

Тема № 1. Провідники і діелектрики.

1. Провідники в електричному полі.
2. Електроємність. Конденсатори.
3. Енергія електростатичного поля.
4. Поляризація діелектриків. Діелектрична сприйнятливість та проникність.

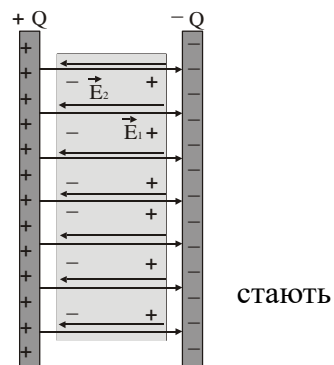
1. Провідники в електричному полі.

Характерною особливістю провідників є те, що в них є велика кількість рухомих носіїв зарядів, тобто вільних електронів (або іонів), які образно кажучи, в провіднику рухаються хаотично. Однак, якщо такий провідник помістити в зовнішнє електричне поле, то під впливом дії електричних сил вільні електрони будуть переміщатися в ньому в напрямку, протилежному напрямку напруженості поля. Тому на кінцях провідника виникнуть різнойменні заряди: негативний, де будуть зайві електрони, і позитивний, де електронів не вистачає. Таким чином, провідник в електричному полі електризується. Таку електризацію називають **електризацією через вплив, або електростатичною індукцією.**

Внаслідок перерозподілу в провіднику зарядів в середині нього виникає електричне поле з напруженістю рівною напруженості зовнішнього поля, але протилежно направлено до нього. В результаті напруженість, а значить і різниця потенціалів всередині провідника, рівними нулю. Тоді для будь-яких двох точок всередині провідника справедливе співвідношення: $U_1 - U_2 = 0$, тобто $U_1 = U_2$.

Таким чином, незалежно від того, в який спосіб наелектризовано провідник, **при рівновазі зарядів поля всередині провідника немає, а потенціал всіх точок провідника однаковий.**

Досвід показує, що при будь-якій електризації провідника електричні заряди розподіляються на його поверхні, а всередині порожнини замкнутого провідника електричне поле відсутнє. На цьому ґрунтується так званий електростатичний захист, або екранування від електростатичних полів, утворених зовнішніми електричними зарядами.

**2. Електроємність. Конденсатори.**

Досвід показує, що величина заряду q , набутого провідником, прямопропорційна його потенціалу :

$$q = CU, \quad (10.1)$$

де C – коефіцієнт пропорційності і називається **електроємністю** або просто **ємністю** провідника. Отже

$$C = \frac{q}{U}. \quad (10.2)$$

Таким чином, **електричною ємністю провідника називають фізичну величину, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що змінює його потенціал на одиницю:**

В SI електроємність вимірюють в **фарадах** (Φ).

Один фарад – це електроємність такого провідника, якому для підвищення потенціалу на 1 В необхідно надати заряд в 1 Кл.

Один фарад дуже велика ємність для конденсаторів звичайних розмірів, тому на практиці користуються, як правило, меншими одиницями, зокрема, **мікрофарадом** ($мк\Phi$) і **пікофарадом** ($п\Phi$):

$$1 \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \Phi, \quad 1 \text{ п}\Phi = 10^{-12} \Phi.$$

Оскільки заряди розміщуються на зовнішній поверхні провідника, то ємність не залежить ні від маси, ні від матеріалу провідника, а залежить від його форми і розмірів та діелектричних властивостей навколишнього середовища, а також наявності поблизу провідника інших провідників.

Ємність сфери визначається формулою:

$$C = \frac{q}{U} = 4\pi\epsilon_0 R, \quad (10.3)$$

де $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}$, R – радіус сфери.

Конденсатор – це пристрій для накопичення електричного заряду. Він складається з двох провідників, близько розміщених один біля одного. Найпростіший за будовою є **плоский конденсатор**, який складається з двох металевих пластин (обкладинок), розділених діелектриком (діелектриком може бути і шар повітря).

Основною характеристикою конденсатора є його ємність C . Величина ємності залежить від розмірів, форми і взаємного розміщення обкладок, а також від речовини, яка заповнює простір між ними. Будемо вважати поки-що, що між обкладками знаходиться вакуум або повітря (рис. 10.1 (рис. 1.30, Яцура)).

Кожна із обкладок створює електричне поле з напруженістю $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$. Тому результуюча напруженість електричного поля між обкладками дорівнюватиме:

$$E = E_+ + E_- = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 S},$$

де $\sigma = \frac{q}{S}$ – поверхнева густина заряду, S – площа однієї обкладки.

Відповідно, напруженість електричного поля і різниця потенціалів зв'язані співвідношенням:

$$U = Ed = \frac{qd}{\epsilon_0 S}.$$

Тоді для плоского конденсатора

$$\boxed{C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{d}}. \quad (10.4)$$

Справедливість отриманого висновку очевидна: **чим більша площа, тим “вільніше” розмістяться на ній заряди, відштовхування між ними буде менше, і кожна обкладка зможе втримувати більший заряд. Чим більша відстань між обкладками, тим слабше заряди, які знаходяться на різних обкладках, будуть притягатися: на обкладки від джерела поступає менше заряду і ємність виявляється меншою.**

Щоб дістати більшу електроємність, конденсатори з'єднують паралельно. В цьому випадку результуюча ємність зростає і дорівнює сумі ємностей окремих конденсаторів. Наприклад, для трьох паралельно з'єднаних конденсаторів:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (10.5)$$

Разом з тим іноді конденсатори з'єднують послідовно:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (10.6)$$

3. Енергія електростатичного поля.

В зарядженому конденсаторі накопичена (акумулявана) електрична енергія. Очевидно, що ця енергія дорівнює роботі, яка затрачена для зарядки конденсатора. Процес зарядки конденсатора заключається в тому, що заряд з однієї обкладки переноситься на іншу. Робота по перенесенню заряду виконується проти сил поля і чим більший заряд на обкладках, тим більшу потрібно виконати роботу. Якщо на обкладках існує різниця потенціалів U , то робота по переносу заряду dq буде дорівнювати

$$dA = Udq = \frac{q}{C} dq.$$

Тоді

$$A = \int_0^q Udq = \frac{1}{C} \int_0^q qdq = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}. \quad (10.7)$$

Оскільки ця робота дорівнює енергії, акумуляваної конденсатором, то

$$\boxed{W_e = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}}. \quad (10.8)$$

Враховуючи, що $C = \frac{q}{U}$ формулу (10.8) запишемо ще і в таких виглядах:

$$W_e = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} qU = \frac{1}{2} CU^2.$$

4. Поляризація діелектриків. Діелектрична сприйнятливість та проникність.

Як правило простір між обкладками конденсатора заповнюють діелектриком. Це вигідно тим, що діелектрик краще запобігає пробоею конденсатора, ніж повітря, а, значить, до конденсатора можна прикласти більш високу напругу; при наявності діелектрика обкладки можна розмістити ближче одна до одної; при заповненні простору між обкладками конденсатора його ємність збільшується в ε раз, тобто

$$C = \varepsilon C_0, \quad (10.9)$$

де C_0 – ємність конденсатора, між обкладками якого є вакуум, C – ємність конденсатора, простір між обкладками якого заповнений діелектриком. Множник ε називають **відносною діелектричною проникністю середовища**. Для плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}. \quad (10.10)$$

Величину $\varepsilon \varepsilon_0$ називають **абсолютною діелектричною проникністю**.

При внесенні діелектрика між обкладки конденсатора електричне поле між обкладками також змінюється. При відсутності діелектрика напруженість електричного поля між обкладками плоского конденсатора визначається формулою

$$E_0 = \frac{U_0}{d},$$

де U_0 – різниця потенціалів між обкладками, d – відстань між ними. Якщо заряд на обкладках після внесення діелектрика не змінився, то різниця потенціалів впаде до значення

$$U = \frac{U_0}{\varepsilon}.$$

Напруженість електричного поля в діелектрику E_d буде рівна

$$E_d = \frac{U}{d} = \frac{U_0}{\varepsilon d},$$

або

$$E_d = \frac{E_0}{\varepsilon}. \quad (10.11)$$

Таким чином, **напруженість електричного поля в діелектрику також зменшується в ε раз**.

Те що відбувається в діелектрику при внесенні його в електричне поле, можна пояснити з молекулярної точки зору. Якщо молекули діелектрика **полярні**, то електричному полі конденсатора виникне обертовий момент, який старається розвернути молекули-диполі паралельно полю (рис. 10.2, рис. 1.40, Яцура). У випадку, якщо молекули **неполярні**, в електричному полі в них відбудеться розділення заряду, і молекули набудуть індукованого дипольного моменту: електрони, не відриваючись від молекули, змістяться в бік додатної обкладки. В кінцевому рахунку все виглядає так, ніби на кінці діелектрика біля додатної обкладки конденсатора зосереджений результуючий від'ємний заряд, а на протилежному кінці – додатний. Із-за появи на діелектрику цього індукованого заряду електричне поле всередині діелектрика виявиться меншим, ніж повітрі, оскільки електричне поле індукованих заряді направлене назустріч зовнішньому полю.

Для характеристики діелектрика вводять векторну величину – вектор поляризації \vec{P} – дипольний момент одиниці об'єму. Вектор поляризації дорівнює векторній сумі моментів диполів в одиниці об'єму:

$$\vec{P} = \sum \vec{P}_i,$$

де \vec{P}_i – дипольний момент i -ого диполя.

Якщо між обкладками конденсатора знаходиться діелектрик товщиною l , то він володіє дипольним моментом $q_{\text{інд}}l$, де $q_{\text{інд}}$ – заряд наведений на поверхні діелектрика. Тоді

$$|\vec{P}| = \frac{q_{ind}l}{V} = \frac{q_{ind}l}{Sl} = \frac{q_{ind}}{S} = \sigma_{ind}, \quad (10.12)$$

де $V = Sl$ – об'єм діелектрика, S – площа обкладок конденсатора, σ_{ind} – поверхнева густина. Таким чином, величина вектора поляризації дорівнює поверхневій густині наведеного на діелектрику заряду. Вектор поляризації направлений від поверхні з негативним зарядом з однієї сторони діелектрика до поверхні з позитивним зарядом на протилежній стороні діелектрика.

Для широкого кола діелектриків існує пропорційна залежність між поверхневою густиною зв'язаних зарядів і напруженістю поля в діелектрику \vec{E}_d :

$$\sigma_{ind} = \varepsilon_0 \chi E_d. \quad (10.13)$$

Коефіцієнт χ називається **електричною сприйнятливістю речовини**.

Тема № 2. Постійний електричний струм.

1. Електричний струм. Джерела електричного струму. Електрорушійна сила.
2. Сила струму. Закон Ома.
3. Закони Кірхгофа для розгалужених кіл.
4. Паралельне і послідовне з'єднання провідників. (самостійно)
5. Робота і потужність постійного струму. Теплова дія електричного струму.
6. Альтернативні джерела енергії: Сонце, вітер, вода. (самостійно)

1. Електричний струм. Джерела електричного струму. Електрорушійна сила.

Під **електричним струмом** розуміють направлений (впорядкований) рух електричних зарядів.

Електричний струм можна отримати, якщо дві точки електричного поля (або два провідники), між якими існує різниця потенціалів, з'єднати провідником, тоді вільні заряди провідника під дією електричних сил почнуть направлений рух. Додатні заряди будуть рухатися в напрямку силових ліній поля, від'ємні навпаки. Цей рух призведе до вирівнювання потенціалів в точках 1 і 2, і рух зарядів припиниться. Очевидно, що для здійснення тривалого руху зарядів (електричного струму), необхідно підтримувати різницю потенціалів. Пристрій, який створює і підтримує різницю потенціалів, називається **джерелом електричного струму**.

Принцип дії цих пристроїв полягає в тому, що в них за рахунок енергії не електричного походження (механічної – електрогенераторах, енергії хімічних реакцій – в гальванічних елементах і акумуляторах, сонячної – в сонячних батареях) відбувається розділення додатних і від'ємних зарядів і їх переміщення до відповідних полюсів джерела. Як наслідок між полюсами джерела струму створюється електричне поле з певною різницею потенціалів. Таким чином, в результаті розділення всередині джерела додатних і від'ємних зарядів воно накопичує потенціальну енергію, яка згодом витрачається на виконання роботи по переміщенню носіїв заряду по всьому колу. Величина, яка вимірюється роботою джерела струму при переміщенні одиничного додатного заряду замкнутим колом, називається електрорушійною силою (ЕРС):

$$\varepsilon = \frac{A}{q}. \quad (10.14)$$

Вимірюється у вольтах.

Джерела електричного струму характеризуються так званим **внутрішнім опором**, який позначають r .

2. Сила струму. Закон Ома.

Електричний струм характеризується скалярною величиною, яку називають **силою струму**. Сила струму чисельно дорівнює електричному заряду, який проходить через даний поперечний переріз провідника за одиницю часу

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (10.15)$$

Якщо сила струму не змінюється з часом, то такий струм називають **постійним**, тоді:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Сила електричного струму в CI вимірюється в кулонах на секунду (Кл/с). Ця одиниця носить назву ампер (A) на честь французького фізика А. Ампера (1775 – 1836).

Для характеристики напрямку електричного струму у різних точках поверхні і розподілу сили струму по цій поверхні служить вектор густини струму \vec{j} . Сила струму через довільну поверхню S визначається як потік вектора густини струму

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S},$$

де $d\vec{S} = \vec{n}dS$ (\vec{n} – одиничний вектор нормалі до площадки dS).

Таким чином, густиною електричного струму називають вектор \vec{j} , який співпадає з напрямком електричного струму в розглядуваній точці і чисельно дорівнює відношенню сили струму dI через малий елемент поверхні, ортогональної напрямку струму, до площі цього елемента:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}.$$

Для постійного струму, що тече перпендикулярно до перерізу провідника:

$$j = \frac{I}{S}.$$

Закон Ома для ділянки кола

Німецький фізик Г.С.Ом експериментально довів, що сила електричного струму в металевому провіднику прямо пропорційна різниці потенціалів на його кінцях:

$$I \sim U,$$

де U – різниця потенціалів, яку часто, як ми вже відмічали, називають просто напругою. Однак сила струму залежить не тільки від напруги, але і від опору, який провідник чинить електронам. Досвід свідчить, що чим більший опір провідника, тим менша сила струму при даній напрузі. Експериментально встановлено, що сила струму обернено пропорційна опору провідника. З врахуванням цього можна записати, що

$$I = \frac{U}{R}, \quad (10.16)$$

де R – електричний опір ділянки кола

називають його **законом Ома**. Цей закон справедливий лише по відношенню до металевих провідників. Стосовно напівпровідників, електронних ламп, транзисторів тощо він незастосований і тому не відноситься до фундаментальних законів природи.

Опір вимірюється в **омах** (Ом)

Опір провідника залежить від його геометричних розмірів, матеріалу, зовнішніх умов (особливо температури). Експериментально встановлено, що опір металевого провідника прямо пропорційний його довжині і обернено пропорційний площі його поперечного перерізу :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (10.17)$$

де ρ – коефіцієнт пропорційності, який носить назву **питомого опору** і характеризує матеріал, із якого виготовлений провідник.

Закон Ома у диференціальній формі.

У провіднику $E = \frac{U}{l}$ – напруженість електричного поля, $R = \rho \frac{l}{S}$, $j = \frac{I}{S}$. Із закону Ома отримаємо співвідношення:

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l},$$

звідки

$$j = \frac{1}{\rho} E = \gamma E,$$

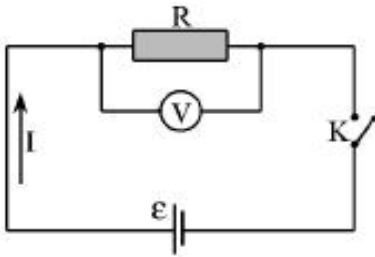
де $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – питома електрична провідність речовини провідника.

У векторній формі співвідношення

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

називається **законом Ома у диференціальній формі**. Цей закон зв'язує густину струму в будь-якій точці всередині провідника з напруженістю електричного поля в цій же точці.

Закон Ома для повного кола



Нехай до джерела електричної енергії з електрорушійною силою приєднано зовнішнє коло, а вольтметр під'єднаний до полюсів джерела (рис.). Якщо ключ K розімкнений, то по колу струм не тече і напруга, яку показує вольтметр, дорівнює $U = \varepsilon$. Якщо коло замкнуте, то по ньому потече струм I , а напруга на полюсах джерела стане меншою за ЕРС. Різниця між ЕРС і U – це напруга, необхідна для переносу заряду через елемент (джерела) і подолання

внутрішнього опору. Значить

$$\varepsilon - U = Ir,$$

Але згідно з $U = IR$. Тоді

$$\varepsilon - IR = Ir,$$

звідки

$$\varepsilon = IR + Ir,$$

або

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (10.18)$$

Останнє співвідношення називають **законом Ома для повного кола**: сила струму в електричному колі з одним джерелом ЕРС прямо пропорційна електрорушійній силі і обернено пропорційна сумі опорів зовнішнього і внутрішнього кіл.

3. Закони Кірхгофа для розгалужених кіл.

Для аналізу складних кіл користуються правилами Кірхгофа. В основі правил лежать закони збереження.

Перше правило Кірхгофа (правило вузлів) виражає збереження заряду. Воно стверджує, що алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі кола, дорівнює нулю.

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0, \text{ або } \sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (10.19)$$

де n – число струмів, що сходяться у вузлі.

Правило вузлів Кірхгофа ґрунтується на законі збереження електричного заряду. **Увесь заряд, що входить у вузол, повинен виходити з нього: заряди не виникають і не зникають.**

Друге правило Кірхгофа (правило контурів) виражає закон збереження енергії. Воно стверджує, що алгебраїчна сума спадів напруг у замкнутому контурі дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, які діють в даному контурі. Тобто

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_i R_i = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_i \quad \text{або} \quad \sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (10.20)$$

де n – число ділянок у замкнутому контурі.

Таким чином, рівняння Кірхгофа (10.19) і (10.20), складені для вузлів і контурів, дозволяють розрахувати струми в складених розгалужених колах. Для цього необхідно: 1) вибрати і вказати на схемі напрямки струмів на всіх ділянках кола; 2) обрати напрямки обходу контуру; 3) записати рівняння першого правила Кірхгофа для всіх вузлів і рівняння другого правила для виділених контурів.

5. Робота і потужність постійного струму. Теплова дія електричного струму.

Електрична енергія може легко перетворюватись в інші види енергій. В електричному колі мірою перетворення енергії електричного поля в інші види енергії є робота електричного струму. Робота переміщення заряду в електричному полі

$$A = qU .$$

Оскільки

$$q = It ,$$

то

$$\boxed{A = UIt} . \quad (10.21)$$

Отже, **робота струму** на ділянці кола дорівнює добутку сили струму на напругу і час, протягом якого виконувалась робота.

Використовуючи закон Ома для ділянки кола, матимемо

$$\boxed{A = I^2 Rt} , \quad \boxed{A = \frac{U^2}{R} t} . \quad (10.22)$$

Потужність електричного струму – є робота, яка виконується за одиницю часу. Тому

$$\boxed{P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}} . \quad (10.23)$$

У СІ робота електричного струму вимірюється у джоулях, а потужність у ватах. На практиці енергію вимірюють у кіловат-годинах: $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.

При проходженні електричного струму по провіднику частина його енергії перетворюється в тепло. Кількість теплоти, що виділяється при цьому, дорівнює роботі поля по подоланню опору провідника:

$$\boxed{Q = A = I^2 Rt} . \quad (10.24)$$

Це математичний вираз **закону Джоуля-Ленца: кількість теплоти, виділеної струмом у провіднику, прямо пропорційна опору провідника, квадрату сили струму і часу його проходження**. Даною формулою зручно користуватись у випадку послідовного з'єднання провідників. При паралельному з'єднанні зручніше користуватись формулою:

$$\boxed{Q = \frac{U^2}{R} t} . \quad (10.25)$$