

§ 11. СИЛА АМПЕРА



Якщо рамку зі струмом розташувати між полюсами магнітів, рамка повернеться і встановиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля, створеного магнітами. А як змусити рамку обертатися? Як створити електричний двигун, який, до речі, був винайдений на півстоліття раніше, ніж двигун внутрішнього згоряння? Чому магнітне поле чинить на рамку зі струмом орієнтувальну дію? Згадаємо і дізнаємося нове.

1 Сила Ампера

Восени 1820 р. А. Ампер, досліджуючи дію магнітного поля на провідники різних форм і розмірів, отримав формулу для визначення сили, що діє на окрему невелику ділянку провідника (на елемент струму). Зараз цю силу називають *силою Ампера*.

Сила Ампера — це сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом.

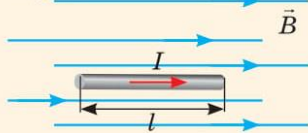
Якщо провідник прямолінійний, а магнітне поле, в якому він перебуває, однорідне, то модуль сили Ампера визначають за формулою:

$$F_A = BIl \sin \alpha,$$

де B — магнітна індукція поля, в якому перебуває провідник; I — сила струму в провіднику; l — довжина активної частини провідника; α — кут між вектором магнітної індукції і напрямком струму (рис. 11.1).

- Провідник розташований паралельно лініям магнітної індукції — *магнітне поле на провідник не діє*:

$$F_A = 0$$



- Провідник розташований перпендикулярно до ліній магнітної індукції — *сила Ампера є максимальною*:

$$F_A = BIl$$



- У загальному випадку силу Ампера визначають за формулою:

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

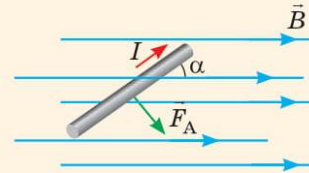


Рис. 11.1. Залежність значення сили Ампера від орієнтації провідника в магнітному полі

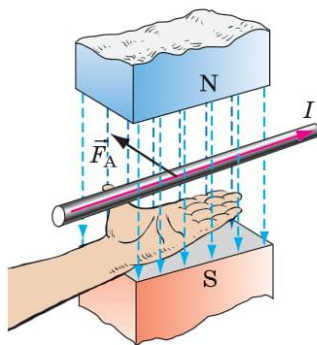


Рис. 11.2. Визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки

Напрямок сили Ампера визначають за правилом лівої руки (рис. 11.2):

Якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямок струму в провіднику, то відігнутий на 90° великий палець укаже напрямок сили Ампера.

Зверніть увагу: якщо провідник не прямий і (або) магнітне поле неоднорідне, то можна визначити сили Ампера, які діють на невеликі ділянки провідника, а потім геометричним додаванням обчислити силу Ампера, що діє на провідник у цілому.

2 Момент сил Ампера, які діють на рамку зі струмом

Візьмемо легку прямокутну рамку зі сторонами a і b , яка складається з одного витка дроту, помістимо її в однорідне магнітне поле так, щоб вона могла легко обертатися навколо горизонтальної осі, і пропустимо в рамці струм (рис. 11.3, а). Погойдавшись, рамка установиться перпендикулярно до ліній магнітної індукції (рис. 11.3, б). Знайдемо момент сил Ампера, що діють на рамку в деякий момент часу (рис. 11.3, в). Для цього визначимо напрямок, модуль і плече кожної із сил, що діють на сторони рамки. Бачимо:

1) сили Ампера $\vec{F}_3$ і $\vec{F}_4$ не повертають, а лише розтягують рамку — моменти цих сил дорівнюють нулю.

2) сили Ампера $\vec{F}_1$ і $\vec{F}_2$ повертають рамку проти ходу годинникової стрілки — створюють *обертальний момент* M : $M = M_1 + M_2 = F_1 d_1 + F_2 d_2$. Тут $F_1 = F_2 = B I a$, де I — сила струму, a — довжина сторони AK (і CD); $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \sin \alpha$, де b — довжина сторони KC , α — кут між вектором $\vec{B}$ магнітної індукції і нормаллю n до рамки (рис. 11.3, з).

Отже: $M = B I a \frac{b}{2} \sin \alpha + B I a \frac{b}{2} \sin \alpha = B I S \sin \alpha$, де $S = ab$ — площа рамки.

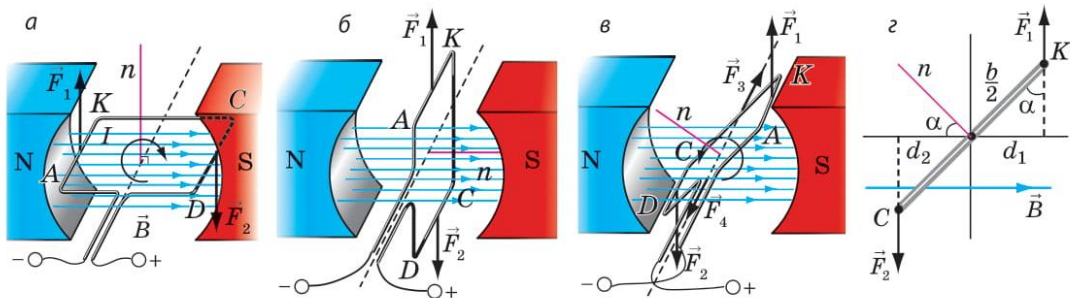


Рис. 11.3. Дослідження дії магнітного поля на рамку зі струмом: а — сили Ампера $\vec{F}_1$ і $\vec{F}_2$ повертають рамку $AKCD$ за ходом годинникової стрілки; б — у положенні рівноваги сили Ампера не повертають рамку, а розтягують; в — сили Ампера повертають рамку проти ходу годинникової стрілки

Момент сил Ампера, які діють на плоский замкнений контур, розташований в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку модуля магнітної індукції поля, сили струму в контурі, площі контуру і синуса кута α між вектором магнітної індукції та нормаллю до площини контуру:

$$M = BIS \sin \alpha$$

Зверніть увагу:

1) якщо *рамка розташована паралельно лініям магнітної індукції* ($\alpha = 90^\circ$), то обертальний момент найбільший ($\sin \alpha = 1$): $M_{\max} = BIS$ (див. [рис. 11.3, а](#)); якщо *рамка розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції* ($\alpha = 0$), то обертальний момент дорівнює нулю ($\sin \alpha = 0$), — це положення стійкої рівноваги рамки (див. [рис. 11.3, б](#)).

2) якщо *рамка містить N витків дроту*, обертальний момент розраховують за формулою:

$$M = NBIS \sin \alpha$$

3 Де застосовують сили Ампера

Обертання рамки зі струмом у магнітному полі використовують в **електричних двигунах** — пристроях, в яких *електрична енергія перетворюється на механічну*.

Повернемося до [рис. 11.3](#). Бачимо, що сили Ампера спочатку повертають рамку в одному напрямку ([рис. 11.3, а](#)), а після проходження положення рівноваги — в протилежному ([рис. 11.3, в](#)). Тому рамка дуже швидко зупиняється в положенні рівноваги. Щоб рамка не зупинялась і оберталась в одному напрямку, застосовують **колектор** — пристрій, який автоматично змінює напрямок струму в рамці ([рис. 11.4](#)). Півкільця колектора обертаються разом із рамкою, а щітки залишаються нерухомими, тому після проходження положення рівноваги до щіток притискаються вже інші півкільця. Напрямок струму в рамці змінюється на протилежний, а напрямок обертання рамки не змінюється.

Зрозуміло, що обертальний момент, який створюють сили Ампера в рамці, зображений на [рис. 11.4](#), є дуже малим, тому потужність такого «двигуна» незначна.

Нагадаємо

• **Момент сили M** — це фізична величина, яка характеризує обертальний ефект сили і дорівнює добутку сили F на плече d сили:

$$M = F \cdot d; [M] = \text{Н} \cdot \text{м}.$$

• **Плече сили d** — це відстань від осі обертання до лінії дії сили.

• Момент сили вважають **додатним**, якщо сила повертає (або намагається повернути) тіло проти ходу годинникової стрілки, і **від'ємним**, якщо сила повертає тіло за ходом годинникової стрілки.

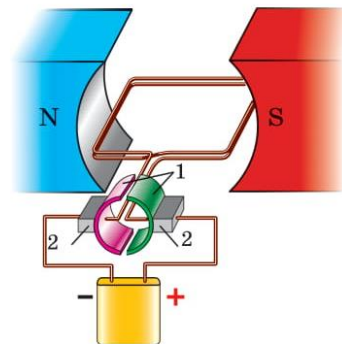
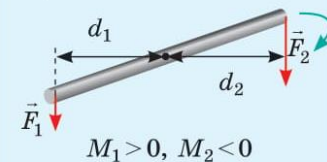


Рис. 11.4. Колектор являє собою два провідних півкільця (1), до кожного з яких притиснута металева щітка (2); щітки з'єднані з полюсами джерела струму

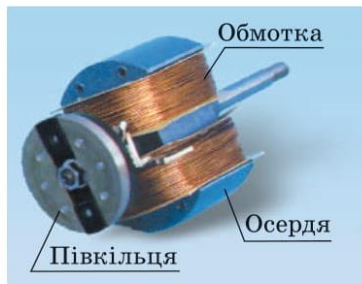


Рис. 11.5. Ротор двигуна (від латин. *rotare* — обертатися), який містить одну обмотку

Для збільшення обертового моменту ($M = NBIS \sin \alpha$) у реальних електродвигунах:

1) *обмотку* обертової частини двигуна — *ротора* (від латин. *rotare* — обертатися) — виготовляють із великої кількості витків дроту, які вкладають у спеціальні пази на бічній поверхні *осердя* — циліндра, виготовленого з листів магнітної сталі (рис. 11.5);

2) використовують кілька обмоток, які намотують на одне осердя; колектор такого двигуна має низку мідних дугоподібних контактних пластин, закріплених на ізолюваному барабані, і кожна обмотка з'єднана з однією парою пластин;

3) замість постійного магніту використовують електромагніт, який становить одне ціле з корпусом електродвигуна та слугує *статором* (від латин. *stator* — той, що стоїть нерухомо). Обмотка статора підключена до того самого джерела струму, що й обмотка ротора.

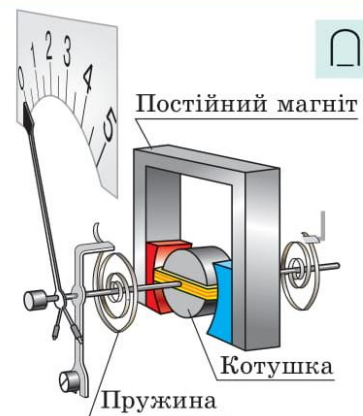
❓ Як ви вважаєте, за рахунок збільшення якої фізичної величини збільшується обертальний момент у кожному випадку?

Електровимірювальні прилади магніто-електричної та електродинамічної систем

У цих приладах використовують залежність обертового моменту, створеного силами Ампера, від сили струму в рамці.

Коли прилад вмикають у коло, в рамці починає йти струм і внаслідок дії сил Ампера рамка повертається в магнітному полі магніту. Разом із рамкою повертається стрілка й одночасно закручуються спіральні пружини. Коли момент сил Ампера зрівноважується моментом сил пружності, рух стрілки припиняється, проте вона залишається відхиленою. Чим більша сила струму в рамці, тим на більший кут відхилиться стрілка.

У приладах *електродинамічної системи* замість постійного магніту застосовують *електромагніт*.

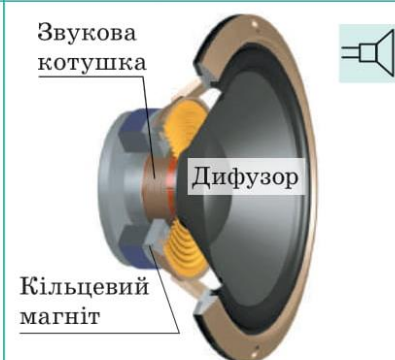


Вимірювальний механізм приладів магнітоелектричної системи

Електродинамічний гучномовець (динамік)

У динаміку сила Ампера, що діє на витки котушки, змушує котушку втягуватись у кільцевий магніт. Коли сила струму в котушці змінюється зі звуковою частотою, так само змінюється й сила Ампера — котушка коливається в такт зміні сили струму. Разом із котушкою коливається і прикріплений до неї дифузор, який «штовхає» повітря, створюючи звукову хвилю, — гучномовець випромінює звук.

До речі, поширені зараз навушники — це саме електродинамічні випромінювачі звуку.



4

Учимося розв'язувати задачі

Задача. Щоб визначити магнітну індукцію магнітного поля, створеного підковоподібним магнітом, учні за допомогою проводів підвісили між полюсами магніту алюмінієвий провідник завдовжки 8 см і масою 6 г (див. рис. 1). Коли в провіднику йшов струм силою 3 А, провідник відхилився на кут 45° від вертикалі. Який результат отримали учні? Магнітне поле на ділянці, де розташований провідник, вважайте однорідним і вертикальним.

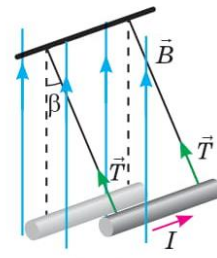


Рис. 1

Аналіз фізичної проблеми. Провідник відхиляється внаслідок дії сили Ампера, напрямком якої визначимо за правилом лівої руки. Провідник горизонтальний, а магнітне поле вертикальне, тому кут α між напрямком струму та вектором магнітної індукції становить 90° . Зважаючи на те що сили, які діють на провідник, скомпенсовані, визначимо магнітну індукцію поля.

Дано:

$$l = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$I = 3 \text{ А}$$

$$\beta = 45^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$B = ?$

Пошук математичної моделі, розв'язання.

На провідник діють чотири сили: сила тяжіння, дві сили натягу проводів і сила Ампера (рис. 2). Запишемо рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проекціях на осі координат:

$$\vec{F}_A + m\vec{g} + 2\vec{T} = 0;$$

$$\begin{cases} OX: F_A - 2T \sin \beta = 0, \\ OY: 2T \cos \beta - mg = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2T \sin \beta = F_A, \\ 2T \cos \beta = mg. \end{cases}$$

Поділивши перше рівняння системи на друге, маємо: $\frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{F_A}{mg}$, або $\operatorname{tg} \beta = \frac{F_A}{mg}$,

де $F_A = BIl \sin \alpha = BIl$, оскільки $\alpha = 90^\circ$.

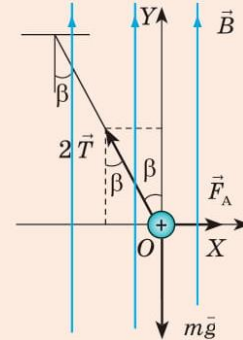


Рис. 2

$$\text{Отже, } \operatorname{tg} \beta = \frac{BIl}{mg} \Rightarrow B = \frac{mg \operatorname{tg} \beta}{Il}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[B] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл}; \quad B = \frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ}{3 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 0,25 \text{ (Тл)}.$$

Відповідь: $B = 0,25 \text{ Тл}$.



Підбиваємо підсумки

- Силу, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, називають силою Ампера. Модуль сили Ампера визначають за формулою $F_A = BIl \sin \alpha$, напрямком — за правилом лівої руки.
- На плоский замкнений контур зі струмом I і площею S , розташований в однорідному магнітному полі індукцією B , сили Ампера створюють обертальний момент: $M = BIS \sin \alpha$, де α — кут між вектором магнітної індукції і нормаллю до площини контуру.
- На обертанні в магнітному полі рамки зі струмом ґрунтується дія електричних двигунів, на повертанні — дія приладів магнітоелектричної та електродинамічної систем; на поступальному русі рамки — дія гучномовців.



Контрольні запитання

1. Дайте означення сили Ампера. За якою формулою її розраховують? Як визначають її напрямок? 2. Виведіть формулу для визначення моменту сил Ампера, що діють на рамку зі струмом з боку магнітного поля. За якого положення рамки момент сил дорівнює нулю? є максимальним? 3. Опишіть принцип дії електричного двигуна постійного струму. 4. Опишіть будову та принцип дії вимірювальних приладів магнітоелектричної системи; електродинамічного гучномовця.



Вправа № 11

1. Сила струму в провіднику завдовжки 60 см дорівнює 1,2 А. Визначте найбільше та найменше значення сили Ампера, яка діє на провідник, за умов різних його положень в однорідному магнітному полі індукцією 15 мТл. 2. На рис. 1 показано декілька ситуацій взаємодії магнітного поля і провідника зі струмом. Для кожної ситуації сформулюйте завдання та виконайте його.

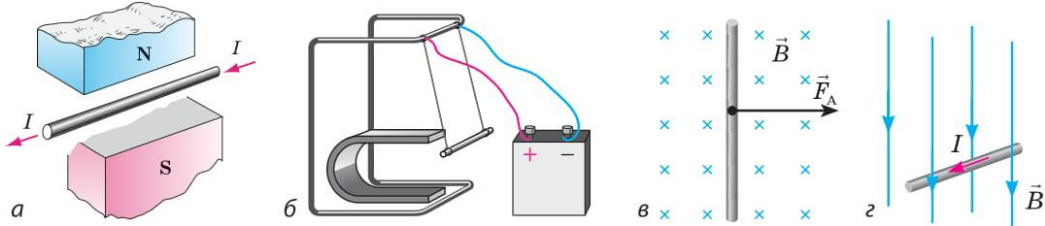


Рис. 1

3. Знайдіть момент сил Ампера, що діють на рамку, розташовану в однорідному магнітному полі індукцією 0,6 Тл. Рамка містить 50 витків дроту і має площу $20 \times 5,0$ (см). Сила струму в рамці — 2,5 А, кут між вектором магнітної індукції і площиною рамки — 60° . 4. На рис. 2 зазначені напрямки струму в рамці та напрямки, у якому повертається рамка в магнітному полі електромагніту. Визначте полюси джерела струму, до якого підключена обмотка електромагніту. 5. Горизонтальний провідник масою 50 г і завдовжки 20 см тягнуть із силою 0,6 Н по двох провідних стрижнях, приєднаних до джерела струму (рис. 3). Перпендикулярно до провідника діє однорідне магнітне поле індукцією 0,4 Тл. Визначте, з яким прискоренням рухається провідник, якщо сила струму в ньому дорівнює 5 А, коефіцієнт тертя — 0,2, а магнітне поле напрямлене: а) вертикально вгору; б) вертикально вниз; в) горизонтально ліворуч; г) горизонтально праворуч.

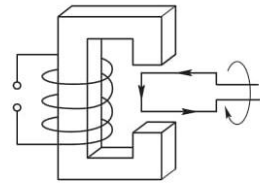


Рис. 2



Рис. 3



Експериментальне завдання

Знайдіть удома будь-який пристрій, що вийшов із ладу і містить електродинамічний мікрофон (трубка стаціонарного телефона, одноканальний радіоприймач (радіоточка), навушники). Знайдіть у цьому пристрої динамік, розгляньте його будову, визначте основні складники (магніт, котушку, дифузор).

