поля в точці А, яка лежить на продовженні прямої, що з'єднує провідники на відстані S від другого провідника. Вважати, що обидва провідники знаходяться у вакуумі.
125. Струм силою I , що проходить по кільцю з мідного проводу перерізом S , створює в центрі кільця індукцію магнітного поля, що дорівнює B . Яка різниця потенціалів між кінцями провідника, що утворює кільце?
126. При переміщенні провідника довжиною 80 см зі струмом силою 20 А в однорідному магнітному полі з індукцією $1,2 \text{ Тл}$ перпендикулярно до нього виконано роботу $1,92 \text{ Дж}$. Визначте переміщення провідника.
127. Для переміщення на $0,25 \text{ м}$ провідника довжиною $0,4 \text{ м}$ в однорідному магнітному полі, індукція якого $1,25 \text{ Тл}$ було виконано роботу $0,25 \text{ Дж}$. Якої сили струм проходив провідником, якщо він рухався перпендикулярно до поля?
128. По горизонтально розташованому провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г проходить струм силою 10 А . Визначте індукцію (модуль і напрям) магнітного поля, в якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася силою Ампера.
129. Який магнітний потік пронизує плоску прямокутну площину довжиною 50 см і шириною 30 см , коли магнітна індукція становить 2 Тл , а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до площини кут 90° , 45° , 0° ?
130. Плоский контур, площа якого дорівнює 25 см^2 , знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $0,04 \text{ Тл}$. Визначте магнітний потік, що пронизує контур, якщо його площина утворює кут 30° з лініями індукції.
131. Електрон, який має швидкість $1,9 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, влітає в однорідне магнітне поле, перпендикулярне до напрямку його руху. Індукція магнітного поля становить $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$. Визначте радіус кривизни траєкторії електрона і його доцентрове прискорення.



Мал. 70

132. Траєкторія електрона є дугою кола радіусом 10 см. Індукція магнітного поля $1 \cdot 10^{-2}$ Тл. Визначте швидкість руху електрона і період його обертання.
133. В однорідне магнітне поле з індукцією 10 мТл перпендикулярно до ліній індукції влітає електрон, кінетична енергія якого 30 кеВ. Визначте радіус кривизни траєкторії руху електрона у полі.
134. Електрон рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого 4 мТл. Визначте період обертання електрона.

§ 15. МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИНИ. МАГНІТНИЙ ЗАПИС ІНФОРМАЦІЇ

Магнітне поле створюється не тільки електричними струмами, а й постійними магнітами. Постійні магніти можна виготовити тільки з небагатьох речовин, але всі ті речовини, вміщені в магнітне поле, намагнічуються, тобто самі створюють магнітне поле. Тому вектор магнітної індукції \vec{B} в однорідному магнітному середовищі відрізняється від вектора \vec{B}_0 у тій самій точці простору у вакуумі.

Для характеристики впливу середовища на магнітну взаємодію струмів (тобто магнітних властивостей речовин) вводять поняття відносної магнітної проникності речовини. Якщо магнітна індукція в середовищі дорівнює \vec{B} , а у вакуумі цей самий струм створює індукцію \vec{B}_0 , то відношення

$$\frac{\vec{B}}{\vec{B}_0} = \mu,$$

яке показує, у скільки разів магнітна індукція в речовині більша за магнітну індукцію, створювану цим самим струмом у вакуумі, називають відносною магнітною проникністю даної речовини.

Природно, що відносна магнітна проникність речовини є величиною безрозмірною.

Залежно від значення відносної магнітної проникності всі речовини можна поділити на дві групи: 1) парамагнетики, для яких $\mu > 1$; 2) діамагнетики, для яких $\mu < 1$. Згідно з різними значеннями відносної магнітної проникності речовини по-різному поведуться в магнітному полі.

Молекули парамагнетиків мають відмінні від нуля власні магнітні моменти.

Магнітний момент — векторна величина, що характеризує взаємодію тіла з магнітним полем.

Якщо магнітне поле відсутнє, то ці моменти розміщені хаотично, тому вектор намагнічення дорівнює нулю.

Якщо в магнітне поле внести парамагнетик, то магнітні моменти окремих атомів або молекул орієнтуються за напрямом поля так, що власне поле парамагнетика буде підсилювати зовнішнє магнітне поле, тобто зовнішнє магнітне поле буде підсилюватися. Якщо такий ефект існує, то він має велике значення і перевагу над діамагнетизмом.

Тепловий рух атомів і молекул руйнує взаємну орієнтацію магнітних моментів молекул, тому намагніченість парамагнетика залежить від тем-

ператури, і відносна магнітна проникність парамагнетиків спадає із збільшенням температури. Відносна магнітна проникність парамагнетиків, як і діамагнетиків, не залежить від індукції зовнішнього магнітного поля. Парамагнетиками є лужні метали, кисень, алюміній, платина.

Діамагнетики, вміщені в магнітне поле, навпаки, послаблюють його.

Це послаблення можна пояснити

виникненням у діамагнетик у внутрішнього магнітного поля, направленого проти зовнішнього магнітного поля. До діамагнетиків належать майже всі гази, мідь, золото, срібло, алмаз, графіт тощо.

Різницю у намагнічуванні парамагнетиків і діамагнетиків легко виявити якісно, спостерігаючи поведінку речовин у сильному магнітному полі. Підвісимо, наприклад, між полюсами сильного електромагніту стержень із графіту і зорієнтуємо його вздовж поля (мал. 71).

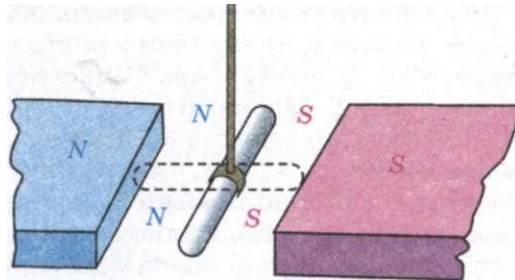
Увімкнемо електромагніт в електромережу. Графітовий стержень повернеться в магнітному полі і встановиться перпендикулярно до його ліній індукції. Це можна пояснити тим, що під час намагнічення стержня на його кінцях виникають магнітні полюси, однойменні з ближчими полюсами зовнішнього електромагніту, і стержень виштовхується з магнітного поля. Особливо чітко видно виштовхування діамагнетика з магнітного поля, якщо між полюсами електромагніту запалити свічку. Гази полум'я мають діамагнітні властивості, і тому полум'я виштовхується магнітним полем.

Граничним випадком парамагнетизму є феромагнетизм. Магнітна проникність більшості феромагнетиків за звичайних температур вимірюється сотнями й тисячами одиниць, а деяких спеціально виготовлених феромагнетиків — може досягати одного мільйона. Це означає, що у феромагнетиках внутрішнє магнітне поле може в сотні й тисячі разів перевищувати зовнішнє магнітне поле. Наприклад, якщо в котушку вставити сталеве осердя, то за такої самої сили струму в котушці магнітна індукція поля зросте в сотні разів. До феромагнетиків, крім заліза, належать нікель, кобальт, гадоліній, деякі сплави і хімічні сполуки.

Феромагнетики мають ще ряд властивостей, які істотно відрізняють їх від діа- і парамагнетиків. Характерною особливістю феромагнетиків є складна залежність індукції внутрішнього поля намагніченого феромагнетика від індукції зовнішнього поля намагнічуючих струмів.

Для феромагнетиків характерна властивість, яку називають гістерезисом. Суть її полягає в тому, що процеси намагнічення і розмагнічення проходять неоднаково. Феромагнетик, який перебував у магнітному полі, зберігає певне намагнічення навіть у разі відсутності поля. Прикладом цього можуть бути постійні магніти.

Важко уявити сучасну радіоелектроніку без елементів із штучних феромагнетиків — феритів. З них виготовляються антени, осердя коливальних контурів та трансформаторів. Широко використовують феритові постійні магніти.



Мал. 71

Без магнітних матеріалів не можна уявити сучасні методи запису інформації. Типовим прикладом пристрою для запису на магнітній плівці є магнітофон. У цьому апараті використовується спеціальна плівка, покрита тонким шаром феромагнітного матеріалу. Змінний електричний струм від підсилювача надходить у спеціальну записуючу головку, що має котушку з феромагнітним осердям, в якому є вузька щілина. При проходженні струму котушкою в щілині головки з'являється магнітне поле, магнітна індукція якого змінюється. Коли плівка проходить над головкою, на ній залишається низка намагнічених ділянок, відповідних змінному струму, який подається в головку. При відтворенні звуку відбувається зворотний процес: намагнічена стрічка збуджує в магнітній головці електричні сигнали, які після підсилення надходять на динамік. Подібний фізичний процес відбувається під час запису інформації на диску вінчестера в сучасному комп'ютері.

Відомо, що як Земля породжує магнітне поле, так і кожен живий організм утворює таке поле. Існування магнітного поля впливає на організм людини, а саме, викликає збудження атомів і молекул і значні зміни на атомному рівні, збільшує активність молекул і прискорює метаболізм клітин. Крім того, розширює кровоносні судини, знижує згортання крові, підтримує здатність тромбоцитів триматися разом і збільшує споживання кисню. Можна сказати, що за відсутності магнітного поля тіло людини та інших живих організмів буде мати серйозні проблеми з правильною роботи.

Кожна клітина, тканина, орган нашого тіла генерує електромагнітне поле, що перебуває в гармонії з магнітним полем Землі і взаємодіє з космосом. Сьогодні на магнітне поле нашої планети впливає величезна кількість штучних полів. Це спотворює наше біополе, і воно перестав нормально функціонувати.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яка величина характеризує магнітні властивості середовища?
2. Які тіла називають феромагнетиками?
3. З якою метою застосовують феромагнітні матеріали?
4. Чи впливає магнітне поле на живі організми?



Це цікаво знати

Дослідження взаємодії речовини і магнітного поля. У 1837 р. М. Фарадей показав, що не лише залізо і сталь виявляють магнітні властивості: подібні властивості, хоч і в значно меншій мірі, характерні для всіх речовин. Підвішуючи на тонких нитках між полюсами сильного магніту невеликі стерженьки різних речовин, учений побачив, що стерженьки, виготовлені з одних речовин, розміщуються в напрямі від полюса до полюса. Ці тіла Фарадей назвав **парамагнітними** (з грец. *para* — уздовж). Такі, наприклад, метали, як алюміній, манган, платина. Стерженьки ж з інших речовин розміщувались перпендикулярно до лінії, що сполучає магнітні полюси. Фарадей назвав їх **діамагнітними** (з грец. *dia* — уперек). Такими виявились мідь, срібло, золото, вода, вісмут й інші. Ці самі властивості мають яблуко, хліб, м'ясо.

Речовини, які здатні сильно намагнічуватися, Фарадей назвав **феромагнітними** (буквально — залізомагнітними). Це — залізо, сталь, чавун, нікель, кобальт й інші.

Досліджуючи магнітні властивості різних речовин, Фарадей дійшов висновку, що вони мають неоднакову **«магнітну проникність»**. Виявляючи одну за одною приховані

таємниці природи, він все більше і більше схилявся до такої думки: «Всі сили природи можуть перетворюватися одна в одну».

Давня суперечка між ученими про причину виникнення електрики в гальванічних батареях закінчилася прийняттям точки зору Фарадея: «Хімічна дія розчинів на метал, а не лише просте стикання або контакт металів, викликає електричний струм. У гальванічних батареях хімічна енергія перетворюється в електричну».

§ 16.**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ.
ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ**

Як вам відомо, електричне поле створюється електричними зарядами, а магнітне поле — рухомими зарядами, тобто електричним струмом. Між ними існує дуже тісний взаємозв'язок. Магнітне поле, що змінюється в часі, породжує електричне поле, а змінне електричне поле породжує магнітне. Без цього зв'язку між полями різноманітність виявів електромагнітних сил не була б такою широкою, якою вона є насправді. Не існувало б ні радіохвиль, ні світла.

Перший вирішальний крок у відкритті нових властивостей електромагнітних взаємодій зробив основоположник уявлень про електромагнітне поле М. Фарадей. Він був упевнений в єдиній природі електричних і магнітних явищ. Завдяки цьому Фарадей зробив відкриття, що лежить в основі будови всіх генераторів електростанцій світу, які перетворюють механічну енергію в енергію електричного струму.

Це відкриття було зроблене 29 серпня 1831 р. й отримало назву явища електромагнітної індукції.

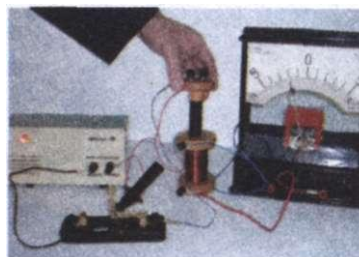
Явище електромагнітної індукції — це виникнення електричного струму в провідному контурі, який або розміщено нерухомо в змінному магнітному полі, або переміщається в постійному магнітному полі так, що кількість ліній магнітної індукції, які перетинають контур, змінюється.

Явище електромагнітної індукції Фарадей досліджував за допомогою двох ізольованих одна від одної дротяних спіралей, намотаних на дерев'яні котушки (мал. 72). Одну спіраль було з'єднано з гальванічною батареєю, а другу — з гальванометром, який реєструє слабкі струми. У моменти замикання і розмикання кола першої спіралі стрілка гальванометра в колі другої спіралі відхилялась.

Виконавши безліч дослідів, Фарадей встановив, що в замкнених провідних контурах електричний струм виникає тільки тоді, коли вони розміщені в змінному магнітному полі, незалежно від того, як змінюється з часом потік індукції магнітного поля.

Струм, який виникає під час явища електромагнітної індукції, називають індукційним.

Індукційний струм у котушці з металевого дроту виникає також під час зміни сили струму



Мал. 72

в другій котушці, магнітне поле якої пронизує першу котушку. Індукційний струм виникає також під час руху котушки відносно нерухомого постійного магніту. Якщо з'єднана з гальванометром котушка рухається повільно в однорідному полі, то індукційний струм не виникає, бо кількість силових ліній, що перетинають котушку, весь час залишається незмінною.

Поява електричного струму в замкненому контурі під час зміни магнітного поля, що його пронизує, свідчить про дію в контурі сторонніх сил неелектростатистичної природи або про виникнення ЕРС індукції. Явища електромагнітної індукції кількісно описують на основі встановлення зв'язку між ЕРС індукції і магнітним потоком. Ця величина залежить від значень вектора не в одній точці, а в усіх точках поверхні, обмеженої плоским замкненим контуром.

Причина виникнення індукційного струму полягає, перш за все, в тому, що в замкненому контурі спочатку виникає ЕРС, а вже потім під її впливом у контурі, опір якого R , проходить індукційний струм — такий, якого потре-

бує закон Ома для повного кола $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$. Досліди Фарадея показали,

що сила індукційного струму пропорційна швидкості зміни магнітного потоку

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ через поверхню, обмежену контуром:

$$I_1 \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Опір провідника не залежить від швидкості зміни магнітного потоку. Отже, $I_1 \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ тільки тому, що ЕРС індукції

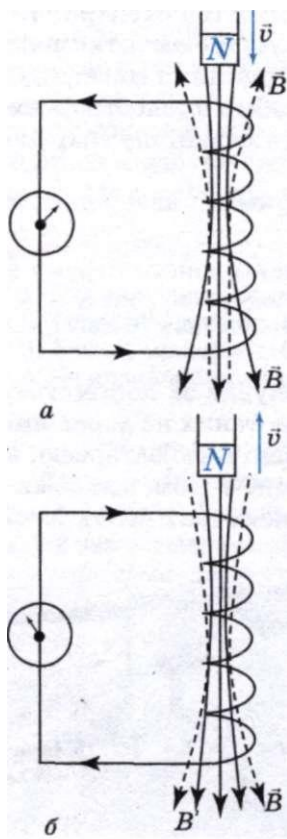
$$\mathcal{E}_1 \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Закон електромагнітної індукції сформульовано саме для ЕРС, оскільки за такого формулювання він виражає суть явища, незалежного від властивостей провідників, у яких виникає індукційний струм. Згідно із законом електромагнітної індукції ЕРС індукції в замкненому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, що обмежена контуром:

$$\mathcal{E}_1 = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Ця формула описує фундаментальний закон природи — основний закон електромагнітної індукції. Час-то цей закон називають законом Фарадея.

Під час проведення дослідів з електромагнітної індукції можна помітити, що стрілка приладу відхиляється то в один бік, то в другий, що свідчить про різні напрями індукційного струму (мал. 73, а, б).



Мал. 73

Російський вчений Е. Ленц застосував до явища електромагнітної індукції закон збереження і перетворення енергії і сформулював правило, користуючись яким можна визначити напрям індукційного струму.

Правило Ленца формулюється так:

індукційний струм, що виникає в замкненому контурі, протидіє зміні магнітного потоку, який збуджує цей струм.

Правило Ленца є виявом закону збереження і перетворення енергії в електромагнітних процесах. Енергія індукційного струму в провіднику дорівнює тій роботі, що виконується з подолання протидії магнітного поля, створеного індукційним струмом.

Застосуємо це правило до закону електромагнітної індукції. На мал. 74 зображено замкнений контур. Додатним вважатимемо напрям обходу контуру проти руху годинникової стрілки. Нормаль до контуру \vec{n} утворює правий гвинт з напрямом обходу. Нехай магнітна індукція \vec{B} напрямлена вздовж нормалі до контуру і з часом зростає. Тоді $\Phi > 0$ і $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$.

Згідно з правилом Ленца індукційний струм створює магнітний потік $\Phi' < 0$. Силкові лінії магнітного поля індукційного струму зображено на мал. 74 штрихом. Отже, цей струм I згідно з правилом свердлика напрямлений за рухом годинникової стрілки (проти напрямку додатного обходу) і ЕРС індукції від'ємна. Тому в рівнянні електромагнітної індукції має стояти знак мінус, який вказує, що \mathcal{E}_i і $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ мають різні знаки:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

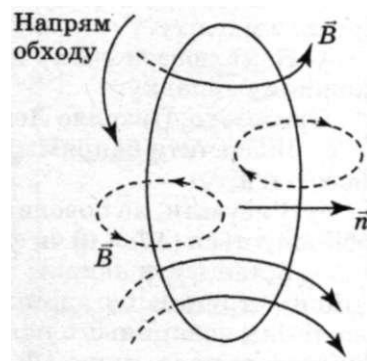
Якщо в з'єднаних послідовно контурах відбуваються однакові зміни магнітного потоку, то ЕРС індукції в них дорівнює сумі ЕРС індукції в кожному із контурів. Оскільки змінюється магнітний потік у котушці, що складається із N однакових витків провідника, то загальна ЕРС індукції буде в N разів більшою від ЕРС індукції в окремому контурі:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Рівняння $\mathcal{E}_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ може набувати й іншого

вигляду залежно від характеру зміни магнітного потоку. Для випадку нестационарного магнітного поля, коли вектор індукції магнітного поля змінюється з часом за незмінних площі контуру та його орієнтації ($S = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$):

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S \cos \alpha.$$



Мал. 74

У разі зміни орієнтації поля ($B = \text{const}$) або зміни орієнтації контуру в стаціонарному полі ($S = \text{const}$):

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{BS(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}{\Delta t},$$

де α_1 і α_2 — кути між нормаллю до контуру і вектором індукції в початковий і кінцевий моменти часу.

Якщо магнітне поле стаціонарне ($\vec{B} = \text{const}$), а орієнтація контуру незмінна ($\alpha = \text{const}$), то ЕРС індукції може виникати внаслідок зміни площі контуру, її розраховують за формулою:

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{BS(S_2 - S_1)}{\Delta t} \cos \alpha, \text{ де}$$

S_1 і S_2 — площі контуру на початку і наприкінці, наприклад, руху ділянки контуру.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке явище електромагнітної індукції?
2. Сформулюйте правило Ленца.
3. Що таке індукційний струм?
4. У чому полягає закон електромагнітної індукції?

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Мета роботи: експериментально вивчити явище електромагнітної індукції, встановити всі істотні особливості цього явища, навчитись користуватися правилом Ленца.

Обладнання: котушка, дугоподібні магніти, міліамперметр, джерело постійного струму, реостат, з'єднувальні провідники.

Хід роботи

1. Приєднати затискачі міліамперметра до затискачів котушки.
2. Вставити один із полюсів дугоподібного магніту всередину котушки, одночасно спостерігаючи за стрілкою міліамперметра.
3. Повторити спостереження, витягаючи магніт з котушки і змінюючи полюси магніту.
4. Намалювати схему досліду і перевірити виконання правила Ленца у кожному випадку.

Примітка. Правило Ленца треба перевіряти за такою послідовністю.

- Визначити напрям ліній магнітної індукції зовнішнього поля (постійного магніту).
- З'ясувати, як поводить себе потік магнітної індукції зовнішнього поля: збільшується ($\Delta\Phi > 0$) чи зменшується ($\Delta\Phi < 0$).
- Встановити напрям ліній індукції магнітного поля, створеного індукційним струмом, що виник у котушці. Ці лінії будуть напрямлені протилежно лініям зовнішнього поля, якщо $\Delta\Phi > 0$, і прямуватимуть за лініями зовнішнього поля, якщо $\Delta\Phi < 0$.
- Визначити напрям індукційного струму за правилом свердлика.

5. Повільно вставити в котушку або витягти з неї два магніти, складені одноїменними полюсами. Повторити дослід, збільшивши швидкість руху магнітів. З'ясувати, в яких випадках сила індукційного струму більша.

Для допитливих

Через отвір котушки падає магніт. Чи з однаковим прискоренням він рухатиметься в котушці, якщо кінці обмотки будуть замкнені? Якщо вони не будуть замкнені?

§ 17.

ІНДУКТИВНІСТЬ. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОТУШКИ ЗІ СТРУМОМ

Явище електромагнітної індукції спостерігається в усіх випадках, коли змінюється магнітний потік через контур. Проте провідник зі струмом перебуває у власному магнітному полі, і якщо це поле змінюється, то в провіднику має збуджуватися ЕРС індукції. Власне магнітне поле такого провідника залежить від сили струму в ньому, тому в разі зміни сили струму в колі в провіднику збуджується ЕРС.

Виникнення ЕРС у провіднику під час зміни сили струму в ньому самому називається самоіндукцією.

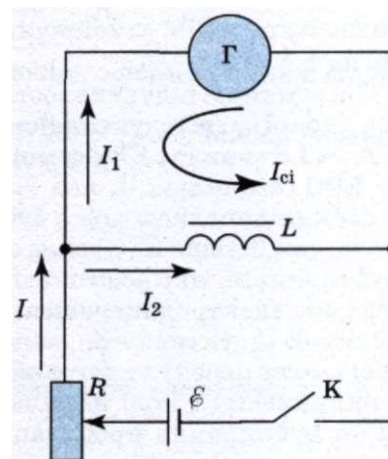
Розглянемо коло (мал. 75), яке складається з батареї ЕРС, реостата R , котушки індуктивності L , гальванометра Γ і ключа K .

Якщо коло замкнене, то по гальванометру Γ і котушці індуктивності L проходить електричний струм. У момент розмикання кола стрілка гальванометра різко відхиляється у протилежний бік. Причина цього в тому, що при розмиканні кола магнітний потік у котушці зменшується, створюючи в ній ЕРС самоіндукції. Струм самоіндукції I_{ci} за правилом Ленца перешкоджає спаданню магнітного потоку, тобто він напрямлений у котушці так само, як і спадний струм I_2 . Цей струм повністю проходить через гальванометр, але за напрямом, протилежним напрямку I_1 .

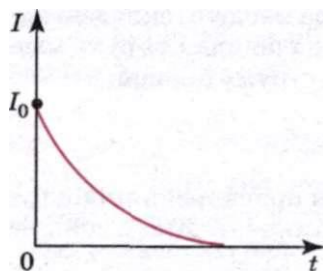
Явище виникнення індукованого струму в колі внаслідок зміни струму в ньому називають самоіндукцією.

Самоіндукція — це окремий випадок явища електромагнітної індукції.

Графік зміни сили струму в колі в момент розмикання наведено на мал. 76. Струм поступово зменшується від значення I , яке було перед розмиканням, до нуля, нагріваючи при цьому провідники. Якщо б обмотка котушки була виготовлена з надпровідного матеріалу і закорочена таким самим провідником, то струм у колі існував би нескінченно довго.



Мал. 75



Мал. 76

Оскільки самоіндукція — окремий випадок явища електромагнітної індукції, закон Фарадея можна застосовувати і для визначення ЕРС самоіндукції. Пригадаємо, що магнітний потік через площу, обмежену контуром струму, пропорційний силі струму. Дійсно, $\Phi = BS$, а магнітна індукція поля, створюваного струмом, пропорційна в усіх випадках силі струму, тобто $B \sim I$. Отже, можна твердити, що

$$\Phi = LI,$$

де L — коефіцієнт пропорційності між силою струму в контурі і створюваним нею потоком магнітної індукції через цей контур.

Коефіцієнт L називається індуктивністю провідника, або його коефіцієнтом самоіндукції.

Індуктивність провідника в даному середовищі визначається його розмірами і формою. Індуктивність прямолінійного провідника незначна, проте вона зростає, якщо з нього зробити виток. Індуктивність котушки зростає пропорційно кількості її витків.

Запишемо формулу для обчислення ЕРС самоіндукції:

$$\mathcal{E}_{ci} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Якщо форма контуру не змінюється, то коефіцієнт самоіндукції є сталим, тоді

$$\mathcal{E}_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Таким чином, ЕРС самоіндукції в колі пропорційна швидкості зміни сили струму в цьому колі.

Якщо $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 1$, то $|\mathcal{E}_{ci}| = L$, тобто індуктивність — це фізична величина, яка визначається ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі у разі зміни сили струму на 1 А за 1 с.

За одиницю індуктивності в СІ беруть один генрі (**1 Гн**). З формули видно, що **1 генрі** — це індуктивність провідника, в якому при зміні сили струму на **1 А** за **1 с** виникає ЕРС самоіндукції **1 В: 1 Гн = 1 В · 1 с / 1 А**.

ЕРС самоіндукції, яка виникає під час замикання і розмикання кола, в деяких випадках може бути досить значною. Чим більша індуктивність кола, тим більша ЕРС і сила струму самоіндукції. Ось чому в разі вимикання рубильників, які розмикають електричні кола з потужними електромагнітами, електродвигунами, трансформаторами та іншими пристроями з великою індуктивністю, між їх контактами пролітає електрична іскра, яка іноді може перейти в дуговий розряд і зіпсувати рубильник. Причиною цього є виникнення в колі настільки великої ЕРС самоіндукції, що між контактами рубильника пробивається повітряний проміжок. Для розмикання таких кіл користуються масляними вимикачами і вживають інші застережні заходи.

Магнітне поле нерозривно зв'язане з електричним струмом: воно виникає, змінюється і зникає зі зміною сили струму. Отже, під час замикання кола частина енергії джерела струму завжди витрачається на створення магнітного поля. Тому воно повинно мати енергію, що дорівнює роботі, витраченій струмом на його створення. Саме енергією магнітного поля пояснюється явище електромагнітної індукції, зокрема самоіндукції. У разі замикання кола з джерелом постійної ЕРС сила струму не відразу досягає максимального значення (яке визначається законом Ома), а певний час зростає, оскільки частина енергії джерела витрачається в цей час на створення магнітного поля. Досягнувши максимального значення, сила струму в колі вже не змінюється. При цьому постійним стає і магнітне поле струму, його енергія теж не буде змінюватися. Джерело струму витрачає енергію лише на підтримання постійної сили струму, і ця частина енергії перетворюється у внутрішню енергію провідників, тобто витрачається на їх нагрівання. Під час розмикання кола магнітне поле струму зникає, однак згідно із законом збереження енергії його енергія перетворюється в енергію струму самоіндукції, який підсилює струм, що вимикають.

Таким чином, **явище електромагнітної індукції ґрунтується на взаємних перетвореннях енергій електричного струму і магнітного поля.**

Енергію магнітного поля котушки індуктивності можна знайти, виходячи з таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується з часом за лінійним законом. У цьому разі ЕРС самоіндукції має таке постійне значення.

$$\mathcal{E}_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{t},$$

де t — час, за який сила струму в колі лінійно зменшується від початкового значення I до 0.

За цей час у колі проходить електричний заряд

$$q = \frac{I}{2} t.$$

При цьому робота електричного струму

$$A = q \mathcal{E}_{ci} = \frac{It}{2} \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}.$$

Ця робота виконується за рахунок енергії магнітного поля котушки індуктивності.

Енергія W_m магнітного поля котушки індуктивності дорівнює половині добутку її індуктивності на квадрат сили струму в ній:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}.$$



ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке самоіндукція?
2. У який момент іскрить рубильник: під час замикання чи розмикання кола? Чому?
3. Що таке індуктивність?
4. Наведіть одиниці індуктивності.
5. Коло, яке містить джерело постійної ЕРС, замкнули. На що витрачається енергія джерела до і після встановлення постійної сили струму?

Задачі та справи

Розв'язуємо разом

1. Вертикальний залізний циліндр, підвішений на динамометрі, намагнітили так, щоб його північний полюс був зверху. Циліндр розмістили на однаковій відстані від екватора: перший раз у північній півкулі, другий — у південній. Коли покази динамометра були більші?

Розв'язання

Перший раз, тому що напрям сили тяжіння збігається з напрямом складової притягання циліндрика магнітним полем Землі.

2. Який заряд пройде через поперечний переріз замкненого провідника опором 10 Ом при зміні магнітного потоку від 35 до 15 мВб?

Розв'язання

При зміні магнітного потоку в провіднику виникає ЕРС індукції $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}$.

Оскільки провідник замкнений, то у ньому буде текти струм силою $I = \frac{\mathcal{E}_1}{R} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t}$.

Разом з цим, сила струму дорівнює зміні заряду за одиницю часу: $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t}$.

Звідси $\Delta q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}$.

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо: $\Delta q = 2$ мКл.

3. Котушку дуже малого опору та індуктивністю 3 Гн під'єднано до джерела струму, ЕРС якого 15 В і дуже малий внутрішній опір. Через який інтервал часу сила струму в котушці досягне значення 50 А?

Розв'язання

За законом Ома для повного кола $\mathcal{E} = I(R+r)$, де \mathcal{E} — повна ЕРС у колі, що дорівнює для цього випадку сумі \mathcal{E}_1 — ЕРС джерела і \mathcal{E}_2 — ЕРС самоіндукції, яка виникає після під'єднання котушки до джерела: $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$.

ЕРС самоіндукції визначається за формулою $\mathcal{E}_2 = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Враховуючи попередні

співвідношення, отримаємо $\mathcal{E}_1 - L\frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R+r)$. За умовою задачі опори R і r дуже

малі, тому $\mathcal{E}_1 - L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$ або $\mathcal{E}_1 = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Звідки можна визначити швидкість зміни стру-

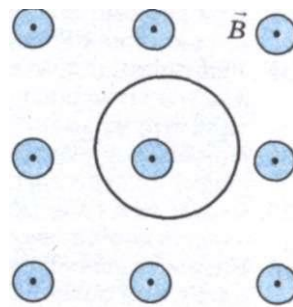
му $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\mathcal{E}_1}{L}$, а потім — час, потрібний для збільшення сили струму до значення 50 А:

$t = \frac{IL}{\mathcal{E}_1}$. Зробивши розрахунки, отримаємо $t = 10$ с.

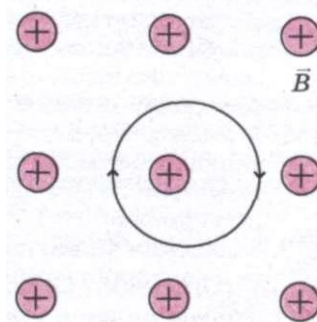
Рівень А

135. Що станеться, коли до екрана телевізора, який працює, піднести магніт? Поясніть.
 135. Чому полярне сяйво спостерігається в основному в полярних районах земної кулі?
 136. Чому корпус компаса виготовляють із пластмаси, латуні, алюмінію, але не із заліза?

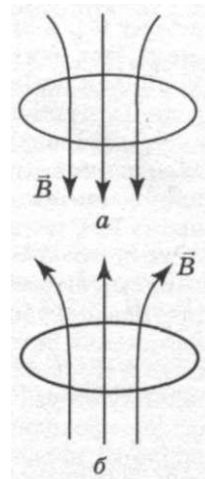
137. Чому магнітофонну плівку не рекомендується зберігати поблизу приладів, які містять електромагніти?
138. Магнітна індукція у бруску металу дорівнює $0,75$ Тл, а індукція зовнішнього намагніченого поля дорівнює $0,0375$ Тл. Яку відносну магнітну проникність має метал?
139. Якої форми прагне набутти замкнений провідник, по якому тече струм?
140. В однорідному магнітному полі поступально рухається провідний контур. Чи виникає ЕРС індукції у контурі, якщо магнітне поле: а) однорідне; б) неоднорідне?
141. Як взаємодіють сусідні витки соленоїда, коли по них тече струм?
142. У замкнутому витку дроту, що має опір $2 \cdot 10^{-2}$ Ом, миттєве значення індукційного струму становить 5 А. Яка ЕРС індукції?
143. Прямий провідник довжиною 35 см перетинає однорідне магнітне поле зі швидкістю 6 м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Сам провідник також перпендикулярний до ліній магнітної індукції. Визначте індукцію магнітного поля, якщо між кінцями провідника виникає різниця потенціалів 12 мВ.
144. Визначте різницю потенціалів, яка виникає між кінцями крил літака при горизонтальному польоті зі швидкістю 1200 км/год, якщо розмах крил 40 м, а вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює 50 мкТл.
145. Провідне кільце міститься в магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні до площини кільця. Який напрям має індукційний струм під час зростання магнітної індукції (мал. 77)?
146. Провідне кільце перебуває у магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні до кільця (мал. 78). Збільшується чи зменшується магнітна індукція, якщо індукційний струм має напрям, вказаний на малюнку?
147. Визначте напрям сил, які діють на провідне кільце (мал. 79, а, б), якщо індукція магнітного поля: а) збільшується; б) зменшується.
148. За $2,5$ мс магнітний потік, який пронизує контур, рівномірно спадає від 10 до 5 мВб. Визначте ЕРС індукції в контурі.
149. У контурі провідника за $0,3$ с магнітний потік змінився на $0,06$ Вб. Яка швидкість зміни магнітного потоку? Яка ЕРС індукції в контурі?
150. Магнітний потік, що пронизує контур провідника, рівномірно змінився на $0,6$ Вб так, що ЕРС індукції стала дорівнювати $1,2$ В. Визначте час, протягом якого змінювався магнітний потік.
151. Визначте індуктивність котушки з осердям, якщо при швидкості зміни сили струму 50 А/с у ній збуджується ЕРС самоіндукції 20 В.
152. З якою швидкістю змінюється сила струму в котушці індуктивністю 120 мГн, якщо в ній виникає ЕРС самоіндукції 6 В?



Мал. 77



Мал. 78

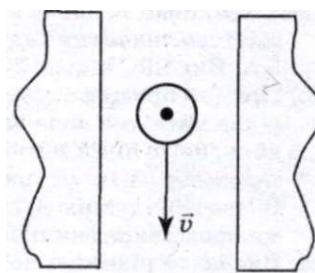


Мал. 79

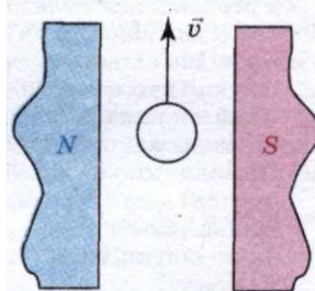
153. При рівномірній зміні в котушці сили струму від 5 до 10 А впродовж 250 мс у ній виникає ЕРС самоіндукції 2 В. Яка індуктивність котушки?
154. У котушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму 20 А. Яку енергію має магнітне поле цієї котушки? Як зміниться енергія магнітного поля, коли сила струму зменшиться вдвічі?
155. По обмотці соленоїда індуктивністю 0,2 Гн тече струм силою 10 А. Визначте енергію магнітного поля соленоїда.
156. Струм якої сили має проходити в обмотці дроселя з індуктивністю 0,5 Гн, щоб енергія дорівнювала 10 Дж?
157. Визначте енергію магнітного соленоїда, в якому при силі струму 10 А виникає магнітний потік 0,5 Вб.

Рівень В

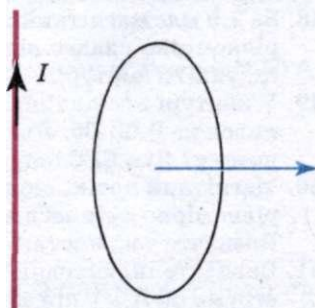
158. Якщо у магнітне поле потрапить електрон, вектор швидкості якого перпендикулярний до напрямку магнітного поля, то він рухатиметься по коловій траєкторії. Доведіть це.
159. У мас-спектрометрі одноразово йонізована частинка рухається зі швидкістю 956 км/с по колу діаметром 20 см в однорідному магнітному полі, індукція якого 0,1 Тл. Визначте масу частинки.
160. Запаленим сірником розжарте голку і наблизьте її до стрілки компаса. Результат досліду поясніть.
161. Визначте магнітну проникність нікелю, коли відомо, що магнітний потік Φ^1 який пронизує його переріз, у 2,4 раза менший від магнітного потоку Φ^2 , який пронизує такий самий переріз сталі. Магнітна проникність сталі 670.
162. У скільки разів підсилиться магнітне поле в середині котушки зі струмом, якщо в котушку ввести сталеве осердя?
163. Між полюсами магніту рухається провідник. За напрямом його руху і напрямом індукованої в ньому ЕРС визначте полюси магніту (мал. 80).
164. Між полюсами магніту рухається провідник у напрямі, вказаному на мал. 81. Визначте напрям індукованої у провіднику ЕРС.
165. Замкнений виток дроту знаходиться біля провідника зі струмом (мал. 82). Чи буде виникати у провіднику струм, якщо: а) обертати виток навколо осі, що проходить через провідник; б) обертати навколо осі, паралельної провіднику; в) обертати навколо осі, перпендикулярної до провідника; г) рухати поступально паралельно провіднику; г) рухати поступально перпендикулярно до провідника?
166. Рейки залізничної колії ізольовані одна від одної і від землі. По цих рейках їде потяг зі швидкістю 20 м/с. Вертикальна складова магнітного поля Землі $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, відстань між рейками 1,54 м. Що покаже мілівольтметр, приєднаний до рейок?



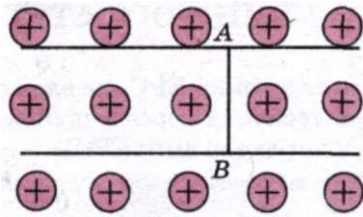
Мал. 80



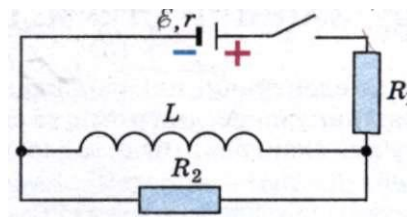
Мал. 81



Мал. 82



Мал. 83



Мал. 84

167. На паралельні горизонтальні рейки подано напругу, і по провіднику AB (мал. 83) тече струм силою I . Під дією магнітного поля провідник рухається з прискоренням a . Визначте індукцію магнітного поля, якщо площа поперечного перерізу провідника дорівнює S , а густина матеріалу провідника ρ . Тертя не враховувати.
168. Чим пояснюється нагрівання шматка металу, що перебуває у магнітному полі, яке швидко змінюється?
169. Три однакові штабові магніти падають в однаковому положенні з тієї ж висоти. Один падає вільно, інший під час падіння проходить крізь незамкнений соленоїд, а третій крізь замкнений соленоїд. Порівняти час падіння магнітів. Відповіді обґрунтувати на основі правила Ленца та закону збереження енергії.
170. У замкненому витку, виготовленому із алюмінієвої дротини завдовжки 10 см і поперечного перерізу $1,4 \text{ мм}^2$, магнітний потік зменшується від 10 до 5 мВб упродовж 5 с. Яка сила струму, індукованого у витку?
171. Магнітний потік через кожен із 50 однакових витків котушки становить 100 мВб. Під час його рівномірного зменшення впродовж 10 мс у котушці виникає ЕРС 200 В. До якого значення зменшується магнітний потік?
172. Магнітний потік через контур замкненого провідника опором 30 мОм за 2 с змінюється на 12 мВб. Яка сила струму, що протікає у провіднику під час цієї зміни, якщо магнітний потік змінюється рівномірно?
173. Котушка, яка має 1000 витків, перебуває у магнітному полі. Магнітний потік, що пронизує витки котушки, змінюється на 2 мВб, якщо сила струму в котушці змінюється на 16 А. Яка індуктивність котушки?
174. Під час зростання сили струму у котушці від 1 до 2 А упродовж 10 мс у ній виникає ЕРС самоіндукції 20 В. Яка індуктивність котушки? Який магнітний потік пронизує котушку в момент часу, коли сила струму становить 1,5 А, якщо вона має 200 щільно намотаних витків?
175. Котушка, опір якої становить 50 Ом та індуктивність — 0,001 Гн, розміщена в магнітному полі. Під час рівномірної зміни магнітного поля потік через котушку зріс на 1000 Вб, і сила струму у котушці збільшилася на 0,1 А. Який заряд пройшов за цей час по котушці?
176. Котушка, яка має 1000 витків, перебуває у магнітному полі. Магнітний потік, який пронизує витки котушки, змінюється на 2 мВб, якщо сила струму в котушці змінюється на 16 А. Яка індуктивність котушки?
177. Під час зміни сили струму в котушці, індуктивність якої 0,11 Гн, у 5,13 раза енергія магнітного поля змінилася на 16,2 Дж. Визначте початкові значення енергії та сили струму.
178. Соленоїд завдовжки 50 см і діаметром 0,8 см має 20 000 витків мідного проводу і перебуває під постійною напругою. Визначте час, протягом якого в обмотці соленоїда виділиться така кількість теплоти, яка буде дорівнювати енергії магнітного поля в соленоїді.
179. Який заряд пройде через резистор R_2 (мал. 84) після розмикання ключа? ЕРС джерела $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$, внутрішній опір $r = 1,5 \text{ Ом}$, індуктивність котушки $L = 0,2 \text{ Гн}$, опори резисторів $R_1 = 7,5 \text{ Ом}$ і $R_2 = 3 \text{ Ом}$. Опором котушки можна знехтувати.

§ 18. ЗМІННИЙ СТРУМ. ГЕНЕРАТОР ЗМІННОГО СТРУМУ

Якщо електричне коло під'єднати до джерела змінної ЕРС, на електрони в провіднику почне діяти змінна сила, яка примусить їх переміщатися. При цьому рух електронів буде точно повторювати характер змін ЕРС.

Змінний струм — це, по суті, вимушені коливання електричних зарядів у провіднику під дією прикладеної змінної ЕРС.

Змінний струм за характером змін сили струму може бути найрізноманітнішим. Найбільш важливими є струми, сила яких змінюється за гармонічним законом, тобто за законом синуса чи косинуса.

Розглянемо замкнений контур площею S в однорідному магнітному полі, індукція якого \vec{B} . Контур рівномірно обертається навколо осі OO' з кутовою швидкістю ω (мал. 85).

Магнітний потік, який пронизує контур, визначається за формулою $\Phi = BS \cos \alpha$, де α — кут між вектором нормалі \vec{n} до площини контуру і вектором \vec{B} .

У процесі рівномірного обертання контуру кут повороту α змінюється з часом за законом $\alpha = \omega t$, а магнітний потік, який пронизує контур, за законом

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

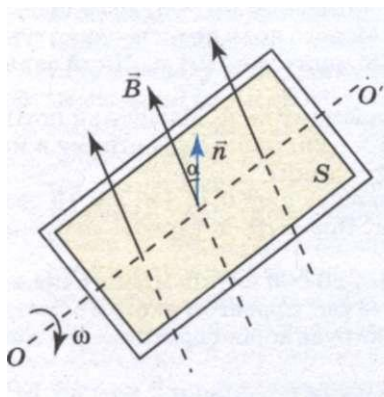
У замкнутому контурі виникає ЕРС індукції $\varepsilon_1 = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t}$, значення якої у певний момент часу $\varepsilon_1 = \omega BS \sin \alpha$ дається за формулою

$$\varepsilon_1 = \omega BS \sin \alpha.$$

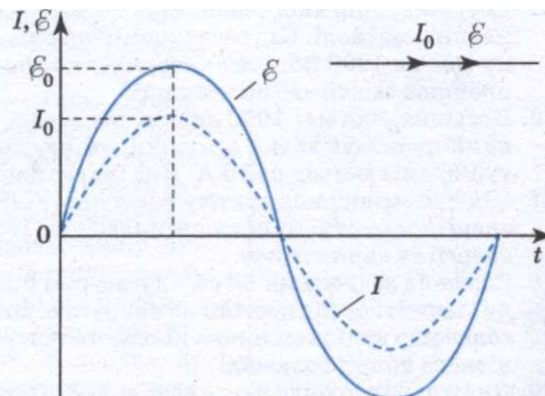
Як впливає з формули, ЕРС індукції, що виникає в замкнутому контурі, у процесі його рівномірного обертання в однорідному магнітному полі змінюється з часом за законом синуса (мал. 86).

ЕРС індукції максимальна при $\sin \omega t = 1$, тобто при $\alpha = \omega t = \frac{\pi}{2}$.

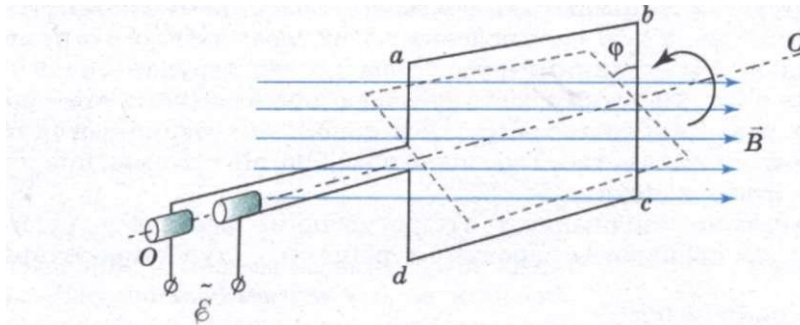
Величина $\varepsilon_{\max} = \omega BS$ називається амплітудним значенням ЕРС індукції.



Мал. 85



Мал. 86



Мал. 87

Якщо такий контур замкнути на зовнішнє коло, то по колу проходитиме струм, сила і напрям якого змінюються.

Миттєве значення змінного струму, що проходить активним опором \bar{R} , визначимо за законом Ома:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t,$$

де I_{\max} – амплітудне значення сили струму.

Інтервал часу T , протягом якого змінна ЕРС здійснює одне повне коливання, називається періодом змінного струму.

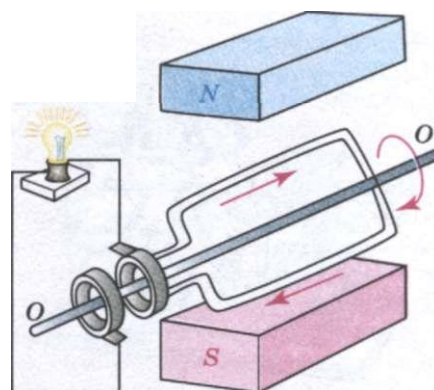
Кількість повних коливань, які здійснюються за 1 с, називають частотою змінного струму ν .

Розглянутий принцип одержання ЕРС лежить в основі будови більшості технічних індукційних генераторів змінного струму. Якщо виток розріжемо і кінці його з'єднаємо з кінцями зовнішнього кола за допомогою двох ізолюваних один від одного кілець, якими ковзають щітки зовнішнього кола (мал. 87), то отримаємо схему найпростішого генератора.

Збуджувані в послідовно з'єднаних витках ЕРС додаються. Тому для одержання великої ЕРС у промислових генераторах контур, який обертається у магнітному полі, складають з послідовно з'єднаних витків дроту, намотаного на феромагнітне осердя. Тоді ЕРС, збуджена у такому генераторі, дорівнюватиме

$$\mathcal{E}_1 = N \omega B S \sin \alpha.$$

На мал. 88 зображено найпростішу схему генератора змінного струму. У рамці, яка обертається в магнітному полі, виникає змінна ЕРС індукції. Якщо коло замкнути, то в ньому проходитиме змінний струм. Із зовнішнім колом рамка з'єднується кільцями, закріпленими на одній осі з рамкою. За один оберт рамки полярність щіток змінюється двічі. Щоб



Мал. 88

збільшити напругу, яку знімають з клем генератора, на рамки намотують не один, а багато витків. У всіх промислових генераторах змінного струму витки, в яких індукуються змінний струм, установлюють нерухомо, а магнітна система обертається. Нерухому частину генератора називають статором, а рухому — ротором. Якщо ротор обертати за допомогою зовнішньої сили, то разом з ротором обертатиметься і магнітне поле, яке він створює, при цьому в провідниках статора індукуються ЕРС.

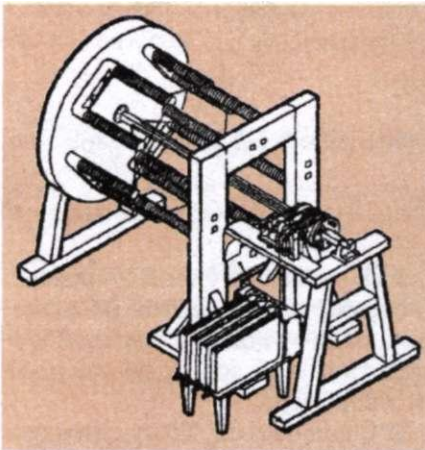
Електрогенератори, які працюють з гідротурбінами, називають гідрогенераторами, а ті, що працюють з паровими турбінами, — турбогенераторами.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

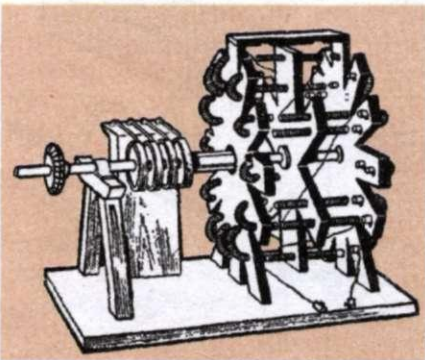
1. Що таке змінний струм? Якими законами він описується?
2. Що таке амплітудне значення ЕРС індукції?
3. Який принцип роботи генераторів змінного струму?
4. Як визначається ЕРС індукції, що виникає у генераторі?



Це цікаво знати



Мал. 89



Мал. 90

Найбільш важливими для практичного застосування є праці петербурзького академіка **Б. С. Якобі** зі створення електродвигуна з обертальним рухом якоря. У травні 1834 р. він сконструював свій перший електродвигун, який мав (мал. 89) дві групи П-подібних електромагнітів; одна з них розташовувалася на нерухомій рамі, а інша — на диску, який міг обертатися. Джерелом живлення слугувала батарея гальванічних елементів. Обмотки електромагнітів нерухомої рами були з'єднані послідовно, і струм обтікав їх увесь час в одному напрямі. Напрямок струму в електромагнітах на диску весь час змінювався за допомогою спеціального комутатора оригінальної конструкції. Це обумовлювало зміну полярності цих електромагнітів, а їх взаємодія (притягання і відштовхування) створювала обертальний момент. Такий електродвигун мав потужність близько 15 Вт, тобто міг піднімати вантаж масою 4—5 кг на висоту приблизно 30 см за 1 с. Про свою роботу Б. С. Якобі доповів на засіданні Паризької академії наук 1 грудня 1834 р. Звістка про його винахід швидко розлетілася по всіх країнах.

Прагнучи збільшити потужність машини, Б. С. Якобі створив електродвигун зведеного типу (мал. 90), який мав 24 нерухомих електромагніти і 12 рухомих прямих електромагнітів; принцип дії машини залишався таким самим. Зміна конструкції, проте, не привела до значного збільшення потужності. А тому Якобі розпочав пошук принципово но-

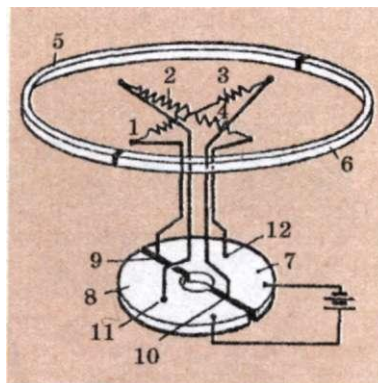
вого вирішення цієї проблеми, і в 1838 р. досяг мети.

У 1837 р. американський технік **Т. Девенпорт** побудував електродвигун, що працював за принципом взаємодії рухомих електромагнітів з нерухомими постійними магнітами (мал. 91). Він складався з чотирьох хрестоподібно розміщених електромагнітів 1–4, закріплених на дерев'яному диску, що жорстко зв'язаний з вертикальним валом. Електромагніти розміщувалися всередині двох напівкруглих постійних магнітів 5 і 6. На особливій підставці були закріплені мідні пластини 7 і 8, розділені посередині ізоляцією; до них підводився струм від батареї елементів. Одна пара послідовно з'єднаних електромагнітів мала пружинячі контакти 9 і 10, а інша пара — такі ж контакти 11 і 12. Полярність електромагнітів змінювалася за допомогою комутатора. Двигун Девенпорта був більш компактним, ніж машина Якобі, завдяки розміщенню в одній площині рухомих і нерухомих магнітів, хоча заміна електромагнітів постійними магнітами і була кроком назад, оскільки магніти мають велику вагу і здатні розмагнічуватися.

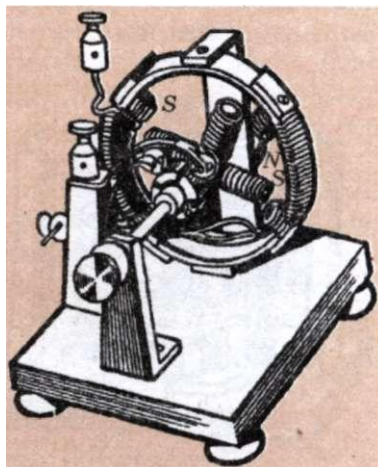
У середині 1837 р. за пропозицією Б. С. Якобі, який прагнув до практичного використання електродвигунів, у Росії була створена «Комісія для постановки дослідів із пристосування електромагнітної сили до руху машин за способом професора Якобі». Згідно із задумками, електродвигун був найбільш зручний для водного транспорту (він мав би замінити важкий, громіздкий і пожежонебезпечний для дерев'яного судна паровий двигун і вугільний бункер до нього), атому до складу Комісії увійшли разом із Е. Ленцем та П. Шіллінгом, представники морського відомства на чолі з адміралом І. Крузенштерном. Комісія отримала для дослідів бот, що вміщав 12 пасажирів і був розрахований на 10 веслярів.

Спочатку Б. С. Якобі пропонував встановити на боті електродвигун конструкції 1834 р., помістивши його вал упоперек судна, а на кінцях валу розташувати гребні колеса. Проте електродвигун займав дуже багато місця. Б. С. Якобі почав займатися розробкою нової конструкції, що було успішно завершено у 1838 р. (Модель одного елемента такого електродвигуна Якобі (конструкція 1838 р.) наведено на мал. 92). Він змінив положення магнітів і розмістив по 20 двигунів на двох вертикальних валах.

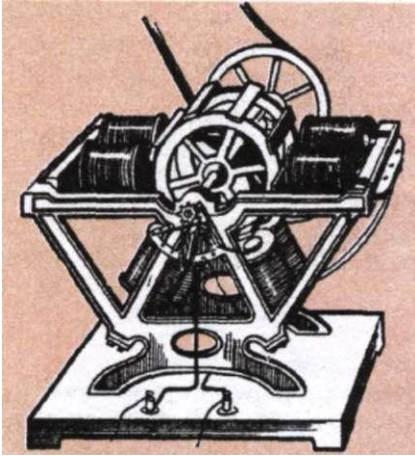
У конструкції знайшла практичне застосування пропозиція Т. Девенпорта, а саме, розташовувати нерухомі і обертальні магніти в одній площині. Не дивлячись на збільшені розміри електродвигуна по вертикалі, його можна було зручно закріпити на судні. Випробування показали, що електродвигун цілком придатний для руху бота, але завдяки живленню струмом від гальванічних батарей вартість проїзду була приблизно у 25 разів більша від вартості цієї ж роботи, виконуваної паровою машиною. Таким чином, питання про використання електродвигуна виявилось залежним від створення економічного генератора електричної енергії.



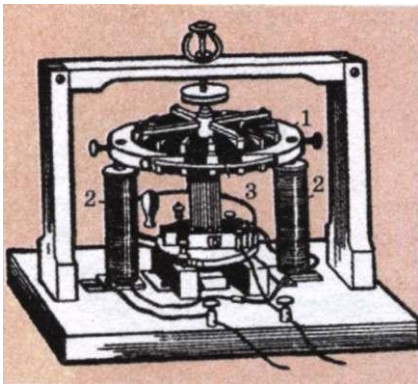
Мал. 91



Мал. 92



Мал. 93



Мал. 94

Із електродвигунів, що отримали застосування у 50—60-х роках XIX ст. можна вказати на машину французького інженера **П. Фромана** (мал. 93), яка використовувалася для приведення в дію друкарських верстатів. Особливість установки: шість пар електромагнітів розташовували по колу, а на якорі закріплювали металеві пластини, що притягувалися або відштовхувалися електромагнітами (на малюнку дві верхні пари не показано).

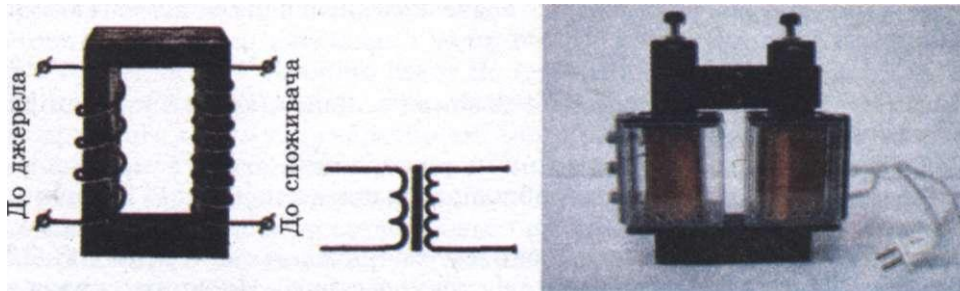
Одним із серйозних недоліків цієї і попередніх конструкцій електродвигунів була непостійність обертального моменту: у зв'язку з позмінним притяганням та відштовхуванням магнітів дія електродвигунів була поштовхоподібною, що було малоперспективним для застосування їх на практиці.

Перший крок для ліквідації цього недоліку зробив молодий італійський учений, згодом професор фізики Болонського і Пізанського університетів, **А. Пачінотті**. У 1860 р. він сконструював електродвигун із кільцевим якорем і практично постійним обертальним моментом (мал. 94): основні деталі цієї установки — якорь 7 і електромагніти 2. Якорь із сталі мав форму кільця із зубцями, за допомогою латунних спиць він прикріплювався на вертикальному валу. Між зубцями на кільце намотувалися котушки 3, кінці яких виводилися до пластин колектора, розміщеного на нижній частині вала. Обмотки електромагнітів вмикалися послідовно із обмотками якоря, тобто можна сказати, що це був перший електродвигун із послідовним збудженням. Учений вказував на можливість перетворення своєї машини в генератор. Відомості про електродвигун Пачінотті були опубліковані в 1836 р., проте про ідею кільцевого якоря згадали лише через 10 років.

§ 19. ТРАНСФОРМАТОР. ВИРОБНИЦТВО, ПЕРЕДАЧА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Однією з важливих переваг змінного струму над постійним є те, що силу струму і напругу змінного струму можна в найширших межах перетворювати (трансформувати) без істотних втрат потужності. Для зменшення витрат електричної енергії в лініях електропередач силу струму в них зменшують, а напругу збільшують до сотень тисяч і більше вольт, а в місцях споживання електроенергії напругу знижують до необхідних значень (сила струму при цьому відповідно зростає).

Трансформатор — це прилад, призначений для перетворення параметрів змінного струму, що складається із виготовленого з м'якого феромагнетика осердя замкненої форми, на якому встановлено дві обмотки — первинну і вторинну.



Мал. 95

Уперше трансформатор сконструював у 1878 році російський вчений **П. М. Яблочков**, а на початку ХХ ст. його вдосконалив професор **С. М. Усатий** і професор Київського університету **М. Й. Доліво-Добровольський**. Трансформатор складається із замкненого осердя з феромагнетика, на якому розміщують дві (інколи більше) котушки у вигляді обмоток з дроту. Одну обмотку, яку вмикають у джерело змінної напруги, називають первинною, другу обмотку, до якої приєднують «навантаження», що споживає енергію, називають вторинною (мал. 95).

В основу роботи трансформатора покладено явище електромагнітної індукції. Розглянемо принцип дії трансформатора. Нехай на вхід трансформатора подається змінна напруга U_1 . В осерді трансформатора виникає змінний магнітний потік, який пронизує як первинну, так і вторинну обмотки трансформатора. У первинній і вторинній обмотках відповідно виникають ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ і } \varepsilon_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де N_1 і N_2 — кількість витків первинної і вторинної обмоток.

Визначимо напруги на вході і виході трансформатора:

$$U_1 = I_1 R_1 - \varepsilon_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ і } U_2 = I_2 R_2 - \varepsilon_2 = I_2 R_2 + N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

де R_1 і R_2 — відповідно опори первинної і вторинної обмоток трансформатора; I_1 і I_2 — сили струмів, які проходять по первинній і вторинній обмотках.

Розглянемо випадок, коли вторинна обмотка розімкнена, тобто $I_2 = 0$ (холостий хід). Технічні трансформатори конструюють так, щоб виконувалась умова $I_1 R_1 \ll \varepsilon_1$, тобто обмотки трансформатора мають невеликий активний опір, але велику індуктивність. Поділивши почленно одне на одне рівняння напруг, отримаємо

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Напруга на кінцях первинної обмотки трансформатора так відноситься до напруги на кінцях його вторинної обмотки, як кількість витків первинної обмотки відноситься до кількості витків вторинної обмотки.

Це відношення називають **коефіцієнтом трансформації k** :

$$k = \frac{N_1}{N_2}$$

Якщо $k > 1$, то трансформатор буде знижувальним, якщо $k < 1$ — підвищувальним.

Трансформатор перетворює змінний електричний струм так, що відношення сили струму до напруги приблизно однакове в первинній і вторинній обмотках.

За допомогою трансформатора знижують значення сили струму і збільшують напругу під час передавання електричної енергії. Це сприяє зниженню теплових втрат ($Q = I^2Rt$ — закон Джоуля—Ленца). Враховуючи, що потужність сили струму визначається добутком напруги і сили струму, таке зменшення сили струму не змінить переданої потужності.

Передавання електроенергії на великі відстані здійснюють при напругах у декілька сотень тисяч вольтів. Генератори потужних електростанцій виробляють силу струму напругою від 6 до 20 кВ.

Перші генератори були створені в 50-х роках ХІХ ст., а вже в 70-х роках почалося їх промислове виробництво. Тепер рівень виробництва і споживання енергії — найважливіший показник розвитку продуктивних сил суспільства. Головне значення при цьому має електроенергія — найуніверсальніша і найзручніша для використання форма енергії.

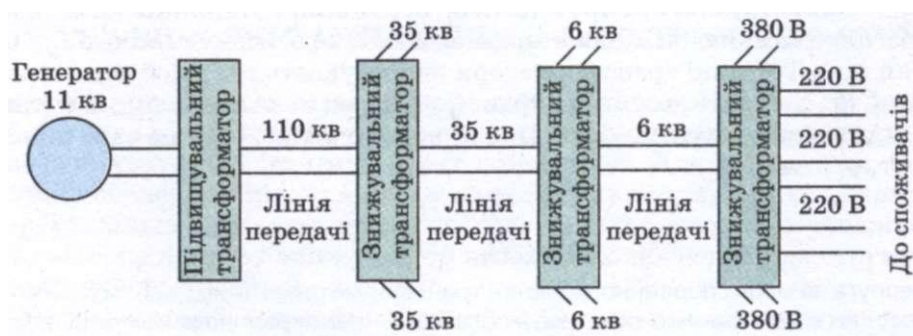
Електроенергію в Україні виробляють на таких електростанціях: теплових (ТЕС і ТЕЦ), гідро (ГЕС), атомних (АЕС) і вітрових (ВЕС).

Джерелом енергії на ТЕС і ТЕЦ (теплоелектроцентрально) є вугілля, газ, торф, мазут та ін., на ГЕС — потенціальна енергія води, піднятої греблею, на АЕС — ядерне паливо, розміщене в тепловидільних елементах (ТВЕЛ) ядерного реактора, на ВЕС — енергія вітру.

Для передавання електроенергії від електростанцій використовують трансформатори для підвищення напруги до декількох сотень кіловольтів. На місцях споживання електроенергії за допомогою трансформаторів напругу зменшують (мал. 96).

Сучасна цивілізація неможлива без широкого використання електроенергії. Порушення постачання електроенергією великого міста внаслідок аварії паралізує його життя.

Понад 90 % споживаної людством енергії отримують від спалювання вугілля, нафти, газу. Для цього використовують теплові електростанції, на яких



Мал. 96

хімічна енергія палива перетворюється в електричну. За рахунок згоряння палива відбувається нагрівання води, перетворення її в пару і нагрівання пари. Струмінь пари високого тиску спрямовується на роторні лопаті парової турбіни і примушує їх обертатися. Ротор турбіни обертає ротор генератора електричного струму. Генератор змінного струму перетворює механічну енергію в енергію електричного струму.

Змінний струм від генератора по провідниках надходить до споживачів, де електрична енергія перетворюється в інші види енергії. За допомогою електродвигуна змінного струму енергія електромагнітних коливань перетворюється у механічну енергію, а в лампах розжарення, в спіралях електронагрівальних приладів електрична енергія змінного струму перетворюється у внутрішню енергію. Електричну енергію широко застосовують у промисловості, сільському господарстві, на транспорті тощо.



ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. З чого складається трансформатор і яке його призначення?
2. Яке фізичне явище покладене в основу роботи трансформатора?
3. Як визначити коефіцієнт трансформації?
4. Де використовують трансформатори?
5. Де виробляється електроенергія і як вона передається до споживача?

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

1. Напруга на кінцях ділянки кола, по якому проходить змінний струм, змінюється з часом за законом $U = U_{\max} \cos \omega t$, В. У момент часу $t = \frac{T}{6}$ напруга дорівнює 10 В. Визначте амплітуду напруги і циклічну частоту, якщо період коливань становить 0,01 с.

Розв'язання

Циклічна частота визначається за формулою $\omega = \frac{2\pi}{T}$, тому $\omega = 628 \text{ с}^{-1}$.

Миттєве значення напруги в момент $t = \frac{T}{6}$ можна визначити так:

$$U = U_{\max} \cos \frac{2\pi T}{T} \frac{1}{6} = U_{\max} \cos \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2} U_{\max}.$$

Звідси $U_{\max} = 2U$. Отже, $U_{\max} = 20 \text{ В}$.

2. Що трапиться, коли вийняти осердя й ввімкнути обмотку трансформатора у мережу з напругою, на яку він розрахований?

Розв'язання

У даному випадку згорить первинна обмотка.

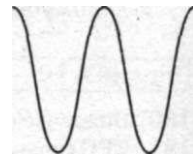
Рівень А

180. Визначте період та частоту змінного струму, кутова частота якого дорівнює 100 л Гц.
181. ЕРС генератора змінного струму змінюється за законом $\mathcal{E} = 310 \sin 100\pi t$, В. Визначте амплітуду ЕРС, частоту та період її зміни, а також ЕРС у момент часу 0,035 с.

182. Сила струму на ділянці кола змінюється за законом $J = 10\sin 400\pi t$, А. Визначте амплітудне значення сили струму, період і частоту зміни сили струму, а також силу струму в момент часу 1,25 мс.
183. Напруга в мережі, що її виміряли вольтметром, становить 120 В. Чому дорівнює амплітудне значення напруги?
184. Первинна і вторинна обмотки трансформатора не перебувають у безпосередньому електричному контакті. Яким чином відбувається передача енергії електричного струму з першої у другу?
185. Чим знижувальний трансформатор відрізняється від підвищувального? Чи можна знижувальний трансформатор використати як підвищувальний?
186. Трансформатор у режимі холостого ходу все-таки споживає з електромережі потужність, хоч і вкрай малу. На що вона витрачається?
187. Під якою напругою перебуває первинна обмотка ненавантаженого трансформатора, що має 100 витків, якщо вторинна обмотка має 250 витків, а напруга на ній дорівнює 550 В? Який коефіцієнт трансформації цього трансформатора?
188. Первинна обмотка ненавантаженого трансформатора перебуває під напругою 220 В. Напруга на вторинній обмотці, що має 450 витків, становить 660 В. Який коефіцієнт трансформації в цьому випадку? Яка кількість витків у первинній обмотці?
189. Трансформатор має коефіцієнт трансформації 10. Яка напруга підведена до його первинної обмотки, якщо в режимі холостого ходу на затискачах вторинної обмотки напруга становить 22 В? Скільки витків у первинній обмотці, якщо у вторинній їх 100?
190. По лінії електропередачі передається потужність 15 кВт. Сила струму в лінії 10 А, а втрати потужності на нагрівання проводів становлять 2 %. Який опір проводів лінії?
191. Втрати потужності у двопровідній лінії опором 2 Ом становлять 2 %. У лінію передається потужність 2,5 кВт. Які втрати напруги на проводах лінії?
192. Від трансформаторної підстанції передається потужність 5 кВт. Сила струму в лінії електропередачі при цьому становить 25 А. Який ККД лінії електропередачі, якщо її опір 0,5 Ом?

Рівень В

193. Як відомо, графік залежності ЕРС від часу при рівномірному обертанні провідної рамки в однорідному магнітному колі є синусоїда. Як зміниться вигляд графіка, якщо частота обертання рамки збільшиться вдвічі?
194. Електроплитку можна живити як змінним, так і постійним струмом. Чи однаково розжарюється спіраль плитки, якщо в обох випадках вольтметри показали однакові напруги?
195. Визначте значення ЕРС, яка індукується в рамці площею 100 см^2 , що обертається із частотою 50 Гц у магнітному полі з індукцією 0,2 Тл. Запишіть закон зміни ЕРС, що індукується в рамці, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до лінії індукції магнітного поля.
196. Скільки витків має рамка площею 500 см^2 , якщо під час обертання її з частотою 1200 об/хв у магнітному полі з індуктивністю 100 мТл у ній індукується ЕРС, амплітудне значення якої дорівнює 63 В. Запишіть закон зміни ЕРС, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до лінії індукції.
197. На мал. 97 показано графік змінного струму частотою 1 кГц. Яка частота розгортки графіка?
198. Під час обертання дрютяної рамки в однорідному магнітному полі магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за за-



Мал. 97

- коном $\Phi = 0,01 \cos 10\pi t$, Вб. У якому положенні була рамка в початковий момент часу? Який вигляд має залежність ЕРС індукції від часу? Яка частота обертання рамки? Чому дорівнюють максимальні значення ЕРС та магнітного потоку?
199. З якою метою у трансформаторах котушки первинної і вторинної обмоток одягають на замкнене феромагнітне осердя?
 200. Обмотку підвищувального трансформатора зроблено із дроту різного діаметру. В якій із обмоток, первинній чи вторинній, діаметр дроту більший?
 201. Що може трапитись, якщо трансформатор, призначений для експлуатації в мережі змінного струму 220 В, приєднати до джерела постійного струму такої ж напруги?
 202. Первинну обмотку знижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації 8 увімкнено в мережу з напругою 220 В. Опір вторинної обмотки 2 Ом, а сила струму в ній 2 А. Визначте ЕРС, індуквану у вторинній обмотці, та напругу на навантаженні.
 203. Підвищувальний трансформатор має коефіцієнт трансформації 0,5. Навантаження споживає потужність 190 Вт при силі струму 0,44 А. Опір вторинної обмотки дорівнює 30 Ом. Яка напруга підведена до первинної обмотки, якщо її опір вкрай малий? Яку потужність споживає трансформатор?
 204. Трансформатор радіотранслятора навантажений 400 гучномовцями, кожен з яких споживає струм силою 8,3 мА при напрузі 30 В. Напруга на його первинній обмотці дорівнює 480 В. Напруга на вторинній обмотці в режимі холостого ходу дорівнює 31 В. Який опір вторинної обмотки? Яка сила струму в первинній обмотці трансформатора?
 205. Теплова електростанція на виробництво електроенергії 1 кВт/год витрачає умовне паливо масою 320 г. Який ККД електростанції? Питома теплота згоряння умовного палива 29 МДж/кг.
 206. Електростанція передає потужність 2 ГВт під напругою 500 кВ. Визначити опір лінії електропередачі, якщо її ККД 96 %.
 207. Місцева електростанція передає в лінію потужність 500 кВт. Які втрати потужності в лінії та який її ККД, якщо вона працює під напругою 20 кВ, а її опір 20 Ом?

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ**Контрольні запитання**

1. Джеймс Максвелл стверджував, що електричний струм — це те, що створює магнітне поле. Як це твердження слід розуміти?
2. У досліді Ерстеда магнітна стрілка не притягується до провідника зі струмом і не відштовхується від нього, а лише повертається. Яка важлива особливість ліній магнітної індукції впливає з цього факту?
3. Із виразу для модуля сили Лоренца отримайте вираз для модуля сили Ампера.
4. Є два види сталі: одна з великою залишковою індукцією, друга — з порівняно незначною. Яка з них більше придатна для виготовлення постійних магнітів, а яка для осердь трансформаторів? Чому?
5. Запропонуйте який-небудь нескладний спосіб стирання інформації, записаної на магнітну стрічку або плівку.
6. Замкнений контур провідника рухається в неоднорідному магнітному полі вздовж ліній магнітної індукції поля. Доведіть, що ЕРС індукції в цьому випадку не дорівнює нулю.
7. Чи залежить ЕРС індукції в рухомому провіднику, що перетинає лінії магнітної індукції, від його опору? А сила струму? Чому?

8. Навколо провідника зі струмом виникло магнітне поле. Що є джерелом енергії цього поля?
9. Як — послідовно чи паралельно — з'єднані між собою проводи двопровідної лінії електропередачі?
10. Як добути у вторинній обмотці трансформатора постійний електричний струм?
11. Опір вторинного кола трансформатора зменшують. Як відіб'ється це на ККД трансформатора? Чому? Опори котушок мізерно малі.
12. При однакових напругах втрати на коронний розряд у лініях постійного струму менші, ніж у лініях змінного струму. Чому?

Що я знаю і вмю робити

Я вмю використовувати співвідношення між фізичними величинами під час розв'язування фізичних задач

1. До кінців прямолінійного мідного провідника з площею поперечного перерізу 2 мм^2 прикладено напругу 6 В. Визначте найбільшу силу, з якою однорідне магнітне поле індукцією 100 мТл може діяти на цей провідник.

2. Яку роботу виконує однорідне магнітне поле з індукцією 20 мТл під час переміщення в ньому прямого провідника завдовжки 50 см на відстань 10 см, якщо по ньому проходить струм силою 10 А? Переміщення відбувається в напрямку дії сили Ампера, а провідник весь час утворює з вектором магнітної індукції кут 30° .

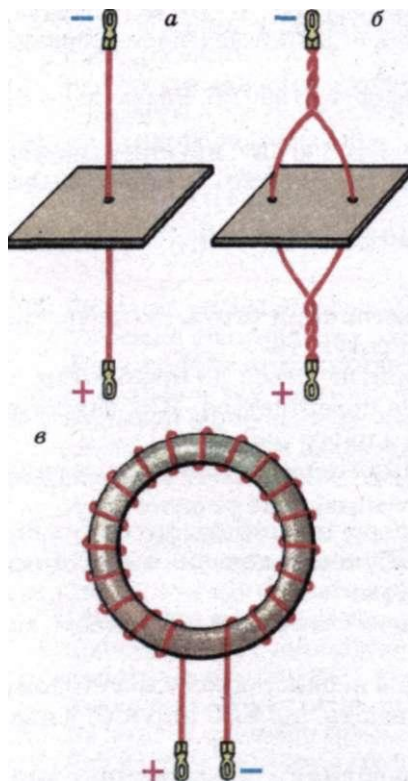
3. Магнітний потік через кожні 100 однакових витків котушки становить 200 мВб. Під час його рівномірного зменшення впродовж 5 мс у котушці виникає ЕРС 400 В. До якого значення зменшується магнітний потік?

4. Магнітний потік через контур замкненого провідника опором 100 мОм за 5 с змінюється на 20 мВб. Яка сила струму, що протікає у провіднику під час цієї зміни, якщо магнітний потік змінюється рівномірно?

Я знаю, які є спектри магнітних полів, і вмю їх малювати

5. На мал. 98, а показано прямий провідник, що проходить через картонний екран, площина якого перпендикулярна до провідника. На мал. 98, б жилу провідника розділено на дві гілки, що також проходять через екран. На мал. 98, в зображено тороїдальне дерев'яне осердя, що має суцільну обмотку.

Намалюйте в зошитах спектри магнітних полів прямого і розділеного провідника в площинах екранів і картину магнітного поля тороїдальної обмотки в площині малюнка.



Мал. 98

Я знаю, як взаємодіють між собою провідники зі струмом

6. На мал. 99 показано котушки, кінці обмоток яких досить довгі і закріплені в спеціальних затискачах. З'єднання кінців котушок з джерелом струму наведено на мал. 99, а. Визначте характер взаємодії котушок і намалюйте в зошитах схеми їхніх магнітних полів.

7. На мал. 99, зображено дві котушки А і В. Між котушками підвішена на тонких гнучких провідниках котушка С. В середині цієї котушки закріплена стрілка. Визначте положення цієї стрілки при виникненні струму в усіх котушках.

Я знаю, як побудований трансформатор, вмю пояснювати, як він працює

8. Чи може трансформатор: а) мати одну первинну обмотку і кілька вторинних; б) змінювати напругу постійного струму; в) підвищувати напругу одночасно зі збільшенням сили змінного струму?

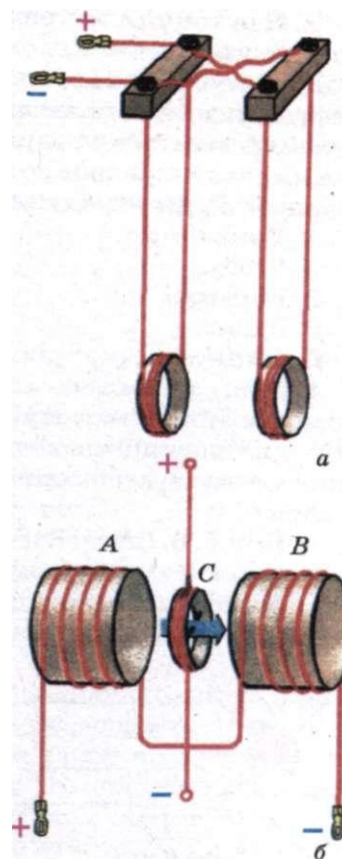
9. Чи змінює трансформатор частоту сили струму?

10. Чим пояснити, що ККД трансформатора вищий, ніж у найбільш вдалих конструкцій електродвигунів?

11. Під якою напругою перебуває первинна обмотка ненавантаженого трансформатора, що має 100 витків, якщо вторинна обмотка має 250 витків, а напруга в ній 550 В? Який коефіцієнт трансформації цього трансформатора?

12. Первинну обмотку знижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації 10 увімкнено в мережу з напругою 220 В. Опір вторинної обмотки 4 Ом, а сила струму в ній 3 А. Визначте ЕРС, індуковану у вторинній обмотці, та напругу на навантаженні.

13. Коефіцієнт трансформації підвищувального трансформатора дорівнює 0,5. Вторинна обмотка має опір 0,2 Ом, а опір навантаження 10,8 Ом. Напруга на навантаженні становить 216 В. Якою напругою живиться трансформатор? Яка сила струму в первинній обмотці? Який ККД трансформатора?



Мал. 99

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант I

- Силовою характеристикою магнітного поля є
А. вектор магнітної індукції. Б. магнітна проникність.
В. магнітний потік. Г. сила Лоренца. Д. сила Ампера.
- Сила Лоренца — це сила, з якою магнітне поле діє на
А. електричний заряд, що рухається.
Б. провідник зі струмом.

В. нерухомий електричний заряд.

Г. постійний магніт.

Д. нейтральну частинку, що рухається.

3. Визначте напрям сили Лоренца, яка діє з боку магнітного поля на рухомий негативний заряд q . Вектор магнітної індукції напрямлений від нас, перпендикулярно до площини малюнка, вектор швидкості руху заряду лежить у площині малюнка.

А. Вниз.

Б. Вгору.

В. Вправо.

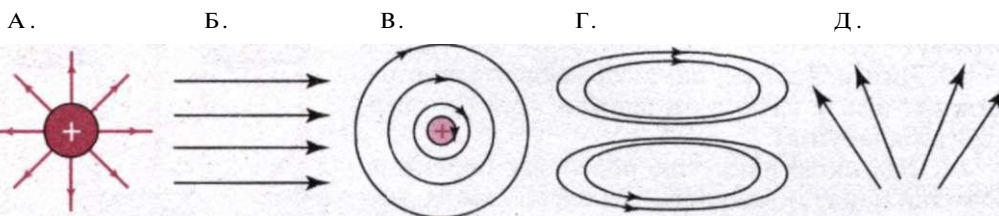
Г. Вліво.

Д. До нас.

4. Куди напрямлена сила Лоренца, з якою магнітне поле постійного магніту діє на рухомий електрон? Вектори індукції магнітного поля і швидкості частинки взаємно перпендикулярні і лежать у площині малюнка.

А. Вгору. Б. Вліво. В. До нас. Г. Від нас. Д. Вправо.

5. Який з варіантів відповідає картині силових ліній магнітного поля прямолінійного провідника зі струмом?



6. Провідник, по якому тече струм силою 5 А, розміщений у магнітному полі з індукцією 10 мТл. Кут між напрямом сили струму і вектором магнітної індукції поля становить 60° . Визначте довжину провідника, якщо поле діє на нього з силою 20 мН.

А. 0,12 м. Б. 120 см. В. 0,46 м. Г. 4,6 см. Д. 0,46 см.

7. Електрон влітає в однорідне магнітне поле індукцією 10^{-3} Тл зі швидкістю 100 км/с перпендикулярно до силових ліній поля. Визначте силу, яка діє на електрон з боку магнітного поля.

А. $1,6 \cdot 10^{-20}$ Н. Б. $1,6 \cdot 10^{-17}$ Н. В. 16 мкН. Г. $1,6 \cdot 10^{-19}$ Н. Д. $1,6 \cdot 10^{-21}$ Н.

8. Який магнітний потік створюється магнітним полем Землі через підлогу площею 25 м^2 , якщо вертикальна складова вектора індукції цього поля 50 мкТл?

А. 2 мкВб. Б. 0. В. 1,25 мВб. Г. 0,5 мкВб. Д. 2,5 мВб.

9. При переміщенні провідника довжиною 80 см зі струмом силою 20 А в однорідному магнітному полі з індукцією 1,2 Тл перпендикулярно до нього виконано роботу 1,92 Дж. Визначте переміщення провідника.

А. 1 м. Б. 1 см. В. 10 м. Г. 0,1 м. Д. 0,1 см.

10. Максимальний обертальний момент, який діє на рамку площею 1 см^2 , розміщену в магнітному полі, дорівнює 2 мкН · м. Сила струму, що проходить у рамці, становить 0,5 А. Визначте індукцію магнітного поля.

А. 0,04 Тл. Б. 0,4 Тл. В. 4 Тл. Г. 26 мТл. Д. 46 Тл.

11. Плоска прямокутна рамка має 250 витків, площу 500 см^2 і розміщена в однорідному магнітному полі з індукцією 0,2 Тл. Якої сили струм проходить у витках рамки, якщо найбільший обертальний момент, що діє на рамку, дорівнює $2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$?

А. 0,1 А. Б. 2,5 А. В. 1 А. Г. 25 А. Д. 10 А.

12. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і їх назвами.

А. Обертальний момент.	1. Н.
Б. Магнітна індукція.	2. Вб.
В. Магнітний потік.	3. $\text{Н} \cdot \text{м}$.
Г. Сила Лоренца.	4. Тл.

13. Індукційний струм виникає у будь-якому замкнутому провідному контурі, якщо

А. контур перебуває в однорідному магнітному полі.
 Б. контур рухається поступально в однорідному магнітному полі.
 В. змінюється магнітний потік, що пронизує контур.
 Г. контур перебуває в неоднорідному магнітному полі.
 Д. магнітний потік, що пронизує контур, не змінюється.

14. В однорідному магнітному полі, що змінюється, розміщена нерухома дротяна рамка. Виберіть правильне твердження.

А. Якщо вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площі рамки, в рамці виникає індукційний струм.

Б. Якщо вектор індукції магнітного поля перпендикулярний до площі рамки, магнітний потік через площину рамки весь час дорівнює нулю.

В. ЕРС індукції в рамці залежить тільки від площі рамки.

Г. Індукційний струм у рамці виникає за будь-якого положення рамки.

Д. ЕРС індукції в рамці не залежить від площі рамки.

15. На малюнку наведено схематичне зображення короткозамкненої котушки, яку охоплює дротяний виток із джерелом струму й вимикачем. Виберіть правильне твердження.

А. Індукційний струм у котушці буде існувати весь час, поки ключ замкнуто.

Б. При замиканні ключа в котушці на короткий час виникає індукційний струм.

В. У котушці взагалі не виникає індукційний струм.

Г. При розмиканні ключа в котушці не виникає індукційний струм.

Д. Магнітне поле індукційного струму завжди напрямлене вгору.

16. Який із наведених нижче виразів характеризує поняття індуктивності?

А. Фізична величина, що характеризує дію магнітного поля на заряд.

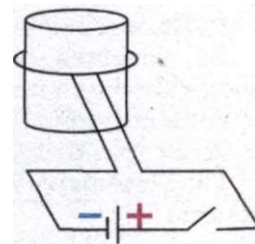
Б. Фізична величина, що характеризує здатність провідника перешкоджати проходженню струму.

В. Фізична величина, що характеризує здатність провідника перешкоджати зміні струму.

Г. Явище, що характеризує дію магнітного поля на заряд, який рухається.

Д. Явище, що характеризує дію магнітного поля на нерухомий заряд.

17. Якщо розімкнути ключ у колі живлення потужного електромагніту, спостерігається сильна іскра. Що її викликає?



- А. ЕРС джерела струму.
- Б. ЕРС самоіндукції в котушці електромагніту.
- В. Хаотичний рух вільних електронів у провідниках.
- Г. Електростатичне поле.
- Д. Електричні заряди.

18. У провіднику, який рухається в магнітному полі, виникає ЕРС індукції. Виберіть правильне твердження.

- А. Якщо збільшити індукцію магнітного поля, ЕРС індукції в провіднику, який рухається, зменшиться.
- Б. ЕРС індукції максимальна, якщо швидкість провідника перпендикулярна до провідника і вектора індукції магнітного поля.
- В. ЕРС індукції залежить тільки від швидкості руху провідника.
- Г. ЕРС індукції залежить тільки від довжини провідника.
- Д. ЕРС індукції залежить тільки від індукції магнітного поля.

19. Виберіть формулу для визначення магнітного потоку.

А. $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Б. $L = \frac{\Phi}{I}$. В. $W = \frac{LI^2}{2}$. Г. $\mathcal{E} = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$. Д. $\Phi = BS \cos \alpha$.

20. У котушці з індуктивністю 0,5 Гн при зростанні сили струму виникла ЕРС самоіндукції 12 В. На скільки щосекунди збільшувалася сила струму?
А. 0,1 А. Б. 6 А. В. 12 А. Г. 24 А. Д. 30 А.

21. Як потрібно змінити індуктивність контуру, для того, щоб за незмінного значення сили струму в ньому енергія магнітного поля зменшилася в 4 рази?

- А. Збільшити у 2 рази.
- Б. Зменшити у 2 рази.
- В. Збільшити в 4 рази.
- Г. Зменшити в 4 рази.
- Д. Збільшити у 8 разів.

22. Котушка має 200 однакових витків. Магнітний потік, який пронизує витки котушки при силі струму 8 А, дорівнює 3 мВб. Яка енергія магнітного поля котушки?

- А. 24 Дж. Б. 4 Дж. В. 5 Дж. Г. 1,2 Дж. Д. 2,4 Дж.

23. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А. $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

1. Закон електромагнітної індукції.

Б. $\mathcal{E} = Blv \sin \alpha$.

2. Енергія магнітного поля.

В. $\mathcal{E} = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$.

3. ЕРС самоіндукції.

Г. $W = \frac{LI^2}{2}$.

4. ЕРС індукції в рухомих провідниках.

24. Виробництво електроенергії зумовлено розвитком

- А. промисловості.
- Б. побутової техніки.
- В. охорони навколишнього середовища.

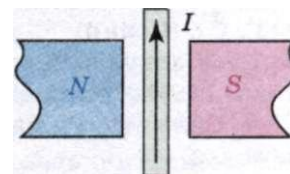
- Г. лісового господарства.
 Д. транспорту.
25. В основу роботи генератора постійного струму покладено явище
 А. нагрівання провідників під дією електричного струму.
 Б. породження змінним магнітним полем вихрового електричного.
 В. нагрівання магнітним полем.
 Г. породження магнітним полем електричного.
 Д. породження змінним магнітним полем електростатичного поля.
26. Генератор змінного струму складається з
 А. замкненої рамки, постійного магніту.
 Б. ротора, статора.
 В. ротора, статора, щітки.
 Г. ротора, статора, щіток, кілець.
 Д. ротора, статора, щіток, напівкілець.
27. Первинна обмотка трансформатора використовується для
 А. створення змінного магнітного поля.
 Б. індуквання струму.
 В. нагрівання.
 Г. охолодження.
 Д. під'єднання до джерела постійного струму.

Варіант II

1. Фізична величина, що характеризує магнітні властивості речовини, називається

- А. магнітною індукцією. Б. магнітним потоком.
 В. діелектричною проникністю середовища.
 Г. магнітною проникністю середовища. Д. магнітним полем.

2. Вкажіть напрям сили Ампера, з якою магнітне поле діє на відрізок провідника зі струмом. Провідник розташований у площині малюнка перпендикулярно до силових ліній магнітного поля.

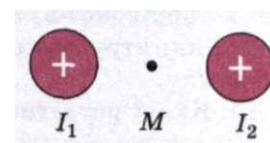


- А. Вліво.
 Б. Вправо.
 В. До нас.
 Г. Від нас.
 Д. Вгору.

3. Яке співвідношення є математичним записом модуля сили Лоренца?

- А. $F = q\mathcal{E}$. Б. $F = qBv\sin\alpha$. В. $F = BIl\sin\alpha$. Г. $F = \mu N$. Д. $F = ma$.

4. По двох паралельних прямолінійних провідниках, розташованих перпендикулярно до площини малюнка, течуть струми з силами $I_1 = 1$ А та $I_2 = 2$ А. Куди напрямлений вектор магнітної індукції у точці M , яка рівновіддалена від цих провідників?



- А. Вгору. Б. Вліво. В. Вниз. Г. Від нас. Д. Вправо.

5. На відрізок провідника довжиною 10 см, по якому тече струм силою 10 А, з боку однорідного магнітного поля діє сила $5 \cdot 10^{-3}$ Н. Яка індукція магнітного поля, якщо провідник розташований перпендикулярно до силових ліній поля?

- А. 200 Тл. Б. 200 мТл. В. 5 мТл. Г. 5 Тл. Д. 2 Тл.

6. Яка сила діє на відрізок провідника завдовжки 10 см в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл, якщо сила струму у провіднику 1 А, а кут між напрямом струму та силовими лініями магнітного поля становить 60° ?
 А. 0,866 Н. Б. 8,66 Н. В. 8,66 мН. Г. 5 мН. Д. 5 Н.

7. Визначте доцентрове прискорення електрона, який рухається зі швидкістю $1 \cdot 10^6$ м/с в однорідному магнітному полі з індукцією $1 \cdot 10^{-3}$ Тл, якщо швидкість електрона перпендикулярна до вектора магнітної індукції.

А. $1,6 \cdot 10^{-19}$ м/с². Б. 10 м/с². В. 160 м/с². Г. $1 \cdot 10^3$ м/с². Д. $1,76 \cdot 10^{14}$ м/с².

8. Визначте модуль вектора індукції магнітного поля Землі, вертикальна і горизонтальна складові якого відповідно дорівнюють 50 і 20 мкТл.

А. 70 мкТл. Б. 30 мкТл. В. 53,85 мкТл. Г. 45,83 мкТл. Д. 27,48 мкТл.

9. Магнітна індукція у бруску металу дорівнює 0,75 Тл, а індукція зовнішнього намагніченого поля дорівнює 0,0375 Тл. Яку відносну магнітну проникність має метал?

А. 10. Б. 15. В. 20. Г. 25. Д. 30.

10. Рамку площею 40 см² розмістили в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл так, що нормаль до рамки перпендикулярна до ліній індукції. При якій силі струму на рамку діятиме обертальний момент 20 мН · м?

А. 5 мА. Б. 100 А. В. 10 мА. Г. 15 А. Д. 50 А.

11. Електрон під дією сили однорідного електричного поля, що дорівнює $1,456 \cdot 10^{-17}$ Н, рухається з прискоренням. Визначте прискорення електрона.

А. $1,6 \cdot 10^{13}$ м/с². Б. 1 м/с². В. 0,016 м/с². Г. $1 \cdot 10^{12}$ м/с². Д. $1,76 \cdot 10^{14}$ м/с².

12. Установіть відповідність між співвідношеннями і тим, що вони виражають:

А. $F = qvB \sin \alpha$. 1. Магнітна проникність середовища.

Б. $\mu = \frac{B}{B_0}$. 2. Сила Ампера.

В. $\Phi = BS \cos \alpha$. 3. Сила Лоренца.

Г. $F = BIl \sin \alpha$. 4. Магнітний потік.

13. У нерухомій дротяній рамці, що розташована в магнітному полі, виникає індукційний струм. Виберіть правильне твердження.

А. Сила струму максимальна, коли магнітний потік через рамку не змінюється.

Б. Сила струму прямо пропорційна опорі рамки.

В. Сила струму тим більша, чим повільніше змінюється магнітний потік через рамку.

Г. Якщо площа рамки паралельна лініям індукції магнітного поля, магнітний потік через рамку дорівнює нулю.

Д. Сила струму тим менша, чим швидше змінюється магнітний потік через рамку.

14. Якщо магнітне поле змінюється, то виникає

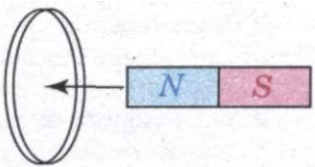
А. електростатичне поле.

Б. позитивний електричний заряд.

В. вихрове електричне поле.

Г. негативний електричний заряд.

Д. позитивний і негативний електричні заряди.

15. Вихрове електричне поле виникає при
- проходженні постійного струму по замкнутому контуру.
 - змінах магнітного поля.
 - взаємодії двох електричних струмів.
 - взаємодії двох нерухомих заряджених частинок.
 - повертанні площини контуру навколо осі.
16. До центра мідного кільця, підвішеного на нитці, швидко підносять магніт (малюнок). Що відбудеться з кільцем?
- Кільце відштовхнеться від магніту.
 - Кільце залишиться нерухожим.
 - Кільце притягнеться до магніту.
 - У кільці виникне незатухаючий струм.
 - Кільце повернеться до магніту іншим боком.
- 
17. За 2,5 мс магнітний потік, який пронизує контур, рівномірно спадає від 10 до 5 мВб. Визначте ЕРС індукції в контурі.
- 2 В.
 - 4 В.
 - 0,2 В.
 - 0,4 В.
 - 20 В.
- 18.3 якою швидкістю провідник завдовжки 1 м рухається в однорідному магнітному полі з індукцією 12 мТл, якщо між його кінцями виникає різниця потенціалів 120 мВ? Сам провідник і напрям його руху перпендикулярні до ліній індукції магнітного поля.
- 0,1 м/с.
 - 10 м/с.
 - 35 м/с.
 - 2 м/с.
 - 100 м/с.
19. Визначте індуктивність котушки, в якій під час зміни сили струму від 5 до 10 А за 0,1 с виникає ЕРС самоіндукції 10 В.
- 300 Гн.
 - 0,05 Гн.
 - 20 Гн.
 - 4 Гн.
 - 0,2 Гн.
20. Визначте швидкість зміни магнітного потоку в соленоїді з 1000 витків під час збудження в ньому ЕРС індукції 150 В.
- 15 Вб/с.
 - 0,15 Вб/с.
 - 1,5 Вб/с.
 - 0,25 Вб/с.
 - 25 Вб/с.
21. У котушці з індуктивністю 0,2 Гн сила струму 10 А. Чому дорівнює енергія магнітного поля цієї котушки?
- 1 Дж.
 - 10 Дж.
 - 20 Дж.
 - 100 Дж.
 - 0,01 Дж.
22. Визначте індуктивність котушки з осердям, якщо при швидкості зміни сили струму 50 А/с у ній збуджується ЕРС самоіндукції 20 В.
- 400 мГн.
 - 0,04 Гн.
 - 40 Гн.
 - 40 мкГн.
 - 4 Гн.
23. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і їх назвами:
- | | |
|-----------------------|-----------|
| А. Індуктивність. | 1. Вебер. |
| Б. Магнітна індукція. | 2. Генрі. |
| В. Магнітний потік. | 3. Вольт. |
| Г. ЕРС індукції. | 4. Тесла. |
24. В основу роботи генератора змінного струму покладено явище
- гістерезису.
 - електромагнітної індукції.
 - нагрівання магнітним полем.
 - розрядки конденсатора.
 - зарядки конденсатора.
25. Генератор постійного струму складається з
- індуктора, якоря, колектора із щітками.
 - індуктора, якоря.

- В. індуктора, колектора.
 - Г. якоря, колектора із щітками.
 - Д. індуктора, колектора із щітками, постійного магніту.
26. В основу роботи трансформатора покладено закон
- А. Джоуля—Ленца.
 - Б. Кірхгофа.
 - В. Ома для постійного струму.
 - Г. Фарадея для електромагнітної індукції.
 - Д. Ньютона.
27. Вторинна обмотка трансформатора використовується для
- А. під'єднання до джерела змінного струму та створення магнітного поля.
 - Б. під'єднання до джерела постійного струму.
 - В. індукування струму за рахунок змінного магнітного поля.
 - Г. створення постійного струму.
 - Д. нагрівання.