

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІ-
ШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки, електричні вимірювання та їх стандарти-
зація»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 1 - Основні закони та положення електродинаміки

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного уні-
верситету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

Розробник: викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Електростатика
2. Потік вектору напруженості електричного поля
3. Теорема Гауса
4. Робота сил електростатичного поля для двох точкових зарядів
5. Потенціал
6. Циркуляція вектору напруженості електричного поля
7. Зв'язок між напруженістю електростатичного поля і потенціалом
8. Еквіпотенційні поверхні, їх зв'язок з силовими лініями

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна:

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків : Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

Допоміжна:

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

Текст лекції

1 Електростатика

Електростатика – розділ електродинаміки, який вивчає електрично заряджені тіла, що перебувають у стані спокою.

Електричний заряд q – фізична величина, що визначає інтенсивність електромагнітних взаємодій, тобто є кількісною мірою здатності фізичних тіл до електромагнітної взаємодії. Одиницею виміру є Кулон $[q] = 1\text{Кл}$.

Елементарний заряд $\bar{e} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{Кл}$, – мінімальний електричний заряд, яким володіють протони $q_p = +e$ та електрони $q_e = -e$. Таким чином, заряд будь-якого тіла є кратним елементарному заряду $q = \pm n\bar{e}$.

Закон збереження електричного заряду: у замкненій системі алгебраїчна сума зарядів всіх частинок є сталою.

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

Електричні заряди одного знаку відштовхуються, а різного – притягуються.

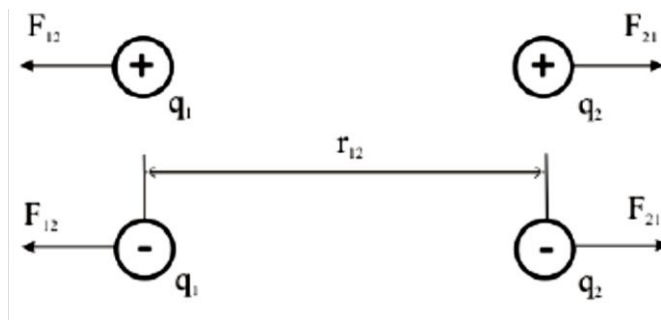


Рисунок 1 – Взаємодія точкових електричних зарядів

За розподілом у просторі заряди бувають чотирьох видів:

- *точкові* – якщо розміри заряджених тіл є набагато меншими за відстані між ними;
- *лінійні* – розподіляються вздовж нескінченно тонкого тіла довільної довжини і характеризуються лінійною щільністю заряду $\sigma_l [\text{Кл/м}]$;
- *поверхневі* – розподіляються в нескінченно тонкому шарі біля поверхні тіла і характеризуються поверхневою щільністю заряду $\sigma_s [\text{Кл/м}^2]$;
- *об'ємні* – розподіляються у об'ємі тіла і характеризуються об'ємною щільністю заряду $\sigma_v [\text{Кл/м}^3]$.

Сила взаємодії двох точкових зарядів визначається *законом Кулона*:

$$\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r}.$$

Сила взаємодії двох точкових зарядів пропорційна величині взаємодіючих зарядів, зворотно пропорційна квадрату відстані між ними і спрямована вздовж лінії, що з'єднує заряди. Сила є величиною векторною.

Модуль вектора кулонівської сили

$$|\vec{F}| = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \quad (1)$$

де $|q_1|$ та $|q_2|$ – модулі величин взаємодіючих зарядів;

r – відстань між ними.

Коефіцієнт пропорційності k :

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

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – електрична стала

ϵ – відносна діелектрична проникність середовища.

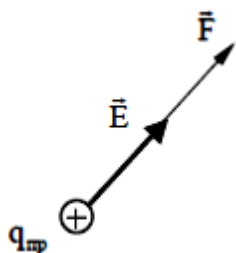
\vec{r}_{12} – радіус-вектор, проведений з точки, де знаходиться другий заряд, у точку, де знаходиться перший.

Електричне поле характеризується вектором напруженості електричного поля, який є силовою характеристикою поля і визначається за формулою

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_q}{q},$$

де \vec{F}_q – сила, що діє з боку електричного поля на позитивний точковий заряд q (рис. 1.2).

Рисунок 2



Тобто *напруженість електричного поля* визначається як сила, що діє з боку поля на одиничний позитивний електричний заряд. $[\vec{E}] = 1\text{В/1м}$.

Принцип суперпозиції електричних полів стверджує, що напруженість електричного поля системи зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створених кожним зарядом окремо:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i.$$

Графічне зображення електричних полів – за допомогою ліній напруженості (силових ліній поля). *Лінія напруженості* – це лінія, дотична до якої у кожній точці збігається з напрямом напруженості електричного поля у даній точці. Лінії напруженості виходять з позитивних зарядів і йдуть у безкінечність або закінчуються на негативному заряді.

Щільність ліній пропорційна модулю напруженості поля.

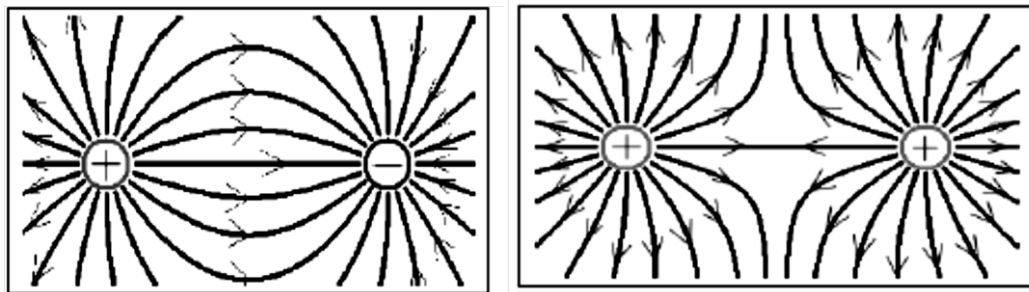


Рисунок 3 – Приклади побудови силових ліній електричного поля двох точкових зарядів

2. Потік вектору напруженості електричного поля

Елемент площі ΔS має бути настільки малим, щоб у його межах вектор \vec{E} можна було б вважати постійним. Орієнтація площадки визначається вектором одиничної нормалі \vec{n} до неї (перпендикуляр до площадки).

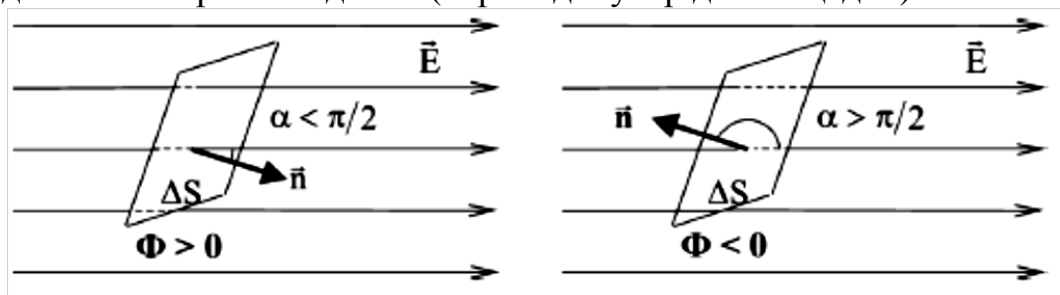


Рисунок 4 – До визначення потоку вектора напруженості електричного поля

Потік вектора \vec{E} через площадку ΔS за визначенням дорівнює

$$\Delta\Phi = E \Delta S \cos \alpha, \quad \text{В} \times \text{м} \quad (2)$$

де α – кут між векторами \vec{n} і \vec{E} .

Якщо ввести позначення $E_n = E \cos \alpha$ – проекція вектору \vec{E} на напрямок нормалі \vec{n} та $\Delta S_n = \Delta S \cos \alpha$ – проекція ΔS на площину, перпендикулярну вектору \vec{E} , то вираз (1.2) можна записати у наступному вигляді:

$$\Delta\Phi = E_n \Delta S = E \Delta S_n = (\vec{E} \cdot \vec{n}) \Delta S. \quad (3)$$

Якщо є велика поверхня, в межах якої значення $|\vec{E}|$ і напрямок \vec{E} можуть змінюватись, поверхню слід розбити на елементи, кожен з яких можна вважати елементом площини, в межах якого \vec{E} є сталою. Тоді в межах кожного такого елемента справедливою буде формула (1.3), а потік через всю поверхню буде дорівнювати, приблизно, сумі потоків через окремі елементи

$$\Phi \approx \sum_{i=1}^N \Delta\Phi_i = \sum_{i=1}^N (\vec{E}, \vec{n}) \Delta S.$$

Якщо кількість елементів розбиття устроїти в безкінечність (а площу елемента – до нуля), вираз для потоку перейде в інтеграл

$$\Phi = \int_S E_n ds.$$

3. Теорема Гауса

Визначимо потік вектору напруженості електричного поля через замкнену сферичну поверхню, а в центрі знаходиться точковий заряд q . Визначимо *напруженість електричного поля точкового заряду*.

Вектор нормалі до сферичної поверхні співпадає з напрямком радіусу сфери, тому у даному випадку потік дорівнює

$$\Phi = \oint E_n ds = \oint \frac{F}{q_n} ds = \oint \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} ds.$$

Інтеграл береться по замкненій поверхні. Оскільки на поверхні сфери $r = \text{const}$, то потік

$$\Phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \oint ds.$$

Площа сфери

$$\oint ds = 4\pi r^2.$$

Тоді потік дорівнюватиме

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

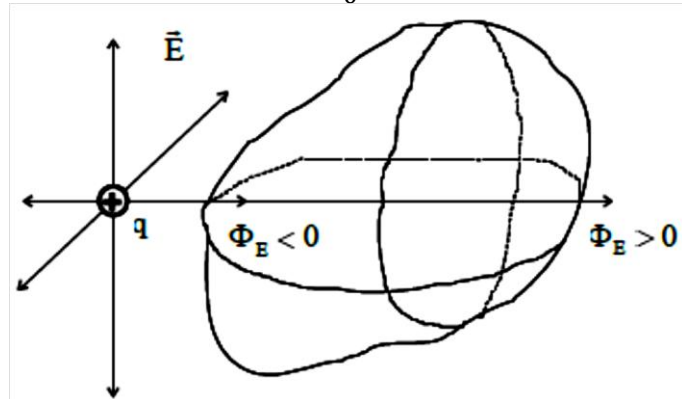


Рисунок 5 – До визначення потоку вектора напруженості електричного поля, створеного зарядом, який знаходиться поза замкненою поверхнею

Якщо заряд знаходиться поза замкненою поверхнею, то потік вектору напруженості, створений цим зарядом, дорівнюватиме нулю, оскільки кожна силова лінія двічі перетинатиме поверхню: один раз. Коли силова лінія входить у об'єм, обмежений поверхнею, її враховують із знаком «+», другий, коли вона виходить – зі знаком «-» (див рис. 5).

Відповідно, $\Phi = 0$, якщо всередині замкненої поверхні заряд $q = 0$.

Теорема Гауса: потік вектору напруженості електричного поля через будь-яку замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, що знаходяться всередині поверхні, поділений на електричну сталу ϵ_0 :

$$\Phi = \oint E_n ds = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i. \quad (8)$$

4. Робота сил електростатичного поля для двох точкових зарядів

Якщо в електричному полі точкового заряду q з точки 1 в точку 2 довільної траєкторії переміщується інший точковий заряд q' , на який діятиме сила, яка здійснює роботу. Робота сили F по переміщенню тіла на відстань dl дорівнює

$$dA = F dl \cos \alpha.$$

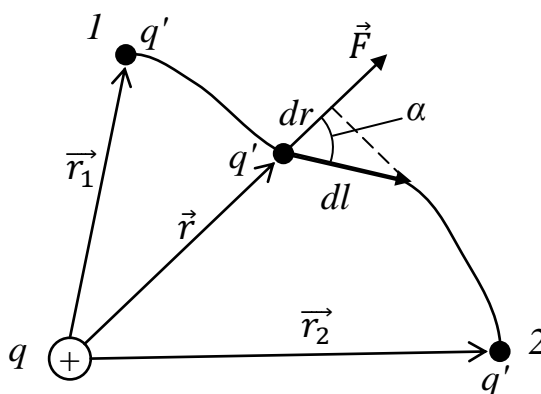


Рисунок 6 – До визначення роботи сил електростатичного поля

З рис. 6 видно, що $dl \cos \alpha = dr$. Підставляючи у вираз для роботи значення модулю сили Кулона і $dl \cos \alpha = dr$, одержимо

$$dA = F dl \cos \alpha = F dr = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr.$$

Робота на всьому шляху від точки 1 до точки 2 визначається інтегралом від dA в границях від r_1 до r_2 :

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_2}. \quad (9)$$

5 Потенціал

З виразу (9) видно, що робота залежить лише від початкового r_1 та кінцевого r_2 положення заряду і не залежить від форми траєкторії, тобто електростатичні сили є силами **консервативними**, і роботу, здійснену такими силами, можна представити різницею потенційних енергій заряду у точках 1 та 2, тобто

$$A_{12} = W_{п1} - W_{п2} = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (10)$$

Потенційна енергія взаємодії двох точкових зарядів у вакуумі визначається наступною формулою:

$$W_{п} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r} = q'\varphi(r). \quad (11)$$

де $\varphi(r)$ – потенціал поля точкового заряду, який залежить від величини першого заряду q та відстані від точки, в якій знаходиться другий заряд:

$$\varphi(r) = \frac{W_{п}}{q'} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (12)$$

Одиницею потенціалу у системі СІ є вольт ($V = Дж/Кл$):

Потенційна енергія $W_{п}$ заряду q' у полі, що створено системою N точкових зарядів:

$$W_{п} = \sum_{i=1}^N \frac{q_i q'}{4\pi\epsilon_0 r_i} = q' \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i} = q' \varphi, \quad (13)$$

де r_i – відстань між зарядом з номером i і пробним зарядом q' ,

φ – потенціал поля, створеного системою з N точкових зарядів:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i} = \sum_{i=1}^N \varphi_i. \quad (14)$$

Формула являє собою **принцип суперпозиції для потенціалу електростатичного поля**: потенціал поля системи зарядів дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, що створюються кожним з зарядів окремо.

6. Циркуляція вектору напруженості електричного поля

З формули (10) маємо, що переміщенні заряду у електричному полі за замкненою траєкторією робота, яку здійснюють сили поля, дорівнюватиме нулю, оскільки при поверненні тіла у вихідну точку $\varphi_2 = \varphi_1$ і, відповідно $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$.

Виразимо роботу A_{12} через напруженість електричного поля, для чого у формулу для визначення роботи

$$A_{12} = \int_1^2 F \cos \alpha \, dl \quad (15)$$

необхідно підставити $F = qE$.

У формулі (15) переміщення заряду позначене через dl . Після підставлення одержимо:

$$A_{12} = \int_1^2 qE \cos \alpha \, dl = q \int_1^2 E_l \, dl, \quad (16)$$

де $E_l = E \cos \alpha$ – проекція вектору напруженості поля на напрямок вектору $d\vec{l}$.

Якщо траєкторія буде замкненою, то з (16) і (10) матимемо:

$$\oint E_l \, dl = 0. \quad (17)$$

Інтеграл по замкнутому контуру виду (1.17) називають циркуляцією вектору \vec{E} . Отже, **циркуляція вектору \vec{E} електростатичного поля**, обчислена за будь-яким замкненим контуром, дорівнює нулю.

Ця властивість є загальною для всіх полів консервативних сил (потенційних полів).

7. Зв'язок між напруженістю електростатичного поля і потенціалом

Напруженість і потенціал характеризують один і той же фізичний об'єкт – електричне поле. Напруженість – це силова характеристика, потенціал – енергетична. Роботу dA сил електростатичного поля можна виразити через напруженість \vec{E} :

$$dA = \vec{F} d\vec{l} = q\vec{E} d\vec{l}$$

і через потенціал:

$$dA = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q(\varphi_1 - (\varphi_1 + d\varphi)) = -qd\varphi.$$

Прирівнюючи праві частини цих формул, скорочуючи на q і розписуючи скалярний добуток $(\vec{E} d\vec{l})$ через компоненти, одержимо

$$E_x dx + E_y dy + E_z dz = -d\varphi. \quad (18)$$

Покладаючи у (1.30) $dy = dz = 0$, одержимо

$$E_x = - \left. \frac{d\varphi(x, y, z)}{dx} \right|_{y, z = \text{const}} = - \frac{\partial \varphi}{\partial x}. \quad (19)$$

У (19) похідну від потенціалу – функції трьох змінних x, y, z – беремо за умови, що аргументи y та z функції $\varphi(x, y, z)$ при взятті похідної за аргументом x вважаються сталими. Тобто беремо часткову похідну.

За аналогічних міркувань матимемо:

$$E_y = - \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad E_z = - \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (19, a)$$

Для вектору \vec{E} з (19) та (19, a) маємо:

$$\vec{E} = - \left(\vec{e}_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right). \quad (20)$$

Введемо позначення

$$\vec{\nabla} \equiv \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z}. \quad (21)$$

Введений математичний об'єкт $\vec{\nabla}$ називають оператором градієнту, або вектору набла.

Тоді формулу (20) можна записати у компактному вигляді

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi. \quad (22)$$

8. Еквіпотенційні поверхні, їх зв'язок з силовими лініями

Для наочного зображення електричного поля поряд із лініями напруженості застосовують еквіпотенційні поверхні.

Еквіпотенційні поверхні – це поверхні однакового потенціалу. Отже, рівняння еквіпотенційної поверхні матиме вигляд

$$\varphi(x, y, z) = \text{const}.$$

Форма еквіпотенційних поверхонь зв'язана з формою силових ліній: *еквіпотенційні поверхні розміщені таким чином, що у кожній точці простору силова лінія і еквіпотенційна поверхня взаємно перпендикулярні.*

Якщо домовитись проводити еквіпотенційні поверхні так, щоб різниця потенціалів двома сусідніми поверхнями була однаковою, то по щільності еквіпотенційних поверхонь можна судити про напруженість поля. Вектор напруженості буде спрямованим в бік зменшення потенціалу.

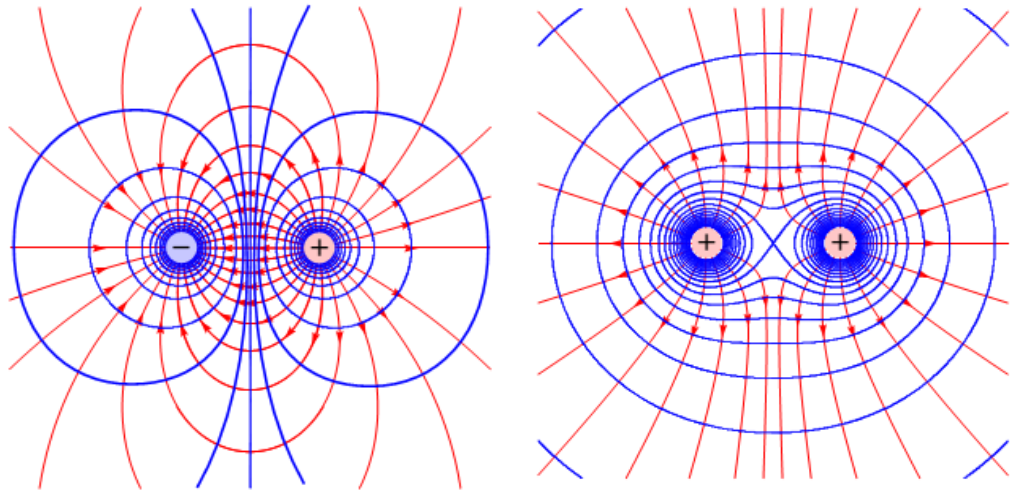


Рисунок 7 – Еквіпотенційні поверхні та лінії напруженості

Якщо еквіпотенційну поверхню розрізати площиною, то у перерізі одержимо лінії однакового потенціалу, еквіпотенційні лінії.