Змістовий модуль № 2. Електричне і магнітне поле
Тема 2.1 «Електростатика»
Лекція № 5

План лекції

1. Основні закони електростатики
2. Електростатичне поле
3. Теорема Гауса для електростатичного поля

1. Основні закони електростатики

Електричний заряд – це пов'язана з тілом властивість, що дозволяє йому бути джерелом електричного поля й брати участь в електромагнітних взаємодіях.

Усі тіла в природі здатні електризуватися, тобто здобувати електричний заряд. Усякий процес заряджання зводиться до поділу зарядів, при якім на одному з тіл (або частині тіла) з'являється надлишок позитивного заряду, а на іншому (або іншої частини тіла) - надлишок негативного заряду. Загальна кількість зарядів обох знаків, що втримуються в тілах, не змінюється: ці заряди тільки перерозподіляються між тілами.

В 1843 г. англійським фізиком М. Фарадеєм був установлений фундаментальний закон природи, - закон збереження заряду: алгебраїчна сума електричних зарядів будь-якої замкненої системи залишається незмінною, які б процеси не відбувалися усередині цієї системи.

Замкненою називають систему, що не обмінюється зарядами із зовнішніми тілами.

Одиниця електричного заряду - кулон (Кл) - електричний заряд, що проходить через поперечний переріз провідника при силі струму 1 А за час 1 с.

Закон взаємодії нерухомих точкових електричних зарядів установлений в 1785 г. Ш. Кулоном за допомогою крутильних ваг: сила взаємодії F між двома нерухомими точковими зарядами, що перебувають у вакуумі, пропорційна зарядам Q_1 і Q_2 і обернено пропорційна квадрату відстані r між ними:

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \qquad (2.1)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, що залежить від вибору системи одиниць.

Сила F спрямована по прямій, що з'єднує взаємодіючі заряди, тобто є центральною, і відповідає притяганню ($F<0$) у випадку різнойменних зарядів і відштовхуванню ($F>0$) у випадку однойменних зарядів. Ця сила називається кулонівською силою.

У СІ коефіцієнт пропорційності рівний

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}. \qquad (2.2)$$

Тоді закон Кулона запишеться в остаточному вигляді:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q_1Q_2}{r^2}. \tag{2.3}$$

Величина ε_0 називається електричної постійною; вона належить до фундаментальних фізичних постійних і рівна $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\frac{Кл^2}{Н \cdot м^2}$, причому $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9\,\frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}\left(\frac{м}{Ф}\right)$.

2. Електростатичне поле

Якщо в простір, що оточує електричний заряд, внести інший заряд, то на нього буде діяти кулонівська сила; виходить, у просторі, що оточує електричні заряди, існує силове поле. У цьому випадку говорять про електричне поле – поле, за допомогою якого взаємодіють електричні заряди. Ми будемо розглядати електричні поля, які створюються нерухомими електричними зарядами й називаються електростатичними.

Для виявлення й досвідченого дослідження електростатичного поля використовується пробний точковий позитивний заряд – такий заряд, який не спотворює досліджуване поле (не викликає перерозподілу зарядів, що створюють поле). Якщо в поле, створюване зарядом Q, помістити пробний заряд Q_0, то на нього діє сила F, різна в різних точках поля, яка, згідно із законом Кулона, пропорційна пробному заряду Q_0. Тому відношення F/Q_0 не залежить від Q_0 і характеризує електростатичне поле в тій точці, де пробний заряд перебуває. Ця величина називається напруженістю і є силовою характеристикою електростатичного поля.

Напруженість електростатичного поля в даній точці є фізична величина, обумовлена силою, що діє на пробний одиничний позитивний заряд, поміщений у цю точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}\ \left[\frac{Н}{Кл};\frac{В}{м}\right]. \tag{2.4}$$

Як випливає із закону Кулона, напруженість поля точкового заряду у вакуумі

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}. \tag{2.5}$$

Напрямок вектору $\vec{E}$ збігається з напрямком сили, що діє на позитивний заряд. Якщо поле створюється позитивним зарядом, то вектор $\vec{E}$ спрямований уздовж радіуса-вектору від заряду в зовнішній простір (відштовхування пробного позитивного заряду); якщо поле створюється негативним зарядом, то вектор $\vec{E}$ спрямований до заряду (мал. 2.1).

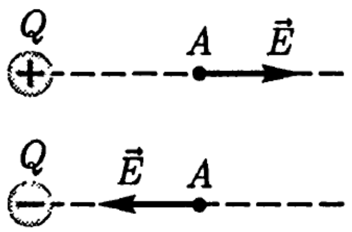

Рис. 2.1

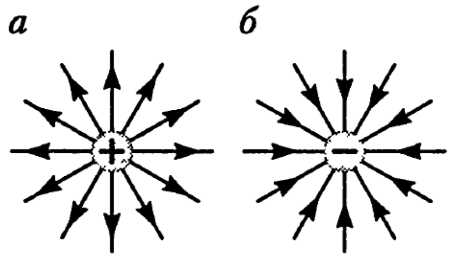

Рис. 2.2

Згідно принципу суперпозиції електростатичних полів напруженість $\vec{E}$ результуючого поля, створюваного системою зарядів, дорівнює геометричній сумі напруженостей полів, створюваних у даній точці кожним із зарядів поодинці:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{N} \vec{E_i} \,. \tag{2.6}$$

Графічно електростатичне поле зображують за допомогою ліній напруженості - ліній, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямком вектора $\vec{E}$. Лініям напруженості приписується напрямок, що збігається з напрямком вектору напруженості. Через те що в кожній даній точці простору вектор напруженості має лише один напрямок, то лінії напруженості ніколи не перетинаються. Для однорідного поля (коли вектор напруженості в будь-якій точці постійний по величині й напрямку) лінії напруженості паралельні вектору напруженості. Якщо поле створюється точковим зарядом, то лінії напруженості - радіальні прямі, що виходять із заряду, якщо він позитивний (мал. 2.2, а), та що входять у нього, якщо заряд негативний (мал. 2.2, б). Внаслідок великої наочності графічний спосіб представлення електростатичного поля широко застосовується в електротехніці.

Щоб за допомогою ліній напруженості можна було характеризувати не тільки напрямок, але й значення напруженості електростатичного поля, умовилися проводити їх з певною густотою (див. мал. 2.3): число ліній напруженості, що пронизують одиницю площі поверхні, перпендикулярну лініям напруженості, повинне дорівнювати модулю вектору $\vec{E}$. Тоді число ліній напруженості, що пронизують елементарний майданчик ds, нормаль $\vec{n}$ якої утворює кут α з вектором $\vec{E}$, рівно $Eds\cos\alpha = E_n dS$, де E_n - проекція вектору $\vec{E}$ на нормаль $\vec{n}$ до майданчика ds (мал. 2.4).

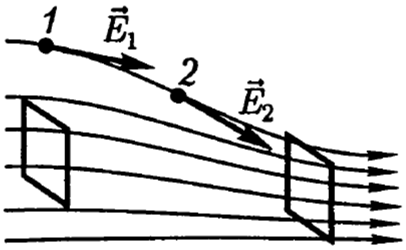

Рис. 2.3

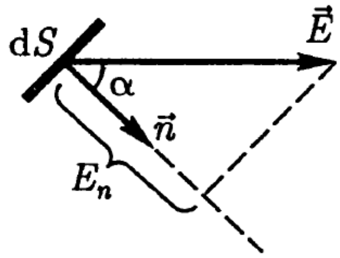

Рис. 2.4

Величина

$$d\Phi_E = E_n dS = \vec{E} d\vec{S} \tag{2.7}$$

називається потоком вектору напруженості через майданчик ds. Тут $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$ - вектор, модуль якого рівний ds, а напрямок збігається з напрямком нормалі $\vec{n}$ до майданчика. Одиниця потоку вектору напруженості електростатичного поля – 1 $В \cdot м$.

Для довільної замкненої поверхні S потік вектору $\vec{E}$ крізь цю поверхню

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \vec{E} d\vec{S}, \tag{2.8}$$

де інтеграл береться по замкненій поверхні S. Потік вектору $\vec{E}$ є алгебраїчною величиною: залежить не тільки від конфігурації поля $\vec{E}$, але й від вибору напрямку $\vec{n}$. Для замкнених поверхонь за позитивний напрямок нормалі ухвалюється зовнішня нормаль, тобто нормаль, спрямована назовні області, охоплюваною поверхнею.

3. Теорема Гауса для електростатичного поля

Німецький учений К. Гаус вивів теорему, що визначає потік вектору напруженості електричного поля крізь довільну замкнену поверхню.

Потік вектору напруженості крізь сферичну поверхню радіуса r, що охоплює точковий заряд Q, що перебуває в її центрі (мал. 2.5), рівний

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} 4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0}. \tag{2.9}$$

Цей результат слушний для замкненої поверхні будь-якої форми. Дійсно, якщо оточити сферу (мал. 2.5) довільною замкненою поверхнею, те кожна лінія напруженості, що пронизує сферу, пройде й крізь цю поверхню.

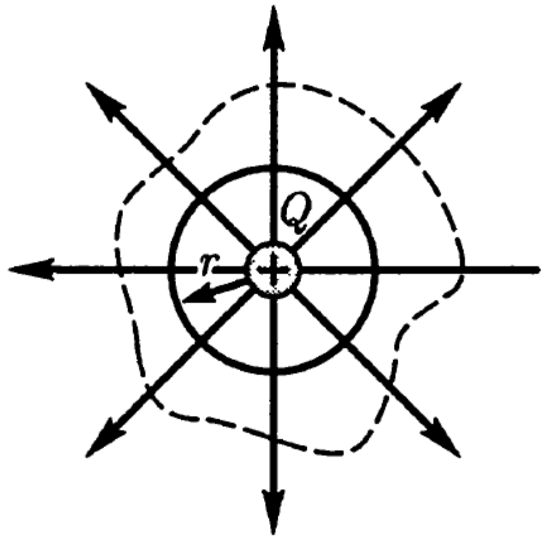

Рис. 2.5

Таким чином, для поверхні будь-якої форми, якщо вона замкнена й містить у себе точковий заряд Q, потік вектору $\vec{E}$ буде рівний Q/ε_0 :

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{Q}{\varepsilon_0}. \tag{2.10}$$

Знак потоку збігається зі знаком заряду Q.

Розглянемо загальний випадок довільної поверхні, що оточує n зарядів. Відповідно до принципу суперпозиції напруженість $\vec{E}$ поля, створюваного всіма зарядами, дорівнює сумі напруженостей $\vec{E}_i$ полів, створюваних кожним зарядом окремо: $\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$. Тому

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E}\, d\vec{S} = \oint_S \left(\sum_i \vec{E}_i \right) dS = \sum_i \oint_S \vec{E}_i\, d\vec{S} = \sum_i \frac{Q_i}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_i Q_i . \tag{2.11}$$

Формула

$$\oint_S \vec{E}\, d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{n} Q_i \tag{2.12}$$

виражає теорему Гауса для електростатичного поля у вакуумі: потік вектору напруженості електростатичного поля у вакуумі крізь довільну замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів усередині цієї поверхні, діленою на ε_0. Ця теорема виведена математично для векторного поля будь-якої природи українським математиком М. В. Остроградським, а потім незалежно від нього стосовно до електростатичного поля - К. Гаусом.

Питання для самоконтролю

1. В чому полягає закон збереження заряду? Наведіть приклади прояву закону.
2. Запишіть, сформулюйте та поясніть закон Кулона.
3. Які поля називають електростатичними?
4. Що таке напруженість $\vec{E}$ електростатичного поля?
5. Який напрямок має вектор напруженості $\vec{E}$? Одиниця напруженості в СІ.
6. Електричний диполь (система двох рівних за модулем різноіменних точкових зарядів) поміщений всередину замкненої поверхні. Який потік Φ_E крізь цю поверхню?
7. Користуючись принципом суперпозиції, знайдіть у полі двох точкових зарядів +Q та +2Q, що знаходяться на відстані l один від одного, точку, де напруженість поля дорівнює нулю.
8. В чому полягає фізичний зміст теореми Гауса для електростатичного поля у вакуумі?

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. (§§ 62-65, 68-69).

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. (§§ 99-103).

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. (§§ 77-81).