

## УРОК 2/2

**Тема.** Електричне поле. Напруженість електричного поля

**Мета уроку:** сформувати в учнів уявлення про електричне поле і його властивості; дати поняття про напруженість електричного поля.

**Тип уроку:** урок вивчення нового матеріалу.

### ПЛАН УРОКУ

<b>Демонстрації</b>	5 хв	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Виявлення електричного поля зарядженої кулі за допомогою зарядженої гільзи.</li> <li>2. Відхилення стрілки електрометра, поміщеного в електричне поле заряду.</li> <li>3. Досліди із султанами, установленими на ізолювальних штативах</li> </ol>
<b>Вивчення нового матеріалу</b>	30 хв	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Електричне поле.</li> <li>2. Напруженість електричного поля.</li> <li>3. Напруженість поля точкового заряду.</li> <li>4. Принцип суперпозиції.</li> <li>5. Лінії напруженості</li> </ol>
<b>Закріплення вивченого матеріалу</b>	10 хв	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Якісні питання.</li> <li>2. Навчаємося розв'язувати задачі</li> </ol>

## ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

### 1. Електричне поле

Відповідно до ідей Майкла Фарадея електричні заряди не діють один на одного безпосередньо. Кожний заряд створює в навколишньому просторі електричне поле, і взаємодія зарядів відбувається за допомогою полів, створюваних цими зарядами. Взаємодія, наприклад, двох електричних зарядів  $q_1$  і  $q_2$  зводиться до того, що поле заряду  $q_1$  діє на заряд  $q_2$ , а поле заряду  $q_2$  діє на заряд  $q_1$ .

Людина не може безпосередньо за допомогою органів почуттів сприймати електричне поле, але об'єктивність його існування, матеріальність доведені експериментально.

Поле, як і речовина, є однією з форм існування матерії.

➤ **Електричне поле** — це форма матерії, що існує біля заряджених тіл і проявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.

Поле, створене нерухомими в цій системі відліку зарядами, називають електростатичним.

Необхідно звернути увагу на те, що електричне поле поширюється в просторі хоча й із величезною, але кінцевою швидкістю — швидкістю світла. Завдяки цій властивості взаємодія між двома зарядами починається не миттєво, а через певний інтервал часу

$\Delta t = \frac{l}{c}$ , де  $l$  — відстань між зарядами, а  $c$  — швидкість світла у вакуумі.

## 2. Напруженість електричного поля

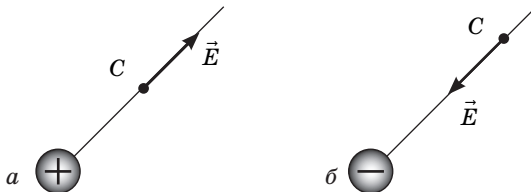
Якщо по черзі поміщати в ту саму точку поля невеликі заряджені тіла й вимірювати сили, що діють на них з боку поля, то виявиться, що сили прямо пропорційні величинам зарядів. Відношення сили до заряду  $\frac{F}{q}$  залишається постійним, не залежить від модуля заряду й характеризує тільки електричне поле в тій точці, де перебуває заряд. Цю характеристику називають напруженістю електричного поля.

➤ *Напруженість електричного поля  $\vec{E}$  — це векторна величина, що характеризує електричне й дорівнює відношенню сили  $\vec{F}$ , з якою електричне поле діє на пробний заряд, поміщений у деяку точку поля, до значення  $q$  цього заряду:*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Напруженість поля в СІ виражається:  $[E] = \text{Н/Кл}$ .

За напрямком вектора напруженості в деякій точці електричного поля вибирають напрямку кулонівської сили, що діяла б на пробний позитивний заряд, якби він був поміщений у цю точку поля.



### 3. Напруженість поля точкового заряду

Нехай точковим зарядом  $Q$ , розташованим у вакуумі, створено електричне поле. Щоб знайти напруженість даного поля в довільній точці, помістимо в цю точку пробний заряд  $q$ . На заряд  $q$ , що перебуває на відстані  $r$  від заряду  $Q$ , діє сила  $F = k \frac{Qq}{r^2}$ . Оскільки модуль напруженості поля  $E = \frac{F}{q}$ , одержуємо, що модуль напруженості поля точкового заряду  $E = k \frac{|Q|}{r^2}$  (або  $E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ).

### 4. Принцип суперпозиції

Знаючи напруженість поля  $\vec{E}$  електричного поля, створеного деяким зарядом у певній точці простору, нескладно визначити модуль і напрямок вектора сили, з якою поле буде діяти на будь-який заряд  $q$ , поміщений у цю точку:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Якщо ж поле утворене не одним зарядом, а декількома, то результуючу силу, що діє на пробний заряд з боку системи зарядів, визначають векторною сумою всіх сил, з якими діяли б заряди системи окремо на цей пробний заряд.

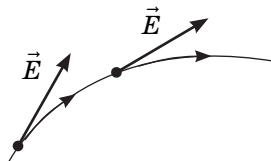
Звідси випливає принцип суперпозиції електричних полів:

- напруженість електричного поля системи  $N$  зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створюваних кожним з них окремо:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N.$$

### 5. Лінії напруженості

Електричне поле можна зобразити графічно, використовуючи так звані *лінії напруженості електричного поля* (силові лінії) — лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля.



Властивості силових ліній: вони не перетинаються; не мають зламів; починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативні. Щоб охарактеризувати не тільки напрямок, але й модуль напруженості поля в різних точках, *силові лінії проводять так, що густина силових ліній пропорційна модулю напруженості.*

## ПИТАННЯ ДО УЧНІВ У ХОДІ ВИКЛАДУ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

### *Перший рівень*

1. Як можна виявити електричне поле в певній точці?
2. Які головні ознаки й властивості електричного поля?
3. Чи залежить напруженість поля в певній точці від модуля пробного заряду, поміщеного в цю точку поля? від модуля заряду, що створює поле?
4. Що визначає густану силових ліній?
5. Як визначають напрямок ліній напруженості поля?

### *Другий рівень*

1. Як зміниться енергія електричного поля двох різнойменних зарядів, якщо зменшити відстань між ними? збільшити відстань між ними?
2. Чи можуть силові лінії перетинатися?
3. Чи правильним є твердження: вільні заряджені частинки рухаються в електростатичному полі уздовж силових ліній цього поля?
4. У міру видалення від точкового заряду густану ліній напруженості зменшується. Що це означає?

## ЗАКРІПЛЕННЯ ВИВЧЕНОГО МАТЕРІАЛУ

### 1. Якісні питання

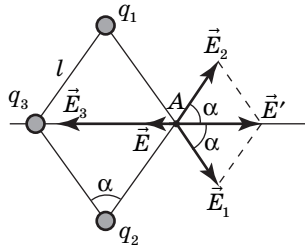
1. Електричне поле зарядженої кулі діє на заряджену порошокину, що перебуває поблизу неї. Чи діє поле порошокини на кулю?
2. Чому стрілка електрометра відхиляється, якщо до нього піднести заряджений предмет, не торкаючись електрометра?

*Указівка.* У результаті поділу зарядів, що відбувається під дією електричного поля, стрілка й нижня частина стрижня електрометра набувають однойменних зарядів.

3. Маленьку заряджену кульку піднесли до великого металевого листа. Покажіть орієнтовний вид силових ліній електричного поля.

## 2. Навчаємося розв'язувати задачі

1. У вершинах при гострих кутах ромба, складеного із двох рівносторонніх трикутників зі сторонами  $l = 25$  см, розташовані точкові заряди  $q_1 = q_2 = 2,5 \cdot 10^{-9}$  Кл. У вершині при одному з тупих кутів ромба розташований точковий заряд  $q_3 = -5 \cdot 10^{-9}$  Кл. Визначте напруженість електричного в четвертій вершині ромба. *Розв'язання.* У четвертій вершині ромба кожний із трьох зарядів  $q_1$ ,  $q_2$  і  $q_3$  створює своє поле, напруженості яких дорівнюють  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  і  $\vec{E}_3$  відповідно. Згідно із принципом суперпозиції результуюча напруженість  $\vec{E}$  у точці  $A$  дорівнює векторній сумі напруженостей:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$ .



Оскільки поле створює система точкових зарядів, то модуль напруженості поля кожного заряду визначають за формулою:

$$E = k \frac{|q|}{l^2}. \text{ Отже, } E_1 = E_2 = k \frac{|q_1|}{l^2}, \quad E_3 = k \frac{|q_3|}{l^2}.$$

Модуль результуючої напруженості  $E'$  полів, створених зарядами  $q_1$  і  $q_2$ , дорівнює  $E' = 2E_1 \cos \alpha$ , де  $\alpha = 60^\circ$ . Тоді модуль напруженості  $E$  в четвертій вершині ромба (точці  $A$ ) дорівнює:

$$E = E_3 - E' = E_3 - 2E_1 \cos \alpha = k \frac{|q_3|}{l^2} - k \frac{2|q_1| \cos \alpha}{l^2} = k \frac{|q_3| - 2|q_1| \cos \alpha}{l^2}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[E] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

$$E = \frac{9 \cdot 10^9 (5 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5)}{625 \cdot 10^{-4}} = 0,36 \cdot 10^3 \left( \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right).$$

*Відповідь:* напруженість поля в четвертій вершині ромба дорівнює  $360 \text{ Н/Кл}$  і напрямлена до заряду  $q_3$ .

2. На відстані  $r_1 = 2 \text{ см}$  від нерухомого точкового заряду у вакуумі напруженість електричного поля цього заряду  $E_1 = 900 \text{ Н/Кл}$ . Визначте напруженість  $E_2$  електричного поля цього заряду на відстані  $r_1 = 10 \text{ см}$  від нього.
3. У вертикально напрямленому однорідному електричному полі перебуває порошина масою  $10^{-9} \text{ г}$  й зарядом  $3,2 \cdot 10^{-17} \text{ Кл}$ . Яка напруженість поля, якщо сила ваги порошини врівноважена силою електричного поля?

### ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ НА УРОЦІ

- Електричне поле — це форма матерії, що існує біля заряджених тіл і проявляється в дії з деякою силою на будь-яке заряджене тіло, що перебуває в цьому полі.
- Напруженість електричного поля  $\vec{E}$  — це векторна величина, що характеризує електричне поле й дорівнює відношенню сили  $\vec{F}$ , з якою електричне поле діє на пробний заряд, поміщений у деяку точку поля, до значення  $q$  цього заряду:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ .

- Напруженість поля точкового заряду:  $E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ .
- Принцип суперпозиції полів: напруженість електричного поля системи  $N$  зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створюваних кожним з них окремо:  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N$ .
- Лінії напруженості електричного поля (силові лінії) — лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора напруженості електричного поля.

### Домашнє завдання

1. Підр-1: § 2; підр-2: § 1 (п. 2, 3, 4).
2. 36.:

**Рів1** № 1.18; 1.19; 1.20; 1.24.

**Рів2** № 1.45; 1.46; 1.48, 1.51.

**Рів3** № 1.58, 1.59; 1.61; 1.68.

## УРОК 3/3

- Тема.** Робота з переміщення заряду в електростатичному полі  
**Мета уроку:** ознайомити учнів з роботою електростатичних сил.  
**Тип уроку:** урок вивчення нового матеріалу.

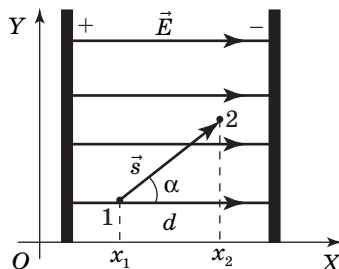
### ПЛАН УРОКУ

<b>Контроль знань</b>	5 хв	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Що таке електричне поле?</li> <li>2. Що таке напруженість електричного поля?</li> <li>3. Як визначити напруженість поля точкового заряду?</li> <li>4. Опишіть основні властивості ліній напруженості</li> </ol>
<b>Вивчення нового матеріалу</b>	28 хв	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Як обчислити роботу з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі?</li> <li>2. Як обчислити роботу з переміщення заряду в полі, створеному точковим зарядом?</li> <li>3. Як пов'язана робота й потенціальна енергія?</li> </ol>
<b>Закріплення вивченого матеріалу</b>	12 хв	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Якісні питання.</li> <li>2. Навчаємося розв'язувати задачі</li> </ol>

## ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

### 1. Як обчислити роботу з переміщення заряду в однорідному електростатичному полі

Нехай в однорідному електричному полі напруженістю  $\vec{E}$  позитивний точковий заряд  $q$  переміщується із точки 1 з координатою  $x_1$  в точку з координатою  $x_2$ .



Обчислимо роботу, виконану силами електростатичного поля під час переміщення цього заряду. Робота, виконана силою  $\vec{F}$  з переміщення тіла, дорівнює  $A = F \cos \alpha$ . У нашому випадку сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ , а  $\cos \alpha = d = x_2 - x_1$ .

Виходить, робота сил однорідного електростатичного поля під час переміщення електричного заряду із точки 1 у точку 2 дорівнює:  $A_{1-2} = qE(x_2 - x_1)$ , або  $A_{1-2} = qEd$ .

Якби заряд переміщався із точки 2 у точку 1, то знак роботи змінився б на протилежний, тому що роботу виконували б проти сил поля. Очевидно, що під час переміщення заряду  $q$  із точки 1 у точку 2 і назад була виконана робота, що дорівнює:  $A = A_1 + A_2$ . Оскільки заряд  $q$  повернувся у вихідну точку, то система зарядів залишилася незмінною, а отже, і поле залишилося колишнім. Кожне поле має певну енергію. Енергія в цьому випадку залишилася незмінною, а оскільки робота є мірою зміни енергії, то сумарна робота дорівнює нулю:  $A = 0$ . Звідси випливає, що  $|A_1| = |A_2|$ .

Аналогічні міркування можна провести й у випадку, якщо переміщати заряд  $q$  із точки 1 у точку 2 і назад по інших траєкторіях. На підставі вищевикладених міркувань можна зробити висновки:

- 1) робота в електростатичному полі залежить не від форми шляху, а тільки від положення точок у полі, між якими переміщається заряд;
- 2) робота з будь-якого замкнутого контуру в електростатичному полі дорівнює нулю.

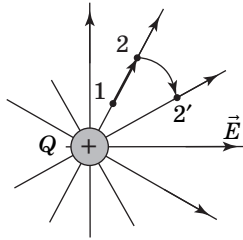
## 2. Як обчислити роботу з переміщення заряду в полі, створеному точковим зарядом

Нехай поле створене позитивним точковим зарядом  $Q$ , розташованим у вакуумі, а позитивний пробний заряд  $q$  рухається в цьому полі із точки 1 у точку 2.

Припустімо, що спочатку заряд  $q$  рухався уздовж радіуса на ділянці  $1 \rightarrow 2'$ , а потім уздовж дуги на ділянці  $2' \rightarrow 2$ . Тоді робота  $A_{1-2}$  поля під час переміщення заряду із точки 1 у точку 2 дорівнює сумі робіт  $A_{1-2'}$  і  $A_{2'-2}$  на цих ділянках:

$$A_{1-2} = A_{1-2'} + A_{2'-2}.$$





Очевидно, що робота  $A_{2'-2}$  дорівнює нулю, оскільки в цьому випадку вектор сили в будь-який момент часу перпендикулярний до вектора переміщення. Щоб визначити роботу  $A_{1-2'}$ , розіб'ємо весь шлях  $r$  заряду на ділянці  $1 \rightarrow 2'$  на дуже маленькі відрізки  $\Delta r$ , на яких силу можна вважати постійною. Тоді робота  $\Delta A$  поля на кожному відрізку  $\Delta r$  дорівнюватиме:

$$\Delta A = F \Delta r = k \frac{Qq}{r^2} \cdot \Delta r.$$

Роботу поля на всьому шляху можна знайти як суму:

$$A_{1-2} = \sum_{r_1}^{r_2} \Delta A_i = \sum_{r_1}^{r_2} F_i \Delta r_i.$$

Звідси можна обчислити роботу, яку виконують сили поля, створеного точковим зарядом  $Q$ , під час переміщення пробного заряду  $q$  із точки 1 у точку 2:

$$A_{1-2} = kQq \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

### 3. Як пов'язана робота й потенціальна енергія

Тіло, що перебуває в потенційному полі, має потенціальну енергію, за рахунок зменшення якої сили поля виконують роботу. Тому заряджене тіло, поміщене в електричне поле, має потенціальну енергію. А різниця її значень у довільних точках 1 і 2 дорівнює роботі, яку повинні виконати сили поля, щоб перемістити заряд із точки 1 у точку 2:  $A_{1-2} = W_{n1} - W_{n2}$ .

Отже,  $A_{1-2} = -\Delta W_n$ , де  $W_{n1}$  і  $W_{n2}$  — потенціальні енергії заряду в точках 1 і 2 відповідно.

Виберемо нульову точку (нагадаємо, що нульовою точкою називається точка, у якій потенціальна енергія заряду дорівнює нулю). Зазвичай за нульову точку вибирають будь-яку точку, що нескінченно віддалена від зарядів, які створюють поле:  $W_{\text{п}} \rightarrow 0$ , якщо  $r \rightarrow \infty$ .

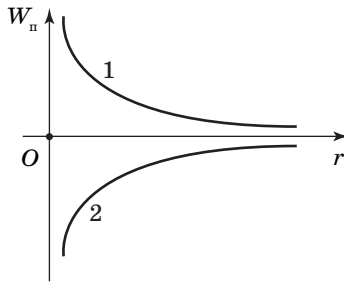
У цьому випадку  $W_{\text{п}2} = 0$ , а  $A_{1-\infty} = W_{\text{п}1}$ .

Тобто потенціальна енергія заряду в даній точці електростатичного поля дорівнює роботі, яку повинне виконати поле з переміщення заряду із цієї точки в нескінченність.

Отже,  $W_{\text{п}} = k \frac{Qq}{r}$ . Таким чином, енергія взаємодії двох точкових зарядів має сенс роботи, яку повинне виконати електростатичне поле для збільшення відстані між цими зарядами від  $r$  до нескінченності.

Якщо система складається із зарядів одного знака, то внаслідок дії сил відштовхування заряди намагаються віддалитися один від одного на нескінченно велику відстань.

Тому енергія системи зарядів є позитивною; у результаті видалення зарядів енергія системи зменшується до нуля (*графік 1 на рисунку*).



Якщо система складається із зарядів протилежних знаків, тоді уже не сили поля, а зовнішні сили мають виконати позитивну роботу, щоб віддалити заряди на нескінченно велику відстань. Тому у разі віддалення зарядів один від одного енергія їх взаємодії буде збільшуватися до нуля, а від самого початку вона була негативною (*графік 2 на рисунку*).

## ПИТАННЯ ДО УЧНІВ У ХОДІ ВИКЛАДУ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

### *Перший рівень*

1. Чи залежить робота з переміщення зарядженого тіла з однієї точки поля в іншу від форми траєкторії?
2. Які поля називають потенційними?
3. За рахунок якої енергії сили електростатичного поля виконують роботу?

### *Другий рівень*

1. За якої умови переміщення електричного заряду з однієї точки електричного поля в іншу не потребує витрат енергії?
2. Що називають нульовою точкою потенціальної енергії? Яку точку найчастіше вибирають за нульову?

## ЗАКРІПЛЕННЯ ВИВЧЕНОГО МАТЕРІАЛУ

### 1. Якісні питання

1. Однойменно заряджені тіла зближують. Яку роботу при цьому виконують сили електричного поля — позитивну або негативну? Як змінюється енергія електричного поля: збільшується або зменшується?
2. Як зміниться потенціальна й кінетична енергія позитивного заряду, що перебуває на порошині, яка вільно переміщається в полі точкового позитивного заряду у напрямку силової лінії?
3. Як треба переміщати точковий заряд у полі іншого (нерухомого) точкового заряду, щоб потенціальна енергія взаємодії зарядів не змінювалася?

### 2. Навчаємося розв'язувати задачі

1. В однорідному полі під кутом  $60^\circ$  до напрямку силових ліній переміщується заряд  $5 \text{ нКл}$ . Визначте роботу поля й зміну потенціальної енергії заряду, якщо напруженість поля дорівнює  $30 \text{ кН/Кл}$ , а модуль переміщення заряду становить  $20 \text{ см}$ . Як зміняться отримані значення, якщо переміщатиметься заряд  $-5 \text{ нКл}$ ?
2. Два однакових точкових заряди по  $50 \text{ мкКл}$  кожний перебувають на відстані  $1 \text{ м}$  один від одного. Яку роботу необхідно виконати, щоб зблизити ці заряди до відстані  $50 \text{ см}$ ?

3. Дві нескінченно довгі паралельні плоскі пластини заряджені різнойменними зарядами поверхневої густини  $3 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Відстань між пластинами дорівнює 1,5 см. Визначте роботу, яку виконує поле, переміщаючи заряд  $2,5 \cdot 10^{-6}$  Кл з однієї пластини на другу.

### ЩО МИ ДІЗНАЛИСЯ НА УРОЦІ

- Робота в електростатичному полі:
  - 1) залежить не від форми шляху, а тільки від положення точок у полі, між якими переміщається заряд;
  - 2) по будь-якому замкнутому контуру в електростатичному полі дорівнює нулю.
- Робота з переміщення заряду в полі, створеному точковим зарядом:

$$A_{1-2} = kQq \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

- Потенціальна енергія заряду в певній точці електростатичного поля дорівнює роботі, яку має виконати поле з переміщення заряду із цієї точки в нескінченність:

$$W_{\text{п}} = k \frac{Qq}{r}.$$

### Домашнє завдання

1. Підр-1: § 3; підр-2: § 3 (п. 1).
2. 36.:

**Рів1** № 2.7; 2.8; 2.9; 2.10.

**Рів2** № 2.11; 2.12; 2.13, 2.14.

**Рів3** № 2.51, 2.52; 2.53; 2.54.