

ПЛАН-КОНСПЕКТ ПРОВЕДЕННЯ

ЛЕКЦІЙНОГО ЗАНЯТТЯ №11

МОДУЛЬ 2.

ТЕМА 2.1. ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ. ЕЛЕКТРОСТАТИКА.

Заняття 1. Векторний та скалярний опис поля нерухомих електричних зарядів у вакуумі.

Навчальна дисципліна: Фізика

Категорія здобувачів вищої освіти: курсанти та студенти.

Навчальна мета: оволодіти знаннями про основні властивості та закономірності електростатичної взаємодії.

Виховна мета: сприяти підвищенню рівня знань про основні форми руху матерії, формуванню наукового світогляду.

Розвивальна мета: розвивати інтелектуальні здібності, пам'ять, увагу, уяву, мислення, спостережливість, активність, творчість, самостійність здобувачів вищої освіти, прищеплювати їм раціональні способи пізнавальної діяльності з зазначеної теми.

Кількість аудиторних годин: 2 години.

Навчальне обладнання, ТЗН: відеопроєктор, комп'ютерна техніка та відповідне програмне забезпечення.

Наочні засоби: наочність викладення матеріалу забезпечується використанням схем, таблиць та мультимедійним супроводженням окремих питань теми.

Міжпредметні та міждисциплінарні зв'язки: Дисципліна "Фізика" зв'язана з дисципліною "Вища математика" та в ряду інших є основою для вивчення дисциплін загальної підготовки: «Хімія», «Технічна механіка», «Матеріалознавство та технологія матеріалів», «Технічна механіка рідини та газу», а також дисциплін циклу професійної підготовки: «Термодинаміка та теплопередача», «Електротехніка та пожежна профілактика в електроустановках», «Пожежна та виробнича автоматика», «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі», які викладаються як правило пізніше. Знання з дисципліни «Фізика» та одержані навички і уміння дозволять створити якісну базу для вивчення теоретичних і практичних питань вказаних дисциплін.

План лекції (навчальні питання):

2.1.1. Електричний заряд та його властивості. Закон збереження електричного заряду. Закон Кулона.

2. 1.2 Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції.

2.1.3. Робота сил електростатичного поля. Потенціальний характер електростатичного поля, потенціал. Зв'язок між напруженістю та потенціалом.

Список рекомендованих джерел:

Основні джерела

1. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики. Т. 1. – Київ: Техніка, 1999.
2. Савельєв И. В. Курс общей физики. Т. 1-4. М. : КноРус, 2009.
3. Горбачук І.Т. Загальна фізика (збірник задач). Київ: Вища школа, 1993.
4. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: Профессия, 2010.
5. Фізика. Розділи: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний електричний струм: довідник / Укладачі: В. Г. Борисенко, Ю.Ф. Деркач, В.І. Кривцова, К.Р. Умеренкова. – Х.: НУЦЗУ, 2018. – 94 с.
6. Фізика. Розділи: Магнітне поле. Електромагнетизм. Коливання, хвилі і хвильові явища. Елементи квантової механіки. Фізика атома і атомного ядра. Елементи фізики твердого тіла: довідник./ Укладачі: В. Г. Борисенко, Ю.Ф. Деркач, В.І. Кривцова, К.Р. Умеренкова. – Х.: НУЦЗУ, 2018. – 122 с.

Додаткові джерела

7. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике. М. : Мир и образование., 2006.

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

2.1.1. Електричний заряд та його властивості. Закон збереження електричного заряду. Закон Кулона.

Електрична взаємодія є складовою частиною фундаментальної електромагнітної взаємодії. Електрична взаємодія здійснюється за допомогою *електричного поля*. Джерелом цього поля є *електричні заряди*, які властиві частинкам, що складають речовину. *Електричний заряд змінює властивості навколишнього простору так, що, що на поміщений у цей простір інший електричний заряд діє певна сила*. В цьому випадку кажуть, що навколо електричного заряду *створюється електричне поле*

Фундаментальні властивості електричного заряду. Електричні заряди існують у вигляді двох типів – *позитивні (+) і негативні (-)*. Однойменні заряди (+ +) і (- -) відштовхуються, різнойменні заряди (+ -) притягуються. Електричний заряд *інваріантний* (не залежить) *щодо системи відліку*, тобто його величина залишається сталою незалежно від того, рухається заряд чи знаходиться в стані спокою. Електричний заряд *дискретний*, тобто в природі існує мінімальний за величиною заряд, який має назву *елементарного заряду* і позначається символом e . У СІ за одиницю електричного заряду прийнятий кулон (Кл) – електричний заряд, що проходить через поперечний переріз провідника за час 1 с за сили струму в 1А. Експериментально встановлено, що елементарний заряд $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл. Отже, довільний заряд q будь-якого тіла є цілим кратним елементарному заряду і може бути записаний у вигляді

$$q = \pm Ne, \quad (2.1.1.1)$$

де N – будь-яке ціле число. Носіями елементарного заряду є електрони, протони і деякі інші частинки.

Закон збереження заряду: в електрично ізольованій системі алгебраїчна сума електричних зарядів залишається постійною, тобто

$$\sum q = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}. \quad (2.1.1.2)$$

Наслідком цього закону є те, що електричні заряди можуть народжуватися й зникати тільки попарно: народження заряду одного знаку супроводжується народженням заряду протилежного знаку, зникнення заряду одного знаку супроводжується зникненням заряду протилежного знаку.

Кількісно взаємодія нерухомих електричних зарядів визначена для *точкових зарядів*, тобто зарядів, що зосереджені на тілах, геометричними розмірами яких можна знехтувати у порівнянні з відстанню між зарядженими тілами.

Закон Кулона. Сила взаємодії F між двома нерухомими точковими зарядами q_1 і q_2 у вакуумі пропорційна величині зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані r між ними і спрямована по прямій, що з'єднує заряди (рис. 2.1.1.1)

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1.1.3)$$

де $k = 9 \cdot 10^9$ м/Ф – коефіцієнт пропорційності в системі СІ, а $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала.

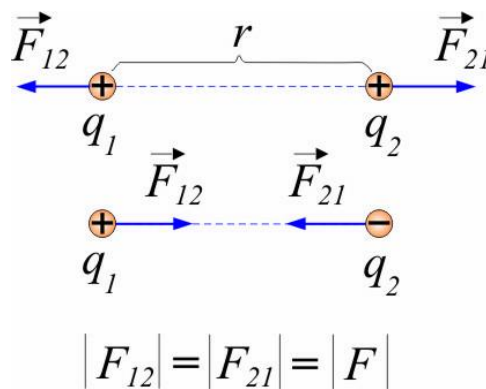


Рис. 2.1.1.1

Якщо заряди перебувають в однорідному, ізотропному діелектричному середовищі, то закон Кулона має вигляд

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}, \quad (2.1.1.4)$$

де ϵ – діелектрична проникність середовища. За величиною $\epsilon \geq 1$ і показує, в скільки разів електрична взаємодія у даному середовищі менше, ніж у вакуумі.

2.1.2. Електростатичне поле. Напруженість електростатичного поля. Принцип суперпозиції.

Електростатичне поле – це поле, що створене нерухомими електричними зарядами. Силовою (векторною) характеристикою цього поля є *вектор напруженості* \vec{E} електростатичного поля, який дорівнює *силі, що діє на одиничний позитивний заряд, поміщений у дану точку поля*, тобто

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (2.1.2.1)$$

де \vec{F} – сила, яка діє на точковий заряд q , поміщений у дану точку поля.

Графічно електричне поле зображується за допомогою *силових ліній (ліній напруженості)*. Силова лінія – це лінія, у кожній точці якої вектор напруженості \vec{E} спрямований по дотичній до неї. Силові лінії починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних, що дало привід назвати електричні заряди *джерелами* електричного поля. Щоб характеризувати розподіл поля в просторі не тільки за напрямком, а і за величиною напруженості, умовилися проводити силові лінії так, щоб кількість ліній, які проходять через одиничну площу нормальну до напрямку ліній, чисельно дорівнювала значенню напруженості в цій області поля.

Однорідним називається поле, у кожній точці якого вектор напруженості \vec{E} однаковий за модулем і напрямком. Силові лінії такого поля паралельні вектору напруженості і щільність їх однакова.

Напруженість електростатичного поля точкового заряду q на відстані r від нього визначається співвідношенням

$$E = k \frac{q}{\epsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2}. \quad (2.1.2.2)$$

Силові лінії поля точкового заряду починаються або закінчуються (залежно від знаку) на точковому заряді і спрямовані радіально. На рис. 2.1.2.1 зображені силові лінії позитивного (рис.2.1.2.1, *а*) і негативного (рис. 2.1.2.1, *б*) зарядів. Як впливає з рис.2.1.2.1 поле точкового заряду є неоднорідним.

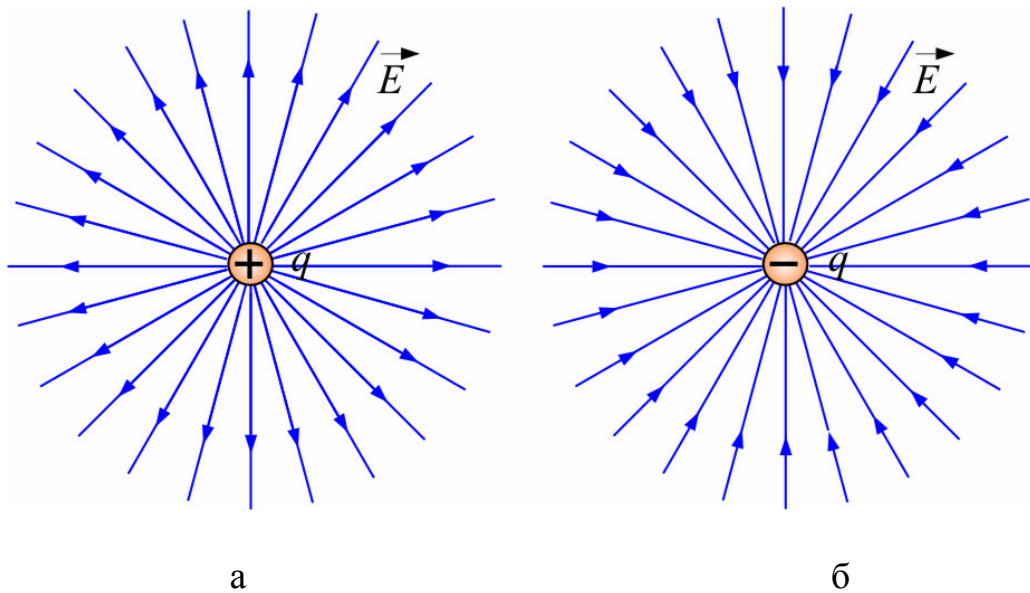


Рис. 2.1.2.1

Якщо електростатичне поле утворюється сукупністю зарядів, то їх результуюче поле визначається за *принципом суперпозиції* електричних полів:

напруженість електричного поля \vec{E} , яке створюється системою зарядів, дорівнює векторній сумі напруженостей \vec{E}_i полів, які створюються кожним зарядом окремо, тобто

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (2.1.2.3)$$

Приклад знаходження за допомогою принципу суперпозиції вектора напруженості \vec{E} електричного поля, що створюється в точці A двома різнойменними зарядами q_1 і q_2 наведений на рис. 2.1.2.2.

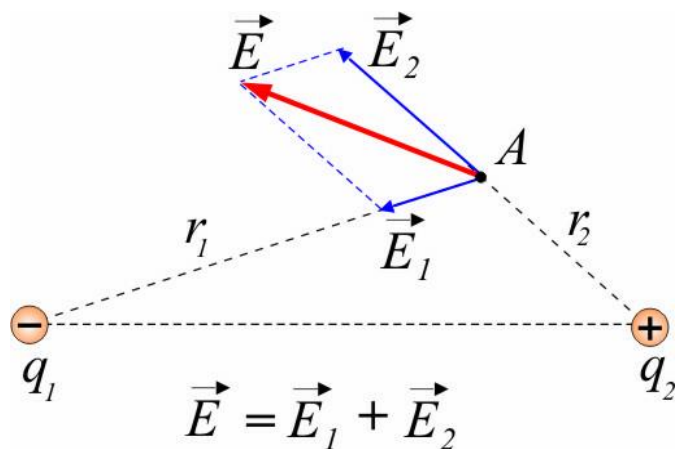


Рис. 2.1.2.2

Електричний диполь – це система двох рівних за модулем різнойменних точкових зарядів, відстань між якими значно менше відстані до точок поля, що розглядаються. Пряма, що проходить через обидва заряд називається віссю диполя. Характеристиками диполя є: *плече диполя* – вектор, проведений від негативного заряду до позитивного, який за модулем дорівнює відстані між зарядами і *електричний дипольний момент* – вектор, що дорівнює добутку плеча на модуль одного із зарядів, тобто

$$\vec{p} = |q| \vec{\ell}. \quad (2.1.2.4)$$

Якщо помістити диполь в електричне поле, то на нього буде діяти пара сил, яка прагне повернути його так, щоб *вектор* \vec{p} *був паралельний вектору* \vec{E} .

2.1.3. Робота сил електростатичного поля. Потенціальний характер електростатичного поля, потенціал. Зв'язок між напруженістю та потенціалом.

Якщо точковий заряд q' переміщується у вакуумі в полі заряду q (рис. 2.1.3.1) за довільною траєкторією, то *елементарна робота* dA , що

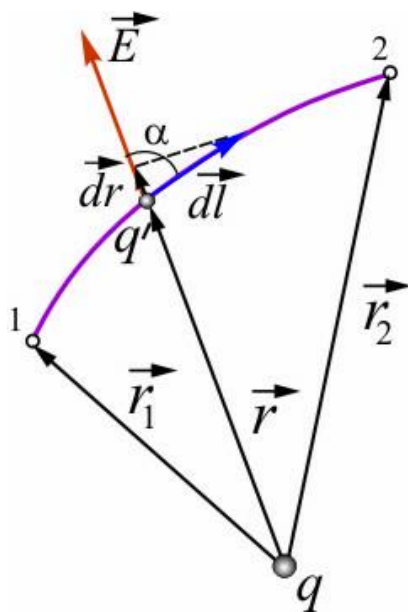


Рис. 2.1.3.1

виконана на довільному переміщенні дорівнює

$$dA = \vec{F} d\vec{l} = F dl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} dr \quad (2.1.3.1)$$

де $dr = dl \cos \alpha$. Робота переміщення заряду q' з початкового положення 1 у кінцеве положення 2

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} d\vec{l} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{qq'}{r_1} - \frac{qq'}{r_2} \right), \quad (2.1.3.2)$$

тобто робота A_{12} не залежить від форми траєкторії заряду, а визначається тільки початковим і кінцевим положеннями заряду. Тому електростатичне поле є потенційним (консервативним), а електростатичні сили – потенційними (консервативними).

Якщо переміщення відбувається в однорідному ізотропному середовищі, то робота A_{12} дорівнює

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{qq'}{r_1} - \frac{qq'}{r_2} \right). \quad (2.1.3.3)$$

Теорема про циркуляцію. З (2.1.3.3) випливає, що робота при переміщенні заряду в зовнішньому електростатичному полі по довільному замкненому контуру L буде дорівнювати нулю, тобто

$$\oint_L dA = 0. \quad (2.1.3.4)$$

Оскільки на заряд q' діє сила $\vec{F} = q'\vec{E}$, де \vec{E} напруженість електричного поля заряду q , то з рівності (3.1.3.4) випливає, що

$$A_{12} = q' \oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0. \quad (2.1.3.5)$$

Вираз $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_t dl$ називається *циркуляцією* вектора напруженості.

З (2.1.3.5) випливає *теорема про циркуляцію* вектора \vec{E}

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0, \quad (2.1.3.6)$$

тобто *циркуляція вектора напруженості електростатичного поля по замкненому контуру дорівнює нулю.*

Заряд в електростатичному полі має потенційну енергію. З (2.1.3.3) випливає, що потенційна енергія точкового заряду q' в поле заряду q буде дорівнювати

$$W_{\text{п}} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{qq'}{r} + \text{const}. \quad (2.1.3.7)$$

Константа в (2.1.3.7), як правило, вибирається так, щоб при переміщенні заряду на нескінченність ($r \rightarrow \infty$) потенційна енергія дорівнювала нулю. При такому виборі початку відліку потенційної енергії $\text{const} = 0$ і тоді

$$W_{\text{п}} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{qq'}{r}. \quad (2.1.3.8)$$

З (2.1.3.8) випливає, що відношення $W_{\text{п}}/q'$ не залежить від величини внесеного в поле заряду q' і характеризує електричне поле заряду q на відстані r від нього. Це відношення використовується як енергетична характеристика електричного поля і називається *потенціалом*. Отже, *потенціал електростатичного поля* в даній точці простору – це величина, що чисельно дорівнює потенційній енергії одиничного позитивного заряду в даній точці поля.

$$\varphi(r) = \frac{W_{\text{п}}}{q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r}. \quad (2.1.3.9)$$

Просторово початок відліку потенціалу збігається з початком відліку потенційної енергії.

Використовуючи поняття потенціалу, роботу переміщення заряду q' в полі заряду q можна виразити через різницю потенціалів у початковій і кінцевій точках траєкторії

$$A_{12} = q'(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (2.1.3.10)$$

Одиницею потенціалу в СИ служить 1 вольт (В) – потенціал такої точки поля, для переміщення в яку з нескінченності заряду в 1 Кл необхідно виконати роботу в 1 Дж.

Графічно електричне поле зображується й за допомогою *еквіпотенціальних поверхонь (ліній)*, що уявляють собою *геометричне місце точок, що мають однаковий потенціал*. Еквіпотенціальні поверхні (лінії), перпендикулярні лініям вектора \vec{E} .

У загальному випадку між потенціалом q' і напруженістю \vec{E} існує інтегральний зв'язок

$$\varphi(\vec{r}) = \int_{\vec{r}}^{\vec{r}_0} \vec{E} d\vec{r}, \quad (2.1.3.11)$$

де інтеграл береться уздовж довільної траєкторії від даної точки (з радіусом-вектором \vec{r}) до тієї точки, де потенціал прийнятий рівним нулю (з радіус-вектором \vec{r}_0).

Між потенціалом і напруженістю існує диференційний зв'язок

$$d\varphi = -\vec{E}d\vec{r}. \quad (2.1.3.12)$$

Звідси випливає, що напруженість поля є градієнтом потенціалу з протилежним знаком

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right). \quad (2.1.3.13)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні орти декартової системи координат. Знак мінус в (2.1.3.13) означає, що вектор напруженості \vec{E} спрямований в напрямку найбільш швидкого зменшення потенціалу. Це демонструє рис. 2.1.3.2 на якому потенціал збільшується в напрямку до заряду (напрямок градієнту), а напруженість \vec{E} спрямована в протилежному напрямі.

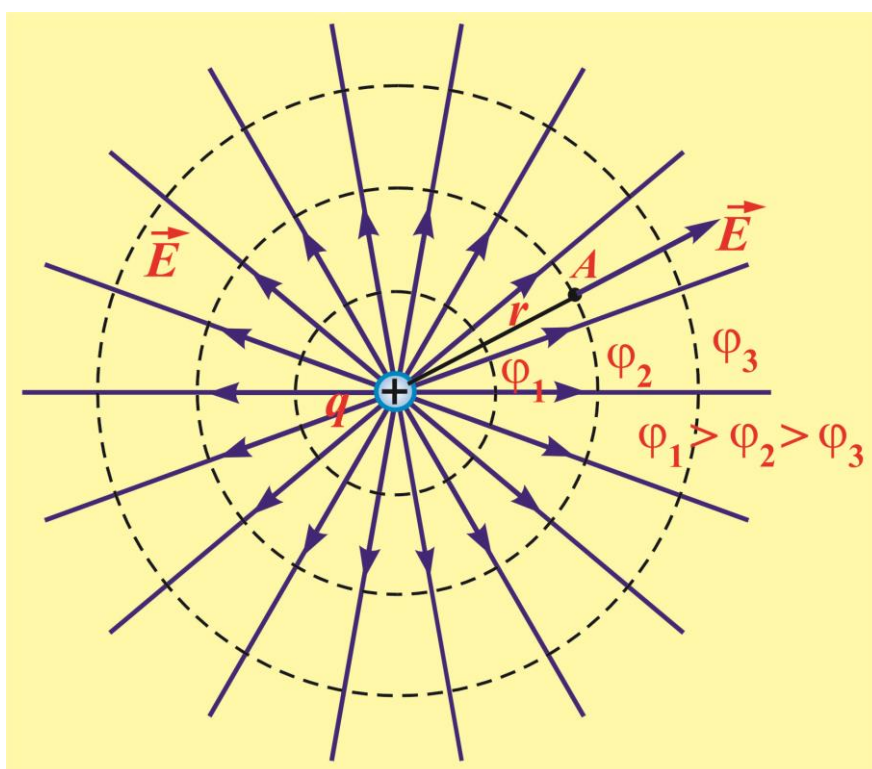


Рис. 2.1.3.2

Для потенціалів має місце *принцип суперпозиції*: потенціал поля φ , яке утворюється системою електричних зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів φ_i , які створюються в даній точці кожним зарядом окремо:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n. \quad (2.1.3.14)$$

Потенціал поля, яке створюється *рівномірно зарядженою сферою*, має вигляд

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon R} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{\varepsilon R}, \quad (\text{при } r \leq R); \quad (2.1.3.15)$$

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{\varepsilon r}, \quad (\text{при } r \geq R), \quad (2.1.3.16)$$

де R – радіус сфери, q – заряд сфери, r – відстань від центру сфери до точки поля в якій визначається потенціал. Формули (2.1.3.15) і (2.1.3.16) описують внутрішню й зовнішню області сфери відповідно.

В однорідному полі ($\vec{E} = \text{const}$) *різниця потенціалів* між двома точками дорівнює

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \vec{E} \cdot \vec{\ell} = E\ell \cos \alpha \quad (2.1.3.17)$$

де $\vec{\ell}$ – вектор, що з'єднує початкову і кінцеву точки; α – кут між векторами $\vec{\ell}$ і \vec{E} .