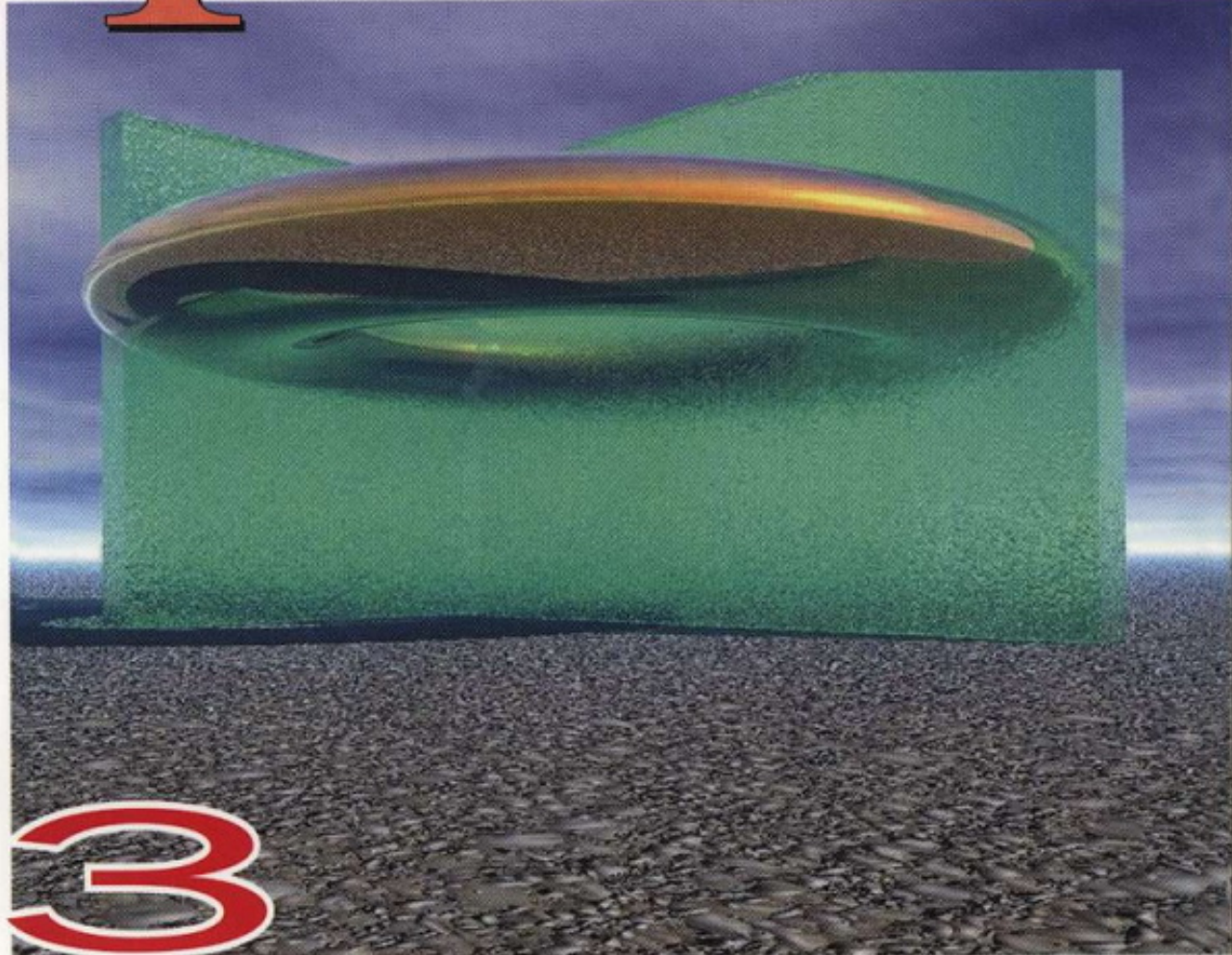




МОДУЛЬНЕ НАВЧАННЯ

Фізика



3

МОДУЛЬ

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$$



Фізика

Модуль **З**

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

*За загальною редакцією професора
А. П. Поліщука*

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
вищих технічних навчальних закладів*

**Київ
Книжкове видавництво
Національного авіаційного університету
2005**

УДК 537.1(075.8)
ББК В 33я7
Ф 503

Тиражувати без офіційного дозволу НАУ забороняється

Автори:

**Б. Ф. Лахін, С. Л. Максимов,
А. П. Поліщук, П. І. Чернега**

Рецензенти:

В. В. Ільченко, д-р фіз.-мат. наук, проф.
(Національний університет ім. Тараса Шевченка)

Г. С. Тимчик, д-р техн. наук, проф.
(Національний технічний університет України «КПІ»)

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(Лист № 14/18.2-1757 від 19.07.2005)*

*Видання друкується за рішенням Вченої ради НАУ
Протокол № 3 від 23.03.2005*

Фізика. Модуль 3. Електрика і магнетизм: Навч. посіб. /
Ф 503 **Б. Ф. Лахін, С. Л. Максимов, А. П. Поліщук, П. І. Чернега;**
За заг. ред. проф. А. П. Поліщука. — К.: НАУ, 2005. —
336 с.

ISBN 966–598–241–9

ISBN 966–598–244–3 (модуль 3)

Пропонований посібник є одним із найперших видань нового типу, підготовка яких стала необхідною у зв'язку з приєднанням України до Болонського процесу та переходом до кредитно-модульної системи навчання. Він відкриває заочатковану та апробовану на кафедрі загальної фізики НАУ серію «Модульне навчання. Фізика», що складається із семи модулів.

Модуль 3 «Електрика і магнетизм» систематизовано подає програмний матеріал з основних положень і законів електрики і магнетизму. Навчальні елементи цього модуля містять теоретичне ядро, задачі для аудиторної та індивідуальної роботи, а також лабораторний практикум. Питання для самоперевірки й ключові слова допоможуть студентові в підготовці до рейтингового контролю.

Для студентів усіх спеціальностей та всіх форм навчання технічних вузів.

ББК В 33я7

ISBN 966–598–241–9
ISBN 966–598–244–3 (модуль 3)

© Б. Ф. Лахін, С. Л. Максимов,
А. П. Поліщук, П. І. Чернега, 2005
© НАУ, 2005

Навчальне видання

ЛАХІН Борис Федорович
МАКСИМОВ Сергій Леонідович
ПОЛІЩУК Аркадій Петрович
ЧЕРНЕГА Петро Іванович

Фізика

Модуль **З**

ЕЛЕКТРИКА | МАГНЕТИЗМ

Навчальний посібник

*За загальною редакцією
професора **А. П. Поліщука***

Художник обкладинки *Т. Зябліцева*
Коректор *П. Тютюнник*
Технічне редагування *О. Іваненко*
Верстка *Т. Мальчевської, Л. Богданової*

Навчальний елемент 1

ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Вивчивши НЕ-1, студент повинен знати основні положення і поняття електростатики, вміти формулювати, записувати й аналізувати закони електростатики, теорему Гаусса для електричного поля, а також навчитись застосовувати теоретичні знання для розв'язування практичних задач.

1.1. Електричні заряди та їх взаємодія

Здатність багатьох тіл електризуватися — набувати електричного заряду — відома людству дуже давно. Відомо також, що існує два види електричних зарядів, умовно названих позитивними і негативними. Заряди одного знака відштовхуються, протилежного — притягуються.

Електричний заряд — важлива властивість багатьох елементарних частинок. Усі елементарні частинки можуть мати електричний заряд, який має одне з трьох значень:

$$q = e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

$$q = 0;$$

$$q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Заряд e дістав назву *елементарного*. Наприклад, елементарна частинка електрон має негативний елементарний заряд, протон — позитивний, нейтрон — нульовий.

Будь-який заряд макроскопічного тіла є сумою елементарних зарядів, тому кажуть, що електричний заряд квантований, тобто може змінюватись тільки порціями, кратними елементарному заряду. Але оскільки елементарний заряд дуже маленький, досить часто вважають, що заряд тіла змінюється неперервно.

Абсолютна величина електричного заряду не залежить від інерціальної системи, в якій він вимірюється. Тому вважають, що **елек-**

тричний заряд релятивістськи інваріантний, тобто його абсолютна величина не залежить від того, рухається цей заряд чи перебуває у стані спокою.

Електричні заряди можуть лише переміщуватися в просторі, але не можуть за звичайних умов виникати і зникати. Справді, здається, наприклад, що заряди виникають під час електризації тіл за рахунок тертя. Однак цей процес пов'язаний лише з перерозподілом у просторі елементарних зарядів (електронів і іонів), які раніше існували в цих тілах, але розміщувалися в них так, що заряди протилежних знаків взаємно компенсувалися. Проте збереження конкретної кількості елементарних зарядів має місце лише в межах звичайних фізичних і хімічних явищ. У фізиці атомних ядер і космічних променів *кількість* зарядів може не зберігатися, наприклад при утворенні γ -квантом пари зарядів — електрон ($-e$) і позитрон ($+e$). Однак при цьому нейтральна частинка — γ -квант перетворюється на пару частинок, сумарний заряд яких також дорівнює нулю, тобто залишається незмінною алгебраїчна сума зарядів.

Величезний експериментальний матеріал свідчить, що яким би не був процес взаємоперетворення частинок, сумарний заряд зберігається. Інакше кажучи, у природі має місце закон збереження електричного заряду: **в електрично ізольованій системі алгебраїчна сума електричних зарядів залишається незмінною.** Електрично ізольованою називають систему, через межі якої не можуть проходити заряджені частинки.

Незважаючи на відносну самостійність, заряд уособлює одну із властивостей матерії. З'ясування природи цього зв'язку — одна з найскладніших проблем сучасної фізики. Поки що не зрозуміло, чому існує тільки елементарний заряд і чому він за абсолютною величиною дорівнює $|e|=1,6 \cdot 10^{-19}$ Её, а не якомусь іншому значенню.

Для зручності опису електричних явищ використовують ідеалізоване поняття точкового заряду. **Точковим зарядом називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями до інших заряджених тіл.**

Взаємодія точкових електричних зарядів визначається законом Кулона, який було встановлено експериментально в 1785 році.

Два нерухомі точкові електричні заряди у вакуумі притягуються або відштовхуються із силою, пропорційною до абсолютної величини кожного заряду і обернено пропорційною до квадрата відстані між ними.

У системі СІ, з урахуванням напряму дії сил, закон Кулона визначають такими формулами (рис. 1.1 відповідає випадку однопольових зарядів):

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12}; \quad (1.1)$$

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{21}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{21}}{r_{21}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_{21}^2} \vec{e}_{21}, \quad (1.2)$$

де q_1, q_2 — величини зарядів, що взаємодіють; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — електрична стала в системі СІ; $\frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} = \vec{e}_{12} \left(\frac{\vec{r}_{21}}{r_{21}} = \vec{e}_{21} \right)$ — одиничний вектор (орт), модуль якого дорівнює одиниці $|\vec{e}_{12}| = |\vec{e}_{21}| = e_{12} = e_{21} = 1$.

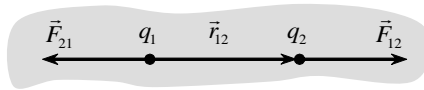


Рис. 1.1

Сила \vec{F}_{12} — це сила, що діє з боку першого заряду на другий, а \vec{F}_{21} — сила, що діє з боку другого заряду на перший. Оскільки $\vec{r}_{12} = -\vec{r}_{21}$ ($\vec{e}_{12} = -\vec{e}_{21}$), то $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Однаковий для обох зарядів модуль сили взаємодії можна подати у вигляді

$$F = |\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r_{12}^2}. \quad (1.3)$$

Закон Кулона належить до головних експериментальних фактів, на яких будується вчення про електрику. Перевірка його правильності і встановлення меж застосування — важливі завдання, на розв'язання яких було спрямовано значні зусилля експериментаторів. На сьогодні встановлено, що закон Кулона виконується з великою точністю на відстанях від 10^{-17} до 10^7 м.

Досліди показують, що під час взаємодії електрично заряджених тіл виконується принцип суперпозиції: **сила взаємодії двох зарядів не залежить від наявності інших зарядів.**

Якщо наявні інші заряди (рис. 1.2), результуюча сила, що діє на заряд q_0 , дорівнює векторній сумі сил, з якими кожний заряд діє окремо на q_0 :

$$\vec{F} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \dots + \vec{F}_{n0}. \quad (1.4)$$

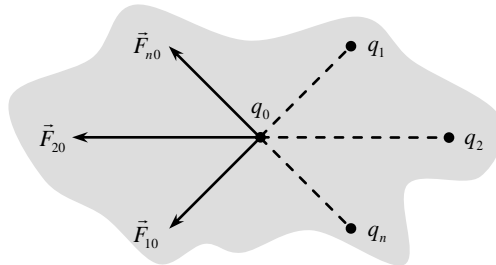


Рис. 1.2

Принцип суперпозиції дає змогу визначити силу взаємодії не тільки точкових зарядів, а й будь-яких заряджених тіл. Для цього заряджене тіло слід розбити на достатньо малі частини, які можна вважати точковими зарядами, визначити їхню взаємодію і скористатися принципом суперпозиції.

1.2. Електричне поле у вакуумі та його характеристики

1.2.1. Напруженість, зміщення. Силві лінії поля

Електричні заряди взаємодіють на відстані. Тому постає питання: як відбувається ця взаємодія? У середині XIX століття М. Фарадей ввів поняття про електричне поле як середовище, за допомогою якого відбувається взаємодія між електричними зарядами. Згідно з теорією Фарадея, кожний нерухомий заряд створює в навколишньому просторі електричне поле, що діє на інший заряд, і навпаки. Поле, що створюється нерухомими зарядами, називають *електростатичним*. Електростатичне поле — це частинний випадок електромагніт-

ного поля, за допомогою якого відбувається взаємодія між будь-якими зарядами.

Таким чином, електричне поле — це деяка властивість простору, що виникає разом з появою заряду і виявляється як дія із силою \vec{F} на інший електричний заряд, внесений у будь-яку точку даного простору. Кількісною (силовою) характеристикою цієї дії є напруженість електричного поля \vec{E} .

Напруженість електричного поля в даній його точці дорівнює відношенню сили \vec{F} , що діє з боку поля на пробний заряд q_0 , внесений у цю точку поля, до абсолютної величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.5)$$

(пробним q_0 називають позитивний точковий заряд, що не спотворює поле, яке досліджується).

У системі СІ напруженість електричного поля вимірюється у вольтгах на метр. Вочевидь, що $1 \frac{\hat{A}}{\hat{I}} = 1 \frac{\hat{A} \cdot \hat{d}}{\hat{A} \cdot \hat{I}} = 1 \frac{\hat{I} \cdot \hat{I}}{\hat{A} \cdot \hat{I} \cdot \hat{n}} = 1 \frac{\hat{I}}{\hat{E} \hat{e}}$, тобто за напруженості поля в $1 \frac{\hat{A}}{\hat{I}}$ на заряд в 1 Кл діє сила в 1 Н.

Якщо поле створюється точковим зарядом q , то

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q_0}{r^2} \vec{e}, \quad (1.6)$$

а напруженість поля

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \vec{e}. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) визначає напруженість електричного поля, що створюється точковим зарядом q , у точці, віддаленій на відстань r від нього. З формули (1.7) випливає, що напруженість поля в даній точці не залежить від наявності в ній пробного заряду. Напрямок вектора \vec{E} збігається з напрямом сили, що діє на позитивний пробний заряд з боку позитивного або негативного заряду (рис. 1.3).



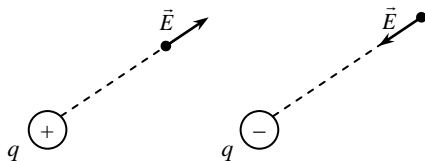


Рис. 1.3

Для електричних полів виконується принцип суперпозиції. Цей принцип впливає з виразу (1.5): **напруженість поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, які створював би кожний заряд окремо:**

$$\vec{E} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{q_0} = \frac{\sum_{i=1}^n q_0 \vec{E}_i}{q_0} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (1.8)$$

Для графічного зображення електричного поля використовують лінії напруженості, або силові лінії. *Лініями напруженості (силовими лініями)* електричного поля називають криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора \vec{E} (рис. 1.4).

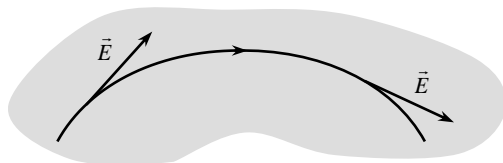


Рис. 1.4

Лінії напруженості починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних зарядах. У разі ізольованих точкових зарядів лінії напруженості являють собою сукупність радіальних прямих, напрямлених від заряду, якщо він позитивний, і до заряду, якщо він негативний (рис. 1.5). Ось чому вважають, що позитивні заряди є джерелом вектора \vec{E} , а негативні — стоком. Силові лінії не перетинаються, оскільки в кожній точці поля вектор \vec{E} має єдине значення.



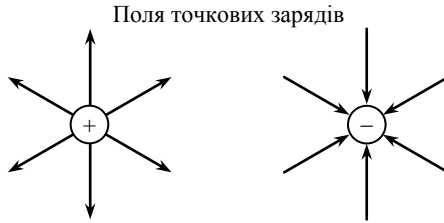


Рис. 1.5

Наголосимо, що силові лінії не мають особливого фізичного змісту. Вони є нашим уявленням, за допомогою якого наочно можна описати електричне поле. Зрозуміло, що через будь-яку точку поля можна провести силову лінію. Отже, виходить, що силових ліній у просторі нескінченна множина.

Не потрібно також ототожнювати силові лінії з траєкторіями руху зарядів у полі (траєкторії — це лінії, дотичні до яких указують напрям швидкості). Причина в тому, що за дотичною до траєкторії напрямлений вектор швидкості, а напрям швидкості далеко не завжди збігається з напрямом сили (з останнім завжди збігається напрям прискорення). Оскільки абсолютна величина і напрям напруженості електростатичного поля $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ (1.5) визначаються силою

\vec{F} , то в загальному випадку вектор швидкості не збігається за напрямом з вектором напруженості \vec{E} .

Реально електрично заряджені частинки мають інертну масу і тому майже ніколи не рухаються вздовж силових ліній, за винятком тих випадків, коли останні є прямими лініями і початкові швидкості частинок збігаються з ними за напрямом або дорівнюють нулю, чи коли рух частинок відбувається в дуже в'язкому середовищі.

Щоб за допомогою силових ліній відобразити не тільки напрям, а й абсолютну величину напруженості поля, домовились на графіках поля проводити силові лінії з певною густиною. **Густина ліній вибирається таким чином, щоб кількість ліній, які проходять через одиничну площину, зорієнтовану перпендикулярно до цих ліній, була кратною модулю вектора \vec{E} .** Надалі для спрощення вважатимемо, що густина ліній просто дорівнює модулю вектора \vec{E} . Тоді за картиною ліній напруженості можна судити про напрям і величину вектора \vec{E} в різних точках простору. На рис. 1.6 зображено

силові лінії для однорідного і неоднорідного полів. Для останнього напруженість спадає зліва направо.

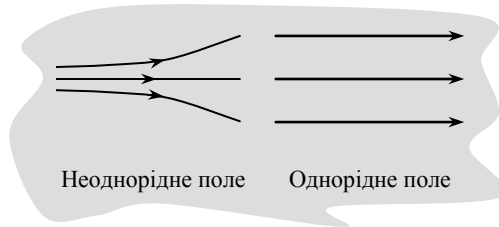


Рис. 1.6

На рис. 1.5 як приклад наведено картину силових ліній точкових зарядів. Густота силових ліній на будь-якій відстані r від зарядів дорівнює відношенню повної кількості силових ліній N , що вийшли (увійшли) із заряду, до поверхні сфери радіуса r , тобто $\rho_{\text{ліній}} = \frac{N}{4\pi r^2}$. Вочевидь, що густота спадає обернено пропорційно до квадрата відстані від заряду, тобто так, як і напруженість точкового заряду \vec{E} (див. формулу (1.7)).

Доведемо, що силові лінії електростатичного поля починаються і закінчуються тільки на зарядах або прямують у нескінченність чи з нескінченності. Доведення проведемо для точкового заряду, а згідно з принципом суперпозиції здобутий результат буде правильним для електричних зарядів довільної конфігурації.

Густота силових ліній поля точкового заряду чисельно дорівнює модулю напруженості електричного поля

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{r^2}. \quad (1.9)$$

Загальна кількість ліній, які перетинають сферичну поверхню довільного радіуса r , дорівнюватиме добутку густоти ліній на площу поверхні сфери:

$$N_E(=)E \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{|q|}{\epsilon_0} \quad (1.10)$$

(знак рівності в дужках означає, що йдеться лише про чисельну рівність).

Здобутий результат означає, що кількість ліній на будь-якій відстані від заряду буде однаковою. Звідси випливає, що силові лінії електростатичного поля ніде, крім зарядів, не починаються і не закінчуються. Для ізолюваних точкових зарядів вони починаються на заряді $+q$ і прямують у нескінченність або, прямуючи з нескінченності, закінчуються на заряді $-q$ (див. рис. 1.5).

Іноді викликає подив, що кількість силових ліній, які перетинають поверхню відповідно до виразу (1.10), може подаватися не цілим числом. Не потрібно цим суттєво перейматися, оскільки силові лінії являють собою виключно умовний образ і ніякого фізичного змісту вони не мають.

1.2.2. Робота в електричному полі. Потенціальний характер електростатичного поля

Оскільки в електростатичному полі на заряди діють сили, то під час переміщення зарядів ці сили поля виконують роботу.

Визначимо роботу з переміщення заряду q_0 в центральному електростатичному полі, утвореному зарядом q , що міститься в точці O (рис. 1.7). Нехай заряд q_0 рухається за траєкторією від точки 1 до точки 2. У певний момент часу t він потрапляє в точку A , віддалену від O на відстань $AO = r$. Через деякий час dt , пройшовши шлях $AC = dl$, заряд потрапляє в точку C , віддалену від O на відстань $OC = r + dr$, де dr — приріст радіуса.

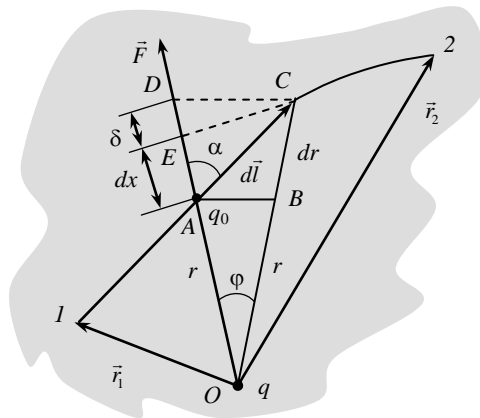


Рис. 1.7

Виберемо dr достатньо малим, щоб шлях dl можна було вважати прямою лінією, а силу \vec{F} — сталою. Тоді робота dA з переміщення заряду q_0 від A до C дорівнюватиме:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{l} = F dl \cos \alpha = F dx,$$

де F — кулонівська сила, що діє між зарядами; $dx = dl \cos \alpha$ — проекція dl на пряму OA ; α — кут між напрямом дії сили і напрямом переміщення; CE — перпендикуляр із точки C на пряму AO .

Відкладемо на радіусі OC відстань $OA = OB$, а на радіусі OA — відстань $OC = OD$ й опустимо на OD перпендикуляр з точки C . Тоді

$$dx = dl \cos \alpha = AD - ED = dr - \delta.$$

Визначимо $\delta = ED$ через r , dr і кут φ між радіусами OA та OC . Із рівнобедреного трикутника ODC маємо:

$$DC = 2OC \sin \frac{\varphi}{2} = 2(r + dr) \sin \frac{\varphi}{2},$$

а з прямокутного трикутника DCE дістаємо:

$$ED = \delta = DC \cos(\angle EDC) = 2(r + dr) \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) = 2(r + dr) \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Тепер:

$$dA = F dx = F(dr - \delta) = F \left[dr - 2(r + dr) \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right] = F dr - F 2(r + dr) \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

За елементарно малих φ другий доданок прямує до нуля. Тому для $dr \rightarrow 0$ і $\varphi \rightarrow 0$, $dA \rightarrow F dr$, де $F = q q_0 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$, тобто

$$dA = \frac{q q_0 dr}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Повна робота з переміщення заряду q_0 із точки 1 у точку 2 така:

$$A = \int_1^2 dA = \int_{r_1}^{r_2} \frac{q q_0 dr}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q q_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (1.11)$$

ЗМІСТ

Вступ	3
Навчальний елемент 0	
СТИСЛІ ФІЗИЧНІ ВІДОМОСТІ.	8
Навчальний елемент 1	
ЕЛЕКТРОСТАТИКА (<i>А. П. Поліщук, П. І. Чернега</i>)	14
1.1. Електричні заряди та їх взаємодія	14
1.2. Електричне поле у вакуумі та його характеристики	17
1.2.1. Напруженість, зміщення. Силкові лінії поля	17
1.2.2. Робота в електричному полі. Потенціальний характер електростатичного поля	22
1.2.3. Потенціал поля і його зв'язок із напруженістю	25
1.3. Електричний диполь	30
1.4. Теорема Гаусса	34
1.4.1. Потік вектора напруженості електричного поля	34
1.4.2. Теорема Гаусса	35
1.4.3. Теорема Ірншоу	42
1.4.4. Приклади розрахунків полів за допомогою теореми Гаусса.	44
1.5. Діелектрики в електричному полі	49
1.5.1. Поляризація діелектриків	49
1.5.2. Вектор поляризації	52
1.5.3. Поле всередині діелектрика	54
1.5.4. Поверхневі та об'ємні зв'язані заряди	55
1.5.5. Вектор електричного зміщення. Теорема Гаусса для електричного поля в середовищі	63
1.5.6. Умови на межі поділу двох середовищ	65
1.5.7. Сили, що діють на заряд у діелектрику.	69
1.5.8. Сегнетоелектрики і п'єзоелектрики	71
1.6. Провідники в електричному полі	73
1.6.1. Рівновага зарядів у провіднику	73
1.6.2. Напруженість електростатичного поля біля поверхні провідника	77

1.7. Електроємність, конденсатори, енергія електричного поля	80
1.7.1. Електроємність	80
1.7.2. Розрахунок електроємності конденсаторів	82
1.7.3. Енергія електростатичного поля	85
1.8. Запитання для самоконтролю	89
1.9. Задачі (Б. Ф. Лахін)	92
1.9.1. Приклади розв'язування задач	92
1.9.2. Аудиторні задачі	102

Навчальний елемент 2

ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ (А. П. Поліщук, П. І. Чернега)	104
2.1. Основні характеристики постійного електричного струму	104
2.1.1. Сила струму. Густина струму	104
2.1.2. Рівняння неперервності	107
2.2. Протікання струму в електричному колі	108
2.2.1. Сторонні сили. Електрорушійна сила	108
2.2.2. Механізм здійснення постійного струму. Стационарні поверхневі заряди	112
2.2.3. Закон Ома для однорідної ділянки електричного кола	115
2.2.4. Закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола	118
2.2.5. Розгалужені електричні кола. Правила Кірхгофа	121
2.2.6. Потужність струму. Закон Джоуля—Ленца	123
2.2.7. Коефіцієнт корисної дії джерела ЕРС	125
2.3. Електричний струм у газах	126
2.3.1. Іонізація та рекомбінація молекул	126
2.3.2. Несамостійний розряд в газі. Рівняння іонного балансу	127
2.3.3. Вольтамперна характеристика розряду в газах	129
2.3.4. Самостійний розряд	131
2.3.5. Жевріючий розряд	134
2.3.6. Дуговий розряд	136
2.3.7. Іскровий розряд	137
2.3.8. Коронний розряд	138
2.3.9. Плазма	140
2.4. Запитання для самоконтролю	141
2.5. Задачі (Б. Ф. Лахін)	142
2.5.1. Приклади розв'язування задач	142
2.5.2. Аудиторні задачі	150

Навчальний елемент 3

МАГНІТНЕ ПОЛЕ У ВАКУУМІ (А. П. Поліщук, П. І. Чернега)	152
3.1. Взаємодія струмів. Магнітне поле, магнітна індукція . . .	152
3.2. Закон Біо—Савара—Лапласа	154
3.3. Магнітне поле прямолінійного провідника, колового контуру. Магнітний момент струму.	155
3.4. Закон Ампера	161
3.5. Поле заряду, що рухається.	165
3.6. Сила Лоренца	168
3.7. Релятивістська природа магнітного поля. Відносність магнітних і електричних полів	171
3.8. Контур зі струмом у магнітному полі	177
3.9. Робота з переміщення провідника зі струмом у магнітному полі. Магнітний потік. Теорема Гаусса для магнітного поля	182
3.10. Циркуляція вектора індукції магнітного поля. Закон повного струму в інтегральній формі.	186
3.11. Ротор. Теорема Стокса	189
3.12. Диференціальна форма закону повного струму	194
3.13. Поле соленоїда та тороїда	196
3.14. Запитання для самоконтролю	202
3.15. Задачі (Б. Ф. Лакін)	203
3.15.1. Приклади розв'язування задач	203
3.15.2. Аудиторні задачі	207

Навчальний елемент 4

ПОСТІЙНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ В РЕЧОВИНІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ (А. П. Поліщук, П. І. Чернега)	208
4.1. Намагнічування магнетиків. Вектор намагнічення.	208
4.2. Напруженість магнітного поля. Магнітна сприйнятливість і проникність магнетиків	213
4.3. Умови на межі двох магнетиків.	215
4.4. Магнітомеханічні явища	219
4.5. Ларморівська прецесія. Діамагнетизм	224
4.6. Парамагнетизм	228
4.7. Феромагнетизм	233
4.8. Електромагнітна індукція. Закон електромагнітної індукції Фарадея. Правило Ленца. Вихрові струми	236
4.9. Самоіндукція. Індуктивність. Струм під час замикання і розімкнення електричного кола	243
4.10. Взаємна індукція	247
4.11. Енергія та густина енергії магнітного поля	249
4.12. Вихрове електричне поле. Струм зміщення.	253

4.13. Рівняння Максвелла	260
4.14. Рух зарядженої частинки в однорідному постійному магнітному полі. Ефект Холла.	261
4.15. Запитання для самоконтролю	266
4.16. Задачі (Б. Ф. Лахін)	266
4.16.1. Приклади розв'язування задач	266
4.16.2. Аудиторні задачі	272
Навчальний елемент 5	
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ (С. Л. Максимов)	273
5.1. Правила складання протоколу лабораторної роботи.	273
5.2. Лабораторна робота 1 «Вимірювання електричних величин»	274
5.3. Лабораторна робота 2 «Визначення питомого опору провідника»	278
5.4. Лабораторна робота 3 «Визначення активного опору методом моста Уїнстона»	282
5.5. Лабораторна робота 4 «Вивчення магнітного поля соленоїда»	287
Навчальний елемент 6	
ІНДИВІДУАЛЬНІ ДОМАШНІ ЗАВДАННЯ (Б. Ф. Лахін)	298
6.1. Порядок виконання індивідуального домашнього завдання	298
6.2. Варіанти домашньої роботи	299
6.3. Задачі для індивідуального домашнього завдання	300
Навчальний елемент 7	
КЛЮЧОВІ СЛОВА	323
Список літератури	325
Навчальний елемент 8	
ТАБЛИЦІ ДОВІДОК	327