

Змістовий модуль № 2. Електричне і магнітне поле

Тема 2.2 «Магнітне поле»

Лекція № 6

План лекції

1. Магнітне поле і його характеристики
2. Закон Біо – Савара - Лапласа
3. Закон Ампера
4. Теорема Гауса для магнітного поля

1. Магнітне поле і його характеристики

Подібно тому як у просторі, що оточує електричні заряди, виникає електростатичне поле, так і в просторі, що оточує струми й постійні магніти, виникає силове поле, назване магнітним. Наявність магнітного поля виявляється по силовій дії на внесені в нього провідники зі струмом або постійні магніти. Назву «магнітне поле» зв'язують із орієнтацією магнітної стрілки під дією поля, створюваного струмом [це явище вперше виявлене датським фізиком Х. Ерстедом (1777 —1851)].

Електричне поле діє як на нерухомі, так і на електричні заряди, що рухаються в ньому. Найважливіша особливість магнітного поля полягає в тому, що воно діє тільки на електричні заряди, що рухаються в ньому.

Таким чином, магнітним називається поле, що виникає навколо зарядів, що рухаються, провідників зі струмом і постійних магнітів, і що виявляється по силовій дії на внесені в нього заряди, що рухаються, провідники зі струмом або постійні магніти.

Силовой характеристикою магнітного поля є векторна величина - магнітна індукція \vec{B} . Одиниця магнітної індукції - тесла (Тл).

Через те що магнітне поле є силовим, то його, за аналогією з електричним, зображують за допомогою ліній магнітної індукції - ліній, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектору \vec{B} . Їхній напрямок задається правилом правого гвинта: голівка гвинта, що вгвинчується по напрямкові струму, обертається в напрямку ліній магнітної індукції.

Лінії магнітної індукції можна «виявити» за допомогою ошурок, що намагнічуються в досліджуванім полі й ведучих себе подібно маленьким магнітним стрілкам. На мал. 2.6, а показані лінії магнітної індукції поля кругового струму, на мал. 2.6, б - лінії магнітної індукції поля соленоїда (соленоїд - рівномірно намотана на циліндричну поверхню дротова спіраль, по якій тече електричний струм).

Лінії магнітної індукції завжди замкнені й охоплюють провідники зі струмом. Цим вони відрізняються від ліній напруженості електростатичного поля, які є розімкнутими (починаються на позитивних зарядах і кінчаються на негативних). Поле із замкненими лініями індукції називають вихровим.

На мал. 2.7 зображені лінії магнітної індукції смугового магніту; вони виходять із північного полюса й входять у південний. У середині смугових

магнітів є магнітне поле, аналогічне полю усередині соленоїда, і лінії магнітної індукції цього магнітного поля є продовженням ліній магнітної індукції поза магнітом. Таким чином, лінії магнітної індукції магнітного поля постійних магнітів є також замкненими.

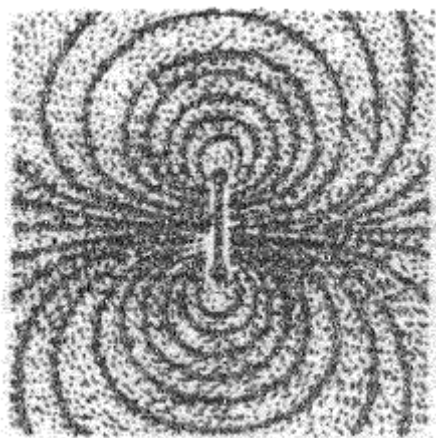


Рис. 2.6, а.
Лінії магнітної індукції поля
кругового струму

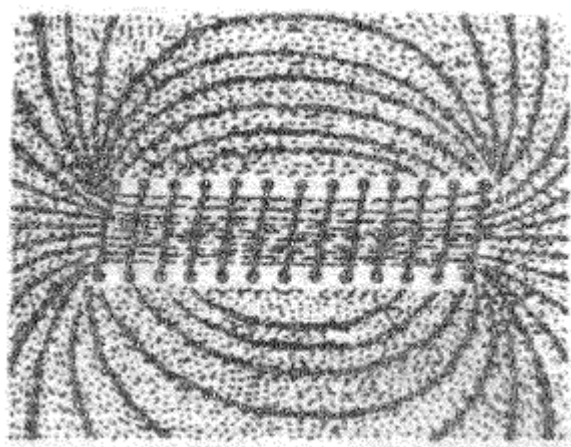


Рис. 2.6, б.
Лінії магнітної індукції поля
соленоїда

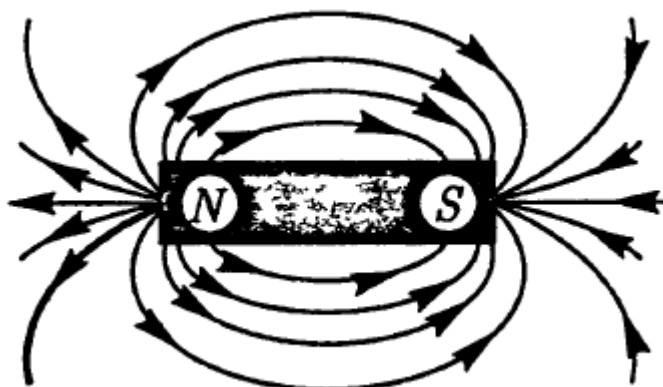


Рис. 2.7. Лінії магнітної індукції смугового магніту

Дотепер ми розглядали макроскопічні струми, що течуть у провідниках. Однак, згідно із припущенням французького фізика А. Ампера (1775 - 1836), у будь-якій тілі існують мікроскопічні струми, обумовлені рухом електронів в атомах і молекулах. Ці мікроскопічні молекулярні струми створюють своє магнітне поле й можуть повертатися в магнітних полях макрострумів. Наприклад, якщо поблизу якогось тіла помістити провідник зі струмом (макрострум), то під дією його магнітного поля мікроструми у всіх атомах певним чином орієнтуються, створюючи в тілі додаткове магнітне поле. Вектор магнітної індукції \vec{B} характеризує результуюче магнітне поле, створюване всіма макро- і мікрострумами, тобто при тому самому струмі й інших рівних умовах вектор \vec{B} у різних середовищах буде мати різні значення.

Магнітне поле макрострумів описується вектором напруженості \vec{H} . Для однорідного ізотропного середовища вектор магнітної індукції пов'язаний з вектором напруженості наступним співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \quad (2.13)$$

де μ_0 - магнітна постійна, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2}$;

μ - безрозмірна величина - магнітна проникність середовища, що показує, у скільки раз магнітне поле макрострумів H підсилюється за рахунок поля мікрострумів середовища.

Одиниця напруженості магнітного поля - ампер на метр (А/м): 1 А/м - напруженість такого поля, магнітна індукція якого у вакуумі рівна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл.

2. Закон Біо - Савара - Лапласа

Магнітне поле постійних струмів різної форми вивчалось французькими вченими Ж. Біо і Ф.Саваром на початку ХІХ ст. Результати цих дослідів були узагальнені видатним французьким математиком і фізиком П. Лапласом.

Закон Біо - Савара - Лапласа для провідника зі струмом I , елемент $d\vec{l}$ якого створює в деякій точці A (мал. 3) індукцію поля $d\vec{B}$, записується у вигляді

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}, \quad (2.14)$$

де $d\vec{l}$ - вектор, по модулю дорівнює довжині dl елемента провідника й співпадаючий по напрямкові зі струмом; \vec{r} - радіус-вектор, проведений з елемента dl провідника в точку A поля; r - модуль радіуса-вектору \vec{r} .

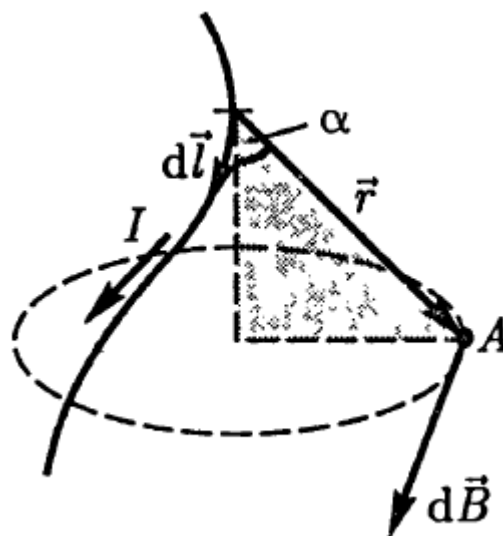


Рис. 2.8. Магнітна індукція, створювана елементом провідника зі струмом

Напрямок $d\vec{B}$ перпендикулярний $d\vec{l}$ і \vec{r} , тобто перпендикулярний площини, у якій вони лежать, і збігається з дотичною до лінії магнітної

індукції. Цей напрямок може бути заданий за правилом знаходження ліній магнітної індукції (правила правого гвинта): напрямок обертання голівки гвинта дає напрямок $d\vec{B}$, якщо поступальний рух гвинта відповідає напрямку струму в елементі.

Модуль вектору $d\vec{B}$ визначається вираженням

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}, \quad (2.15)$$

де α - кут між векторами $d\vec{l}$ й \vec{r} .

Для магнітного поля, як і для електричного, слушний принцип суперпозиції: вектор магнітної індукції результуючого поля, створюваного декількома струмами або зарядами, що рухаються, дорівнює векторній сумі магнітних індукцій, що складаються полів, створюваних кожним струмом або, що рухається зарядом окремо:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \quad (2.16)$$

Розрахунки характеристик магнітного поля по наведених формулах у загальному випадку складний. Однак якщо розподіл струму має певну симетрію, то застосування закону Біо - Савара - Лапласа разом із принципом суперпозиції дозволяє просто розрахувати конкретні поля. Розглянемо два приклади:

1) магнітне поле прямого струму - струму, що тече по тонкому прямому проволу нескінченної довжини.

У довільній точці А, віддаленій від осі провідника на відстань R , магнітна індукція поля прямого струму силою I

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{R}. \quad (2.17)$$

2) магнітне поле в центрі кругового провідника зі струмом.

Магнітна індукція поля в центрі кругового провідника зі струмом (R - радіус кола)

$$B = \int dB = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (2.18)$$

3. Закон Ампера

Узагальнюючи результати дослідження дії магнітного поля на різні провідники зі струмом, А. Ампер установив, що сила $d\vec{F}$, з якою магнітне поле діє на елемент провідника $d\vec{l}$ зі струмом, що перебуває в магнітнім полі, рівна

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}], \quad (2.19)$$

де $d\vec{l}$ - вектор, по модулю рівний dl і співпадаючий по напрямкові зі струмом, \vec{B} - вектор магнітної індукції.

Напрямок вектору $d\vec{F}$ може бути знайдений, згідно (2.19), за загальними правилами векторного добутку, звідки випливає правило лівої руки (рис. 2.9): якщо долоня лівої руки розташувати так, щоб у неї входив вектор \vec{B} , а чотири витягнуті пальці - по напрямкові струму в провіднику, те відігнутий великий палець покаже напрямок сили, що діє на струм.

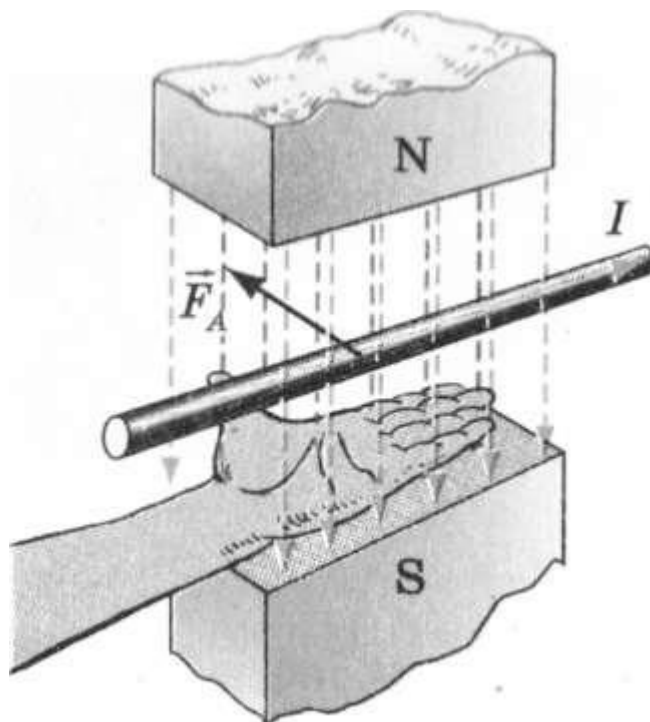


Рис. 2.9. Правило лівої руки

Модуль сили Ампера обчислюється по формулі

$$dF = IBdl \sin \alpha, \quad (2.20)$$

де α - кут між векторами $d\vec{l}$ й \vec{B} .

Сила, що діє з боку однорідного магнітного поля на провідник з активною довжиною l відповідно дорівнює

$$F = IBl \sin \alpha.$$

Закон Ампера застосовується для визначення сили взаємодії двох струмів. Розглянемо два нескінченні прямолінійні паралельні струми I_1 й I_2 (на мал. 6 струми спрямовані перпендикулярно площині креслення до нас), відстань між якими дорівнює R . Кожний із провідників створює магнітне поле, яке діє за законом Ампера на інший провідник зі струмом.

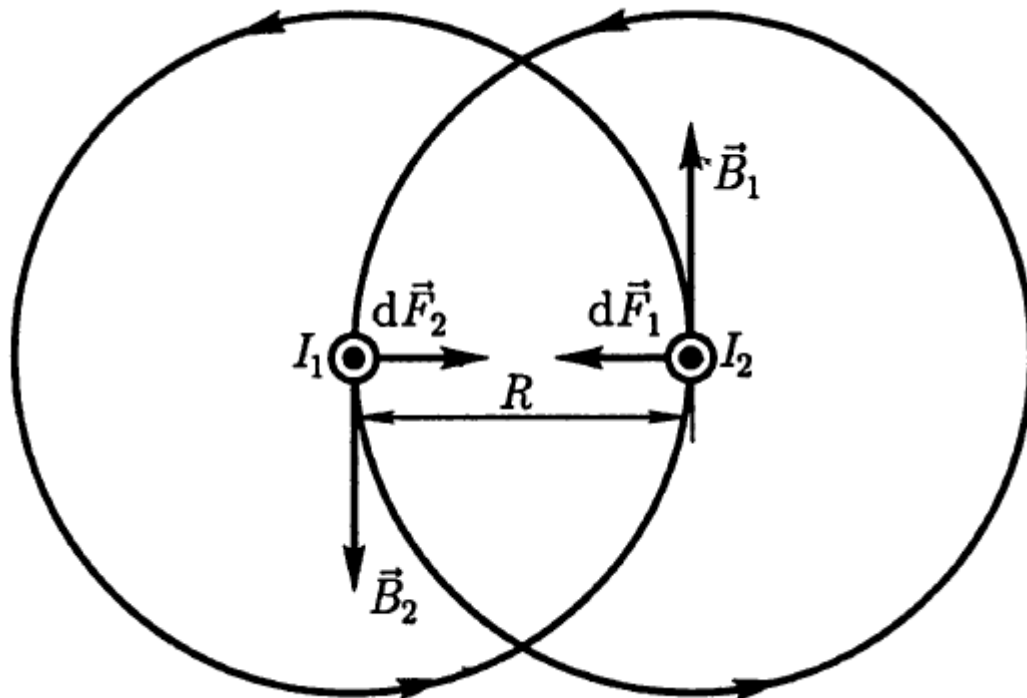


Рис. 2.10. Взаємодія паралельних струмів

Струм створює навколо себе магнітне поле, лінії індукції якого являють собою концентричні окружності. Напрямок вектору \vec{B}_1 визначається правилом правого гвинта. Напрямок сили $d\vec{F}_1$, з якою поле \vec{B}_1 діє на ділянку dl другого струму, визначається за правилом лівої руки й зазначений на малюнку.

Міркуючи аналогічно, можна показати, що сила $d\vec{F}_2$, з якою поле струму I_2 діє на ділянку dl першого провідника зі струмом I_1 , спрямована в протилежну сторону й по модулю рівна dF_1 .

Т. ч. два паралельні струми однакового напрямку притягаються один до одного.

Якщо струми мають протилежні напрямки, то, використовуючи правило лівої руки, можна показати, що між ними діє сила відштовхування.

Модуль цієї сили визначається формулою

$$dF = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{R} dl. \quad (2.21)$$

4. Теорема Гауса для поля \vec{B}

Потоком вектору магнітної індукції (магнітним потоком) через майданчик ds називається скалярна фізична величина, рівна

$$d\Phi_B = \vec{B}d\vec{S} = B_n dS, \quad (2.22)$$

де $B_n = B \cos \alpha$ - проекція вектору \vec{B} на напрямок нормалі до майданчика dS (α - кут між векторами \vec{n} й \vec{B}); $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$ - вектор, модуль якого рівний ds , а напрямок його збігається з напрямком нормалі \vec{n} до майданчика.

Потік вектору магнітної індукції Φ_B через довільну поверхню S рівний

$$\Phi_B = \int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S B_n dS \quad (2.23)$$

Для однорідного поля й плоскої поверхні, розташованої перпендикулярно вектору \vec{B} , $B_n = B = \text{const}$ і

$$\Phi_B = BS. \quad (2.24)$$

Із цієї формули визначається одиниця магнітного потоку вебер (Вб): 1 Вб - магнітний потік, що проходить крізь плоску поверхню площею 1 м^2 , розташовану перпендикулярно однорідному магнітному полю, індукція якого рівна 1 Тл.

Теорема Гауса для поля \vec{B} : потік вектору магнітної індукції крізь будь-яку замкнену поверхню дорівнює нулю:

$$\int_S \vec{B}d\vec{S} = \int_S B_n dS = 0 \quad (2.25)$$

Ця теорема відбиває факт відсутності магнітних зарядів, внаслідок чого лінії магнітної індукції не мають ні початку, ні кінця і є замкненими.

Контрольні питання

1. Як, користуючись магнітною стрілкою, можна визначити знаки полюсів джерел постійного струму?
2. Що називають індукцією магнітного поля? Який напрямок вектору \vec{B} ? Намалюйте й покажіть, як орієнтовані лінії магнітної індукції поля прямого струму?
3. Записавши закон Біо - Савара - Лапласа, поясніть його фізичний зміст.
4. Розрахуйте, застосовуючи закон Біо - Савара - Лапласа, магнітне поле: 1) прямого струму; 2) у центрі кругового провідника зі струмом.
5. Знайдіть вираження для сили взаємодії двох нескінченних прямолінійних

однакових струмів протилежного напрямку. Накресліть малюнок із вказівкою сил. Назвіть одиниці магнітної індукції й напруженості магнітного поля. Дайте їм визначення.

6. Визначите числове значення магнітної постійної.

7. Що називають потоком вектору магнітної індукції? Запишіть теорему Гауса для магнітного поля, поясніть її фізичний зміст.

8. Яка фізична величина вимірюється у веберах? Дайте визначення веберу.

Список літератури

1. Трофимова Т.И. Физика: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Т.И.Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 84-88, 92).

2. Фирсов А.В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / А.В.Фирсов; под ред. Т.И.Трофимовой. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 131-136).

3. Трофимова Т.И. Курс физики. Учеб. пособие для вузов / Т.И.Трофимова. – Изд. 9-е, перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с. (§§ 109-112, 120).