

## § 19. СИЛА АМПЕРА. МОМЕНТ СИЛ, ЯКИЙ ДІЄ НА ПРЯМОКУТНУ РАМКУ ЗІ СТРУМОМ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ



Магнітне поле діє на провідник зі струмом з певною силою — силою Ампера. На дії цієї сили ґрунтується робота багатьох електромеханічних систем. Згадаємо, як працюють такі системи, проте для початку доцільно з'ясувати, як знайти значення сили Ампера та чому магнітне поле чинить на рамку зі струмом орієнтуючу дію.



### Як визначають модуль і напрямок сили Ампера

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

Відповідно до визначення магнітної індукції  $\left( B = \frac{F_{A \max}}{Il} \right)$  *максимальна сила Ампера* дорівнює:

$$F_{A \max} = BIl.$$

Сила Ампера залежить від орієнтації провідника відносно вектора магнітної індукції: магнітне поле не впливає на провідник зі струмом, вісь якого паралельна лініям магнітної індукції, натомість сила Ампера максимальна у випадку, коли вісь провідника перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Тобто модуль сили Ампера залежить

тільки від проекції вектора магнітної індукції на вісь, перпендикулярну до осі провідника (рис. 19.1):  $B_{\perp} = B \sin \alpha$ , де  $\alpha$  — кут між вектором магнітної індукції і напрямком струму в провіднику.

З огляду на вищесказане можемо записати вираз для модуля сили Ампера — **закон Ампера**:

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

**Напрямок сили Ампера** визначається за **правилом лівої руки**:

Якщо ліву руку розташувати так, щоб складова  $B_{\perp}$  вектора індукції магнітного поля входила в долоню, а чотири витягнуті пальці вказували напрямком струму в провіднику, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець укаже напрямок сили Ампера (рис. 19.2).

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

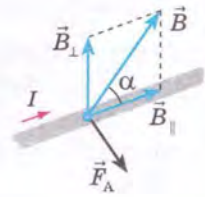
## ★ 2 Взаємодія струмів

Розглянемо докладніше взаємодію двох довгих паралельних прямолінійних провідників зі струмом —  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  (рис. 19.3).

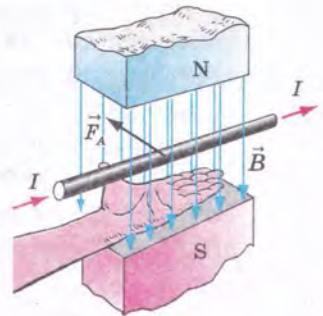
Навколо кожного провідника існує магнітне поле, магнітна індукція якого прямо пропорційна силі струму в цьому провіднику ( $B_1 \sim I_1$ ,  $B_2 \sim I_2$ ). Кожний провідник перебуває в магнітному полі іншого провідника.

Визначимо напрямки магнітних ліній полів, створених провідником  $\Pi_1$  (сині позначки на рисунку) і провідником  $\Pi_2$  (червоні позначки)\*, та напрямок сили Ампера, яка діє на кожен провідник.

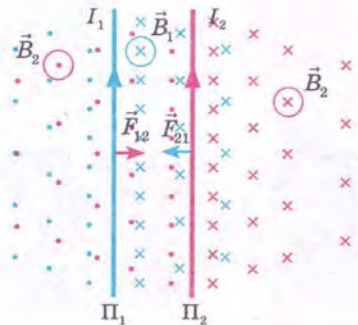
Відповідно до закону Ампера сила  $F_{21}$ , з якою магнітне поле провідника  $\Pi_1$  діє на провідник  $\Pi_2$ , прямо пропорційна силі струму  $I_2$  ( $F_{21} \sim I_2$ ) і магнітній індукції  $B_1$  ( $F_{21} \sim B_1$ ); магнітна індукція  $B_1$ , в свою чергу, прямо пропорційна силі струму  $I_1$  ( $B_1 \sim I_1$ ).



**Рис. 19.1.** Проекції вектора  $\vec{B}$  магнітної індукції:  $B_{\perp}$  — проекція на вісь, перпендикулярну до осі провідника;  $B_{\parallel}$  — проекція на вісь, паралельну осі провідника



**Рис. 19.2.** Визначення напрямку сили Ампера  $\vec{F}_A$  за правилом лівої руки



**Рис. 19.3.** Взаємодія двох провідників зі струмом:  $\vec{F}_{21}$  — сила, з якою магнітне поле  $\vec{B}_1$  провідника  $\Pi_1$  діє на провідник  $\Pi_2$ ;  $\vec{F}_{12}$  — сила, з якою магнітне поле  $\vec{B}_2$  провідника  $\Pi_2$  діє на провідник  $\Pi_1$

\* Нагадаємо: позначка «•» означає, що вектор магнітної індукції напрямлений до нас, а позначка «x» — від нас.



Таким чином, сила  $F_{21}$  прямо пропорційна як силі струму  $I_2$ , так і силі струму  $I_1$ , тобто прямо пропорційна добуткові сил струмів:  $F_{21} \sim I_1 I_2$ . Аналогічно  $F_{12} \sim I_1 I_2$ .

Остаточна формула для розрахунку сили взаємодії двох паралельних провідників довжиною  $l$  має вигляд:

$$F = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2 l}{2\pi R},$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  (генрі на метр) — магнітна стала;  $\mu$  — відносна магнітна проникність середовища;  $R$  — відстань між провідниками.★

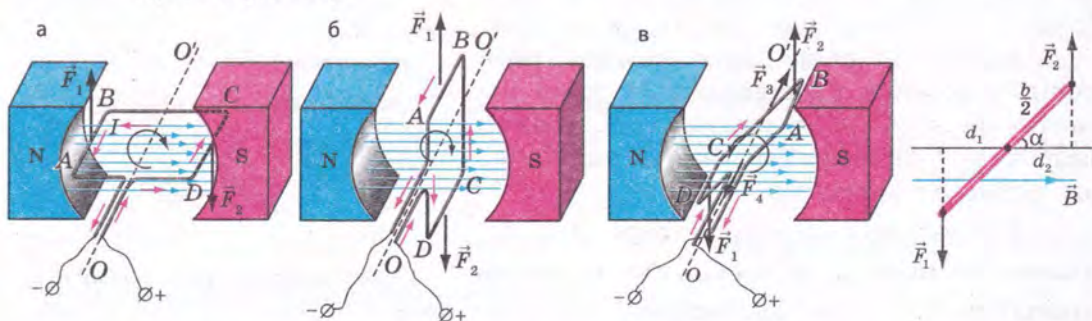
### 3 Як поводитиметься в магнітному полі рамка зі струмом

Візьмемо легку прямокутну рамку, що складається з одного витка дроту, і помістимо її в однорідне магнітне поле так, щоб вона могла легко обертатися навколо горизонтальної осі. Пропустимо по рамці електричний струм. Рамка повернеться (рис. 19.4, а) і, хитнувшись кілька разів, установиться так, як показано на рис. 19.4, б.

Скориставшись правилом лівої руки, визначимо напрямок сил Ампера, які діють на рамку в деякий момент часу (рис. 19.4, в). Бачимо, що сили Ампера  $\vec{F}_3$  і  $\vec{F}_4$ , які відповідно діють на сторони  $BC$  і  $AD$  рамки, напрямлені вздовж осі рамки, тому плечі цих сил, а отже, і їх моменти дорівнюють нулю\*. Сили Ампера  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ , які відповідно діють на сторони  $AB$  і  $CD$  рамки, створюють моменти сил, напрямлені на поворот рамки навколо осі  $OO'$ . Сумарний момент сил, який діє на рамку, дорівнює:

$$M = M_{AB} + M_{CD} = F_1 d_1 + F_2 d_2,$$

де  $d_1 = d_2 = \frac{b}{2} \cos \alpha$  — плечі сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  ( $b$  — довжина сторони  $BC$ ,  $\alpha$  — кут між напрямком вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  і площиною рамки).



**Рис. 19.4.** Дослідження дії магнітного поля на рамку зі струмом: а — сили Ампера ( $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ ) повертають рамку  $ABCD$  за ходом годинникової стрілки; б — у положенні рівноваги сили Ампера не повертають рамку, а розтягують; в — сили Ампера повертають рамку проти ходу годинникової стрілки

\* Нагадаємо, що *момент сили* є добутком сили на плече. *Плече сили* — відстань від осі обертання до лінії дії сили.

Відповідно до закону Ампера  $F_1 = F_2 = B I a$ , де  $a$  — довжина сторони  $AB$  (і  $CD$ ). Отже:

$$M = B I a \cdot \frac{b}{2} \cos \alpha + B I a \cdot \frac{b}{2} \cos \alpha = B I a b \cos \alpha = B I S \cos \alpha,$$

де  $S = ab$  — площа рамки.

**Момент  $M$  сил Ампера**, який діє на плоский замкнений контур, розташований в однорідному магнітному полі, дорівнює добутку модуля магнітної індукції  $B$  поля на силу струму  $I$  в контурі, на площу  $S$  контуру і на косинус кута  $\alpha$  між вектором магнітної індукції та площиною контуру:

$$M = B I S \cos \alpha$$

Зверніть увагу:

1) якщо рамка розташована паралельно лініям магнітної індукції ( $\alpha = 0$ ), то момент сил, який діє на рамку, найбільший ( $M_{\max}$ ):  $M_{\max} = B I S$  (див. рис. 19.4, а);

2) якщо рамка розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції ( $\alpha = 90^\circ$ ), то  $\cos \alpha = 0$  і момент сил, який діє на рамку, дорівнює нулю. Це — положення стійкої рівноваги рамки (див. рис. 19.4, б).

#### 4 Як працює двигун постійного струму

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

Щоб рамка не зупинялась у положенні рівноваги та оберталась в одному напрямку, застосовують *колектор* — пристрій, який автоматично змінює напрямок струму в рамці. На рис. 19.5 зображено модель, за допомогою якої можна ознайомитися з принципом дії колектора. Власне колектор являє собою два провідних півкільця (1), до кожного з яких притиснута провідна щітка (2). Щітки слугують для підведення напруги від джерела струму (3) до рамки (4), яка розташована між полюсами магніту (5) та може обертатися навколо осі (6). Одну зі щіток з'єднують із позитивним полюсом джерела струму, другу — з негативним.

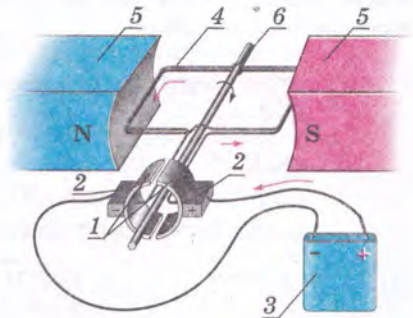


Рис. 19.5. Модель, яка демонструє принцип дії колектора

Після замикання кола рамка під дією сил Ампера починає повертатися за ходом годинникової стрілки. Півкільця колектора повертаються разом із рамкою, а щітки залишаються нерухомими, тому після проходження положення рівноваги до щіток будуть притиснуті вже інші півкільця. Напрямок струму в рамці зміниться на протилежний, а напрямок обертання рамки не зміниться (у цьому легко переконатися, визначивши напрямки сил Ампера).



Отже, щоб зробити електричний двигун, потрібно мати: 1) постійний магніт або електромагніт; 2) провідний контур; 3) джерело струму; 4) колектор. Як це здійснюється на практиці, продемонстровано на рис. 19.6, 19.7.

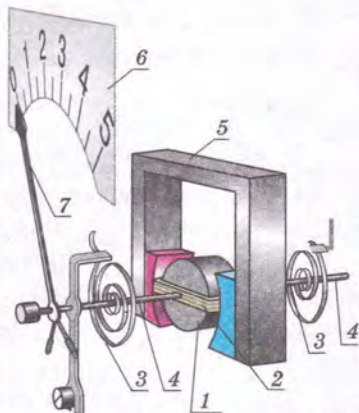
Орієнтуючу дію магнітного поля на рамку зі струмом використовують в *електровимірювальних приладах магнітоелектричної системи* — амперметрах і вольтметрах. Схему вимірювального механізму приладів цієї системи подано на рис. 19.8. ★



**Рис. 19.6.** Для підвищення потужності електродвигуна потрібно збільшити момент сили Ампера ( $M = BIS \cos \alpha$ ). Тому обмотку ротора виготовляють із великої кількості  $N$  витків дроту (кожний виток обмежує площу  $S_0$ ; загальна площа  $S = NS_0$ ); осерддю надають спеціальної форми та виготовляють із феромагнітного матеріалу, збільшуючи в такий спосіб магнітну індукцію поля, яке пронизує обмотку



**Рис. 19.7.** Для забезпечення рівномірного обертання ротора використовують кілька обмоток, які намотують на спільне осердя



**Рис. 19.8.** Схема вимірювального механізму приладів магнітоелектричної системи: 1 — нерухоме осердя; 2 — рамка; 3 — спіральні пружини; 4 — півосі; 5 — магніт; 6 — шкала; 7 — стрілка

## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача.** У вертикальному однорідному магнітному полі індукцією 0,50 Тл на двох тонких проводах горизонтально підвішений провідник завдовжки 20 см і масою 20 г. На який кут  $\beta$  від вертикалі відхилиться провідник, якщо сила струму в ньому дорівнює 2,0 А?

$\beta$  — ?

Дано:

$$B = 0,50 \text{ Тл}$$

$$l = 0,20 \text{ м}$$

$$m = 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$I = 2,0 \text{ А}$$

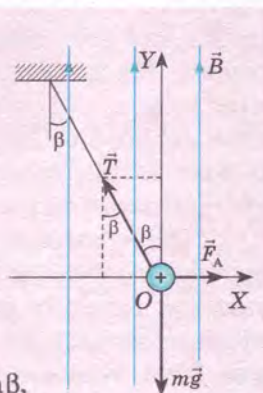
$$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

**Аналіз фізичної проблеми.** На провідник діють три сили: сила тяжіння, сила натягу проводів та сила Ампера, напрямок якої визначимо за правилом лівої руки (див. рисунок).

**Пошук математичної моделі.**

**Розв'язання.** Запишемо рівняння другого закону Ньютона у векторному вигляді та в проекціях на осі координат:  $\vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{T} = 0$ ;

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



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

Відповідно до закону Ампера  $F_A = BIl \sin \alpha$ , де  $\sin \alpha = 1$ , оскільки  $\alpha = 90^\circ$  (провідник горизонтальний, а вектор магнітної індукції вертикальний). Остаточно маємо:  $\operatorname{tg} \beta = \frac{Bil}{mg}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[\operatorname{tg} \beta] = \frac{\frac{\text{Тл} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}}{\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}} = 1; \{ \operatorname{tg} \beta \} = \frac{0,50 \cdot 2,0 \cdot 0,20}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 10} = \frac{0,20}{0,20} = 1,$$

$$\operatorname{tg} \beta = 1 \Rightarrow \beta = 45^\circ.$$

**Відповідь:** провідник відхилиться від вертикалі на кут  $\beta = 45^\circ$ .



### Підбиваємо підсумки

Силу, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом, називають силою Ампера. Модуль сили Ампера визначається за формулою  $F_A = BIl \sin \alpha$ , напрямок — за правилом лівої руки.

★ Два паралельні провідники зі струмом взаємодіють із силою, яка прямо пропорційна добуткові сил струмів і обернено пропорційна відстані між провідниками:  $F = \mu_0 \epsilon \frac{I_1 I_2 l}{2\pi R}$ . ★

На плоский замкнений контур зі струмом  $I$  та площею  $S$ , розташований в однорідному магнітному полі індукції  $B$ , діє обертальний момент сил:  $M = BIS \cos \alpha$  ( $\alpha$  — кут між вектором магнітної індукції та площиною контуру), завдяки якому рамка обертається.

На обертанні в магнітному полі рамки зі струмом ґрунтується дія електричних двигунів і приладів магнітоелектричної системи.



### Контрольні запитання

1. Дайте визначення сили Ампера. За якою формулою її розраховують? Як визначають її напрямок? ★
2. Доведіть, що сила взаємодії двох паралельних провідників зі струмом прямо пропорційна добуткові сил струмів.
3. Виведіть формулу для визначення моменту сил, що діють на рамку зі струмом з боку магнітного поля. За якого положення рамки момент сил дорівнює нулю? є максимальним? Обґрунтуйте свою відповідь.
4. Опишіть принцип дії електричного двигуна постійного струму. ★
5. Скориставшись рис. 19.8, опишіть будову та принцип дії вимірювальних приладів магнітоелектричної системи.



### Вправа № 17

1. По провіднику завдовжки 60 см тече струм силою 1,2 А. Визначте найбільше та найменше значення сили Ампера, яка діє на провідник, за умов різних його положень в однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює 1,5 Тл.
2. Визначте: напрямок сили Ампера (рис. 1); полюси магніту (рис. 2); напрямок струму в провіднику (рис. 3).

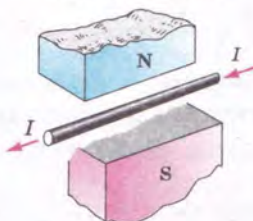


Рис. 1

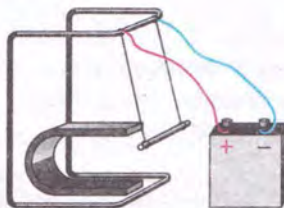


Рис. 2

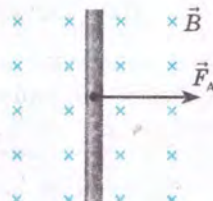


Рис. 3



3. Знайдіть момент сил, який діє на рамку площею  $20 \times 5,0$  (см), розташовану в однорідному магнітному полі індукцією  $0,6$  Тл, якщо сила струму в рамці дорівнює  $2,5$  А. Як ілюстрацію використайте рис. 19.4, а.
- 4\*. Горизонтальний провідник масою  $50$  г і довжиною  $20$  см може ковзати без тертя по двох вертикальних провідних стрижнях. Стрижні приєднані до джерела струму, ЕРС якого  $50$  В, а внутрішній опір становить  $2$  Ом. Перпендикулярно до площини руху прикладене постійне магнітне поле індукцією  $0,2$  Тл. Яким є опір провідника, якщо провідник перебуває в рівновазі? Опором стрижнів та з'єднувальних проводів знехтуйте.



*В. Г. Бар'яхтар*

#### ФІЗИКА ТА ТЕХНІКА В УКРАЇНІ

**Інститут магнетизму НАН і МОН молодьспорт України** (Київ)  
Інститут магнетизму був створений у 1995 р. як установа, що поєднує в собі науково-дослідний інститут і вищий навчальний заклад для розв'язання проблем у галузі магнетизму, екології, а також для підготовки наукових кадрів.

*Наукові напрямки*, в яких працює інститут: магнітні плівки, магнітна гідродинаміка та хімічні реакції, фазові перетворення та магнітострикція, математична та теоретична фізика. За всіма цими напрямками інститут посів провідне місце в Україні та світі.

Роботи вчених інституту відзначені преміями НАНУ, п'ятьма Державними преміями УРСР та України, міжнародними преміями.

Очолює Інститут магнетизму Герой України, відомий фахівець у галузі твердого тіла та екології, академік НАНУ *Віктор Григорович Бар'яхтар*.