

# РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ

## § 1. АЗБУКА ЕЛЕКТРОСТАТИКИ



Усі фізичні явища пов'язані з тими чи іншими взаємодіями, мірою яких є сили. Якщо не брати до уваги силу тяжіння, у повсякденному житті ми зустрічаємося в основному з різними проявами *електромагнітних сил*. Усі види сил пружності й тертя мають електромагнітну природу; життєдіяльність рослин, організмів тварин і людей базується на електромагнітних взаємодіях. Крім того, електромагнітні сили визначають стійкість атомів, поєднують атоми в молекули; світло та радіохвилі, без яких неможливо уявити сучасне життя, — теж прояви електромагнітної взаємодії. Вивчає цю взаємодію *електродинаміка* — наука про властивості особливого виду матерії — електромагнітного поля, через яке здійснюється взаємодія електрично заряджених тіл або частинок. Якщо електрично заряджені тіла або частинки перебувають у спокої, то їх взаємодію розглядає розділ електродинаміки, який називається *електростатикою*. З основами електростатики ви ознайомились у курсі фізики 9-го класу. А щоб йти далі, необхідно відтворити в пам'яті базові поняття.



### Що таке електричний заряд

**Електричний заряд** — це фізична величина, яка характеризує властивість частинок або тіл вступати в електромагнітну взаємодію.

Електричний заряд позначають символом  $q$ . *Одиниця електричного заряду в СІ — кулон (Кл). 1 Кл дорівнює заряду, який проходить через поперечний переріз провідника за 1 с, якщо сила струму в провіднику 1 А:  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$ .*

#### *Основні властивості електричного заряду*

1. Існують два роди електричних зарядів — *позитивні та негативні*. Електричний заряд такого роду, як заряд, отриманий на бурштині або ебонітовій паличці, потертих об вовну, прийнято називати негативним, а такого роду, як заряд, отриманий на паличці з оргекла, потертій об папір, — позитивним.

2. Тіла, що мають заряди одного знака, *відштовхуються*; тіла, що мають заряди протилежних знаків, *притягуються*.

3. *Носієм електричного заряду є частинка* — електричний заряд не існує окремо від неї.

4. Електричний заряд є *дискретним*, тобто електричні заряди фізичних тіл кратні певному найменшому (елементарному) заряду. *Носій найменшого негативного заряду — електрон*. Цей заряд зазвичай позначають символом  $e$ , а його значення записують так:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. *Носій найменшого позитивного заряду — протон*. Заряд протона за модулем дорівнює заряду електрона.

Якщо  $q$  — заряд тіла,  $e$  — заряд електрона,  $N$  — ціле число, то  $|q| = N|e|$ .

★ Перше досить точне вимірювання значення елементарного заряду здійснив американський фізик Роберт Міллікен (1868–1953)

під час дослідів 1906–1916 рр. з вивчення руху дрібних крапельок олії в електричному полі.★

Зверніть увагу: залежно від контексту під словом «заряд» будемо розуміти або значення заряду зарядженого тіла, або саме заряджене тіло.

## 2 Що відбувається під час електризації

**Електризація** — це процес одержання електричного заряду макроскопічними тілами або їх частинами.

Існують декілька способів електризації, серед яких — *електризація тертям*. Ви вже знаєте, що в процесі електризації тертям відбувається тісний контакт двох тіл, виготовлених із різних матеріалів, і частина електронів переходить з одного тіла на інше. Після роз'єднання цих тіл виявляється, що тіло, яке віддало частину своїх електронів, заряджене *позитивно*, а тіло, яке одержало їх, заряджене *негативно* (рис. 1.1).

За будь-якого способу електризації тіл відбувається *перерозподіл* наявних в них електричних зарядів, а не поява нових. Це твердження є наслідком одного з найважливіших законів природи — **закону збереження електричного заряду**:

Повний заряд замкнутої системи тіл або частинок залишається незмінним під час усіх взаємодій, які відбуваються в цій системі:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const},$$

де  $q_1, q_2, \dots, q_n$  — заряди тіл або частинок, які утворюють замкнену систему;  $n$  — кількість тіл або частинок.

Таким чином, якщо перед електризацією тертям скляної палички об шовкову тканину і паличка, і тканина були незарядженими, то після тертя вони виявляться зарядженими, причому їхні заряди будуть однаковими за модулем і протилежними за знаком. Тобто їхній сумарний заряд, як і перед дослідом, дорівнюватиме нулю.

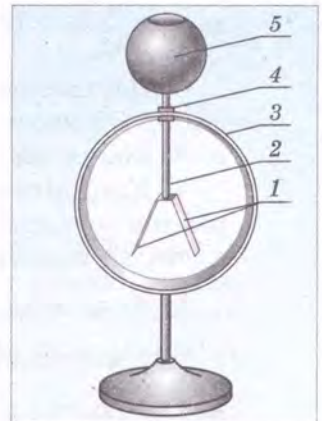
## 3 Для чого застосовують електроскоп

**Електроскоп** — прилад, який використовують для виявлення та якісного оцінювання електричного заряду.

Будову електроскопа показано на рис. 1.2.



**Рис. 1.1.** Під час електризації тертям частина електронів зі скляної палички перейде на клаптик шовку, в результаті чого скляна паличка набуде позитивного заряду, а клаптик шовку — негативного



**Рис. 1.2.** Будова електроскопа: 1 — індикатор (паперові або металеві смужки); 2 — металевий стрижень; 3 — корпус; 4 — діелектрик у місці кріплення стрижня; 5 — кондуктор (металева порожня куля)





Рис. 1.3. Електро-метр

### Принцип дії електроскопа

Коли до кондуктора електроскопа торкаються досліджуваним зарядженим тілом, то частина заряду цього тіла по металевому стрижню переходить на смужки електроскопа. Оскільки однойменно заряджені тіла відштовхуються, нижні кінці смужок розійдуться в різні боки. Кут між смужками залежить від значення отриманого ними заряду. Цей кут тим більший, чим більший отриманий заряд. Коли електроскоп незаряджений, то смужки розташовані вертикально.

Зверніть увагу: якщо смужки електроскопа замінити легкою металевою стрілкою, а на передній стінці корпусу розмістити шкалу, то отриманий прилад можна використовувати й для кількісного оцінювання електричного заряду. Такий прилад називають *електрометром* (рис. 1.3).

4

### Що визначає закон Кулона

Французький фізик *Шарль Кулон* (1736–1806) експериментально встановив закон, який став *основним законом електростатики* та був названий на його честь, — **закон Кулона**:

Значення сили  $\vec{F}$  взаємодії двох нерухомих точкових зарядів  $q_1$  і  $q_2$  прямо пропорційне добутку модулів цих зарядів та обернено пропорційне квадрату відстані  $r$  між ними:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

де  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$  — коефіцієнт пропорційності.

Нагадаємо: *точковим зарядом* називають заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл, що розглядаються.

**Коефіцієнт пропорційності  $k$**  чисельно дорівнює силі, з якою взаємодіють два точкові заряди по 1 Кл кожний, розташовані у вакуумі на відстані 1 м один від одного.

Іноді замість коефіцієнта  $k$  застосовують *інший коефіцієнт* —  $\epsilon_0$ , що має назву *електрична стала*:  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ . Тоді математичний запис закону Кулона матиме такий вигляд:

$$F = \frac{|q_1| |q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

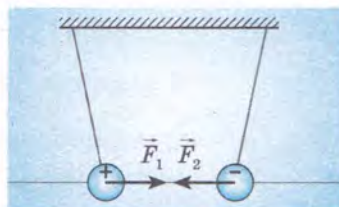
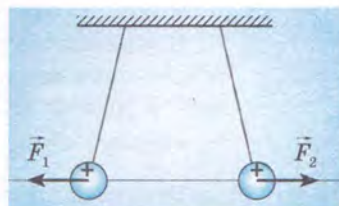
Зверніть увагу:

— у законі Кулона йдеться про добуток *модулів* зарядів, оскільки знаки зарядів впливають лише на напрямок сили;

— сили, з якими взаємодіють точкові заряди, зазвичай називають *кулонівськими силами*;

— кулонівські сили *напрявлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди*, що взаємодіють (рис. 1.4);

— якщо взаємодіють три чи більше зарядів, то спочатку визначаються сили взаємодії певного заряду з кожним із решти зарядів (за законом Кулона), а потім розраховується їх результуюча.



**Рис. 1.4.** Сили електричної взаємодії ( $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ ) напрямлені вздовж умовної прямої, яка з'єднує точкові заряди

## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача 1.** Кожна з двох однакових маленьких незаряджених кульок масою 0,01 г підвішена у вакуумі на шовковій нитці завдовжки 1,0 м так, що кульки торкаються одна одної. Першу кульку відвели вбік, зарядили і повернули в початкове положення. Після цього кульки відійшли одна від одної на відстань 14 см. Визначте заряд першої кульки перед дотиком.

$q_1$  — ?

Дано:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_2 = m = \\ &= 1 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \\ l_1 &= l_2 = l = 1,0 \text{ м} \\ r &= 0,14 \text{ м} \end{aligned}$$

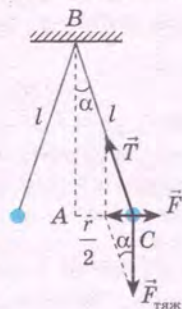
$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$q_2 = 0$$

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

*Аналіз фізичної проблеми.* Після того як перша кулька торкнулася до другої, її заряд розподілився між даними двома кульками. У результаті між зарядженими кульками виникла сила кулонівського відштовхування, через дію якої вони розійшлися.

Зробивши пояснювальний рисунок і записавши умову рівноваги, можемо визначити модуль кулонівської сили. Тоді, знаючи його і скориставшись законом Кулона та законом збереження заряду, визначимо заряд першої кульки перед дотиком.



*Пошук математичної моделі, розв'язання.* На кожну кульку діють три сили: кулонівська сила  $\vec{F}$ , сила тяжіння  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  і сила  $\vec{T}$  натягу нитки. Оскільки кульки перебувають у рівновазі, геометрична сума сил дорівнює нулю:  $\vec{F} + \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{T} = 0$ . Ця умова буде виконана, якщо модуль рівнодійної сил  $\vec{T}$  і  $\vec{F}_{\text{тяж}}$  дорівнюватиме модулю  $\vec{F}$ :  $F_{\text{тяж}} \text{tg} \alpha = F$ .

За законом Кулона  $F = k \frac{|q'_1| |q'_2|}{r^2}$ , тому  $mg \text{tg} \alpha = k \frac{|q'_1| |q'_2|}{r^2}$  (1), де

$q'_1$  і  $q'_2$  — відповідно заряди першої і другої кульок після взаємодії.

\* Якщо не зазначено інше, під час розв'язування задач вважатимемо, що  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .



Оскільки система кульок є замкненою, в ній виконується закон збереження заряду:  $q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$ , де  $q_1$  і  $q_2$  — відповідно заряди першої і другої кульок до взаємодії. Розміри кульок однакові, тож  $q'_1 = q'_2 = q'$ . Отже,  $q' = \frac{q_1}{2}$  (2).

Значення  $\operatorname{tg} \alpha$  знайдемо з трикутника  $ABC$ :  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{r/2}{\sqrt{l^2 - r^2/4}}$ .

Оскільки  $\frac{r}{2} \ll l$ , то  $\sqrt{l^2 - r^2/4} \approx \sqrt{l^2} = l$ . Отже:  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{2l}$  (3).

З рівняння (1) із урахуванням співвідношень (2) і (3) маємо, що модуль заряду першої кульки перед дотиком  $q_1 = r \sqrt{\frac{2mg \cdot r}{kl}}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$[q_1] = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}}{\text{Н} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot \text{м}}}{\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}}}} = \text{м} \cdot \sqrt{\frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2}} = \frac{\text{м} \cdot \text{Кл}}{\text{м}} = \text{Кл};$$

$$\{q_1\} = 0,14 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \cdot 0,14}{9 \cdot 10^9 \cdot 1}} \approx 7,8 \cdot 10^{-9}, \quad q_1 \approx 7,8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

Відповідь: заряд першої кульки перед дотиком  $q_1 \approx 7,8$  нКл.

**Задача 2.** Три однакові позитивні точкові заряди по  $18,0$  нКл кожен розташовані у вершинах рівностороннього трикутника. Який точковий заряд необхідно помістити в центрі трикутника, щоб система зарядів перебувала в рівновазі?

$q_0$  — ?

Дано:

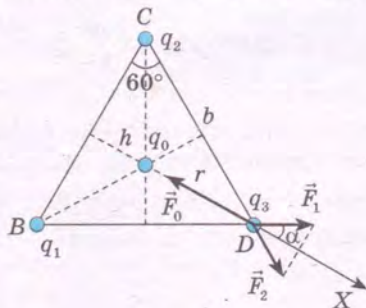
$$q_1 = q_2 = q_3 = q = 18,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

*Аналіз фізичної проблеми.* Шуканий заряд  $q_0$  має притягувати заряди  $q$ , розташовані у вершинах трикутника, компенсуючи їхнє взаємне відштовхування. Тому заряди  $q_0$  і  $q$  повинні бути різноіменними. За будь-якого значення заряду  $q_0$  він перебуватиме в рівновазі, оскільки розміщений у центрі симетрії

трикутника і сили, що діють на нього з боку зарядів, розташованих у вершинах трикутника, компенсуються.

Заряди, розташовані у вершинах трикутника, перебуватимуть у рівновазі, коли геометричні суми сил, які діють на них, дорівнюватимуть нулю. Виконавши пояснювальний рисунок і записавши умову рівноваги для одного із зарядів  $q$ , знайдемо значення заряду  $q_0$ .

*Пошук математичної моделі, розв'язання.* Розглянемо, наприклад, умову рівноваги заряду, розташованого в точці  $D$ . На цей заряд діють сили відштовхування  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$  з боку зарядів, розташованих у вершинах  $B$  і  $C$  відповідно, і сила  $\vec{F}_0$  притягання до заряду  $q_0$ .



Отже:  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_0 = 0$ .

У проекціях на вісь  $OX$  ця рівність набуде вигляду:

$$-F_0 + F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \alpha = 0 \quad (*), \text{ де } \alpha = 30^\circ; \cos \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Щоб знайти модулі сил, необхідно знати відстань між зарядами. Позначимо  $b$  довжину сторони трикутника, а відстань від центра трикутника до вершини —  $r$ . Із геометрії відомо, що  $r = \frac{2}{3}h$ , де  $h$  — висота трикутника, яка, у свою чергу, дорівнює:  $h = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{4}} = \frac{b\sqrt{3}}{2}$ . Тому  $r = \frac{b\sqrt{3}}{3}$ .

Знайдемо модулі сил, використовуючи закон Кулона і вважаючи, що система зарядів перебуває у вакуумі:  $F_1 = F_2 = k \frac{|q|^2}{b^2}$ ;  $F_0 = k \frac{3|q||q_0|}{b^2}$ .

Підставивши вирази для розрахунку сил у рівняння (\*), маємо:

$$-\frac{k \cdot 3 \cdot |q||q_0|}{b^2} + \frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot |q|^2}{b^2} = 0. \text{ Звідси } |q_0| = \frac{|q|}{\sqrt{3}}. \text{ Ураховуючи, що за-}$$

ряди  $q_0$  і  $q$  повинні бути різноіменними, маємо:  $q_0 = -\frac{q}{\sqrt{3}}$ .

Визначимо значення шуканої величини:

$$\{q_0\} \approx -\frac{18 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{3}} \approx -10,4 \cdot 10^{-9}, \quad q_0 \approx -10,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

**Відповідь:** у центр трикутника необхідно помістити заряд  $q_0 \approx -10,4 \cdot 10^{-9}$  Кл.

### Контрольні запитання

1. Що називають електричним зарядом?
2. Назвіть одиницю електричного заряду.
3. Які роди зарядів існують?
4. Як взаємодіють тіла, що мають заряди одного знака? протилежних знаків?
5. Яка частинка має найменший негативний заряд? найменший позитивний заряд?
6. Як ви розумієте твердження, що електричний заряд є дискретним?
7. Що відбувається під час тісного контакту двох тіл, виготовлених із різних матеріалів?
8. Якщо електронейтральне тіло віддасть частину своїх електронів, заряд якого знака воно матиме?
9. Чому під час тертя ебонітової палички об вовну електризуються обидва тіла?
10. Сформулюйте закон збереження електричного заряду.
11. Як сконструйований електроскоп і яким є принцип його дії?
12. Чим електрометр відрізняється від електроскопа?
13. Який заряд називають точковим? Порівняйте поняття «точковий заряд» і «матеріальна точка».
14. Сформулюйте закон Кулона.

### Вправа № 1

1. Як зміниться сила взаємодії двох зарядів, якщо відстань між ними збільшити у 4 рази і модуль кожного заряду збільшити у 2 рази?
2. Як змінилася відстань між двома зарядами, якщо відомо, що сила їхньої взаємодії збільшилася у 9 разів?
3. Дві маленькі кульки, розташовані на відстані 10 см одна від одної, мають однакові негативні заряди. Визначте силу взаємодії кульок, якщо відомо, що на кожній з них є  $1 \cdot 10^{11}$  надлишкових електронів.



4. Дві однакові маленькі металеві кульки заряджені так, що модуль заряду однієї з них у 5 разів більший, ніж модуль заряду іншої. Кульки змусили доторкнутись одну до одної та розвели на початкову відстань. У скільки разів змінилася сила взаємодії кульок, якщо перед дотиком вони були заряджені однойменно? різнойменно?
5. На шовковій нитці підвісили маленьку заряджену кульку масою 2 г. Після того як знизу до неї піднесли другу заряджену кульку, сила натягу нитки, що діє на першу кульку, збільшилась у 2 рази. Визначте відстань між кульками, якщо їхні заряди різнойменні та рівні за модулем —  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл.
6. У вершинах квадрата розташовані однакові точкові заряди  $q$ . Який точковий заряд  $q_0$  необхідно помістити в центр квадрата, щоб система перебувала в рівновазі?