**Лекція 2-5. Енергія конденсатора. Енергія електростатичного поля**

Нехай є відокремлений провідник, заряд, ємність і потенціал якого відповідно рівні *Q, С,* . Збільшимо потенціал даного провідника на . Для цього необхідно перенести заряд *dQ* з нескінченності на відокремлений провідник, витративши на це роботу:



Щоб зарядити тіло від початкового потенціалу  до , необхідно виконати роботу :



Бачимо, що робота дорівнює різниці значень однієї і тієї ж функції  , взятої в початковому і кінцевому стані системи.

Ця функція енергія W.

****

**Енергія електростатичного поля.**

Перетворимо формулу, щоб знайти формулу для енергії електричного поля в плоскому конденсаторі. За допомогою вираза для потенціалу на конденсаторі:



Скориставшись виразом для ємності плоского конденсатора:



Отримаємо:



Помічаємо, що *V = Sd* - об'єм конденсатора.

Отримана формула показує, що енергія конденсатора пов’язана з величиною, що характеризує електростатичне поле, - напруженість Е.

Густина енергії електростатичного поля (енергія одиницю об’єму)

****

Отримано принципово важлива формула, яка стверджує, що поле, володіючи енергією, може самостійно існувати, тобто може бути випромінене.

**Отримано принципово важливу формула, яка стверджує, що поле, володіючи енергією, може самостійно існувати, тобто може бути випромінене.**

**ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОДІНАМІКИ.**

**Постійний електричний струм. Густина електричного струму.**

**Закон Ома в різних формах. Правила Кірхгофа**

Електродинаміка - розглядає явища і процеси, обумовлені рухом електричних зарядів або макроскопічних заряджених тел.

1. **Електричний струм, сила і щільність струму.**

Електричним струмом називається будь-впорядкована (спрямований)
рух електричних зарядів.

У провіднику під дією прикладеного електричного поля ***Е*** вільні електричні заряди переміщаються: позитивні - по полю, негативні - проти поля, тобто в провіднику виникає електричний струм, званий струмом провідності.

Для виникнення і існування електричного струму на ділянці кола необхідно, з одного боку, наявність вільних носіїв струму - заряджених частинок, здатних впорядковано переміщуватися, а з іншого - наявність електричного поля, енергія якого, якимось чином стимулює рух і витрачалася б на нього.

Кількісною мірою електричного струму виступає сила струму *I* - **скалярна** фізична величина, яка визначається електричним зарядом, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:



Якщо сила струму і його напрям не змінюються з часом, то такий струм
зветься постійним. Одиниця сили струму - ампер (А).

Фізична величина, яка визначається силою струму, що проходить через одиницю площі поперечного перерізу провідника, **перпендикулярного** напрямку струму, ***називається щільністю струму***:

******

***dS***= ***n****dS* (***n*** —одиничний вектор нормалі до площадки dS, що становить
з вектором ***j*** кут *а*).
Можна довести, що сила і щільність струму пов'язані зі швидкістю упорядкованого руху зарядів в провіднику  ***V*** і концентрацією носіїв заряду в ньому:

**

де *п* - концентрація носіїв струму; е - елементарний заряд, що рухається (електрон); S - поперечний переріз провідника, через який переноситься заряд; ***V***- швидкість спрямованого руху носіїв заряду ( дрейфова швидкість. Крім цієї компоненти швидкості електрон приймає участь і в хаотичному тепловому русі з тепловою швидкістю. Ця компонента швидкості не переносить електричний заряд. ЧОМУ ??? )
Так як сила струму і щільність струму пов'язані виразом *j = I / S,* то маємо:



З останнього виразу видно, що щільність струму - вектор. Тому що ця величина є пропорційною величині швидкості спрямованого, упорядкованого руху позитивних зарядів.

Одиниця щільності струму - ампер на метр в квадраті (А / м2).

В наведеній формулі використано цікаве позначення для швидкості спрямованого руху. РОЗІБРАТИСЯ, що позначає цей математичний символ???

**Закон Ома. опір провідників.**

Г. Ом експериментально встановив, що сила струму *I*, що тече по однорідному металевому провіднику, пропорційна напрузі *U*  на кінцях провідника:



де R - електричний опір провідника.
Наведене рівняння виражає ***закон Ома для ділянки кола*** ( де не має джерел струму): сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі, що прикладена до кінців провідника і обернено пропорційна опору провідника.

Одиниця опору R (Ом): 1 Ом - опір такого провідника, в якому при напрузі 1 В тече постійний струм 1 А.
Величина G зветься електрична провідність провідника.



Одиниця провідності - с**іменс** (См): 1 См - провідність ділянки електричного кола опором 1 Ом.

Опір провідників залежить від його розмірів і форми, а також від матеріалу, з якого провідник виготовлений. Для однорідного лінійного провідника опір R прямо пропорційний його довжині *l*  і обернено пропорційно площі його поперечного перерізу *S*:



де  — коефіцієнт пропорційності, що характеризує можливість речовини проводити електричний струм і званий ***питомим електричним опором***.
Одиниця питомого електричного опору - ом-метр (Ом \* м). Дані за цим параметром матеріалів систематизовані в довідковій літературі.



 Рис.1.

Досвід показує, що зміна питомої опору, а значить і опору з температурою описується лінійним законом:



де *р* та *р0*, *R* та *Ro* — відповідно питомі опори і опір провідника при t та О ° С; а - температурний коефіцієнт опору,

При температурах нижче критичної може проявитися явище надпровідності (практично повна втрата електричного опору матеріалом).

**Закон Ома в диференційній формі.**

Підставивши вираз для опору в закон Ома отримаємо:



 використовуючи позначення:



де величина  , що зворотна питомому опору, називається питомою електричну провідністю речовини провідника.
Її одиниця виміру - сіменс на метр (См / м).
З огляду на, що  . де Е - напруженість електричного поля в провіднику,  *j* - щільність струму, формулу для струму можна записати у вигляді:

 

Так як в ізотропному провіднику носії струму в кожній точці рухається в напрямку вектора ***Е***, то напрямки ***j*** і ***Е*** збігаються. Тому формулу можна записати у вигляді:



***Останній вираз - закон Ома в диференціальній формі,*** що зв'язує щільність струму в будь-якій точці всередині провідника з напруженістю
електричного поля в цій же точці.

**ЦЕ САМА ВАЖЛИВА ФОРМА ЗАКОНУ ОМА (ПАМ'ЯТАТИ !!!!).**

**Умови існування електричного струму в ланцюзі.**

**1. Сторонні сили. Електрорушійна сила**
Якщо в ланцюзі на носії струму діють тільки сили електростатичне поле, то відбувається переміщення носіїв (вони передбачаються позитивними) від точок з великим потенціалом до точок з меншим потенціалом. Це призводить до вирівнювання потенціалів у всіх точках ланцюга і до зникнення електричного поля. Тому для існування постійного струму необхідна наявність в ланцюзі пристрою, здатного створювати і підтримувати різницю потенціалів за рахунок роботи сил не електростатичного походження.
Такі пристрої називаються джерелами струму. Сили не електростатичного походження, що діють на заряди з боку джерел струму, називаються сторонніми. Природа сторонніх сил може бути різною. Наприклад, в гальванічних елементах вони виникають за рахунок енергії хімічних реакцій між електродами і електролітами; в генераторі - за рахунок механічної енергії обертання ротора генератора і т. п. Роль джерела струму в електричному ланцюзі, образно кажучи, така ж, як роль насоса, який необхідний для перекачування рідини в гідравлічній системі. Під дією створюваного поля сторонніх сил електричні заряди рухаються всередині джерела струму проти сил електростатичного поля, завдяки чому на кінцях ланцюга підтримується різниця потенціалів і в ланцюзі тече постійний електричний струм.
Сторонні сили здійснюють роботу по переміщенню електричних зарядів. Фізична величина, яка визначається роботою, яку здійснюють сторонніми силами при переміщенні одиничного позитивного заряду, називається електрорушійної силою (ЕРС), що діє в ланцюзі:

*E = A / q*

Ця робота проводиться за рахунок енергії, що витрачається в джерелі струму, тому величину E можна також називати електрорушійної силою джерела струму, включеного в ланцюг. Часто, замість того щоб сказати: в ланцюзі діють сторонні сили, кажуть: в ланцюзі діє ЕРС.

**2. Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца**

Розглянемо однорідний провідник, до кінців якого прикладена напруга *U.* За час *dt* через перетин провідника переноситься заряд *dq =Idt*. При цьому сили електростатичного поля і сторонні сили здійснюють роботу *А = Uq*.
Якщо опір провідника R, то, використовуючи закон Ома, знайдемо, що робота струму *A = UIt*
З визначення потужності слід, що потужність струму *P = UI.*
Якщо сила струму виражається в амперах, напруга - в вольтах, опір - в Омах, то робота струму виражається в джоулях, а потужність в Ватах.

 На практиці застосовуються також позасистемні одиниці роботи струму: ват-година (Вт • год), кіловат-годину (кВт • год); 1 Вт • год - робота струму потужністю 1 Вт протягом 1 год; 1 Вт • год = 3600 Вт • с = 3,6 • 103 Дж; 1 кВт • год = 103 Вт • год = 3,6 • 10 ° Дж.
Якщо струм проходить по нерухомому металевому провіднику, то вся робота йде на його нагрівання . З закону збереження енергії слід,

*dQ = dA.*

Таким чином, використовуючи наведені вирази отримаємо dQ = IUdt.
Представлене вираз являє собою закон Джоуля -Ленца, експериментально встановлений незалежно один від одного Дж. Джоулем і Е. X. Ленцем.

**3. Закон Ома для неоднорідної ділянки кола**

Раніше розглядали закон Ома для однорідної ділянки кола, тобто такого, в якому не діє ЕРС (не діють сторонні сили).



Тепер розглянемо неоднорідний ділянку ланцюга, де на ділянці 1 - 2 діє ЕРС яку позначимо через Е, а прикладену на кінцях ділянки різницю потенціалів - через *U12 = (U1 - U2).* Якщо струм проходить по нерухомих провідникам, що створює ділянку 1-2, то робота всіх сил (сторонніх та електростатичних), та, що здійснюються над носіями струму, за законом збереження і перетворення енергії дорівнює теплоті, що виділяється на ділянці.

Прирівнюючи вираз для закону Джоуля - Ленца і формулу для роботи сил електростатичного поля можна отримати такий вираз:

*U = E + R \* I*

Цей вислів відомо як закон Ома для ділянки кола, що містить е.р.с.

Якщо ж електричний ланцюг замкнутий, то вибрані точки 1 і 2 збігаються, то U1 = U2 і U12 = 0, і тоді отримуємо закон Ома для замкнутого кола:

*I = E / R '*

де *E* - ЕРС, яка діє в ланцюзі; R '- сумарний опір всього ланцюга.
У загальному випадку *R '= r + R*, де *r* - внутрішній опір джерела струму, *R* - опір зовнішньої ланцюга.

**Правила Кірхгофа для розгалужених ланцюгів.**

Узагальнений закон Ома дозволяє розрахувати практично будь-яку складну ланцюг. Однак безпосередній розрахунок розгалужених ланцюгів, що містять кілька замкнутих контурів (контури можуть мати загальні ділянки, кожен з контурів може мати кілька джерел струму і т.д.), досить складний. Це завдання більш просто вирішується за допомогою двох правил Кирхгофа.

Будь-яка точка розгалуження ланцюга, в якій сходиться не менше трьох провідників зі струмом, називається вузлом. При цьому струм, що входить у вузол, вважається позитивним, а струм, що виходить з вузла, - негативним.
**Перше правило Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів, що сходяться в вузлі, дорівнює нулю.**
Перше правило Кірхгофа випливає із закону збереження електричного заряду. Дійсно, в разі усталеного постійного струму ні в одній точці провідника і на ніякий його ділянці не повинні накопичуватися електричні заряди. В іншому випадку струми не могли б залишатися постійними.

**Друге правило Кірхгофа є узагальненням закону Ома для розгалужених ланцюгів**.
У будь-якому замкнутому контурі, довільно обраному в розгалуженому електричному колі, алгебраїчна сума добутків сил струмів *I* на опор *R* відповідних ділянок цього контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС Ek, що зустрічаються в цьому контурі:

    *E1 + E2 + ... = I1 R1 + I2 R2 +……*

При розрахунку складних ланцюгів постійного струму із застосуванням правил Кирхгофа необхідно:
1. Вибрати довільний напрямок струмів на всіх ділянках кола; дійсний напрямок струмів стане відомим при аналізі рішень рівнянь завдання: якщо шуканий струм вийде позитивним, то його напрямок було обрано правильно, негативним - його дійсний напрям протилежно обраному.
2. Вибрати напрямок обходу контуру і строго його дотримуватися; падіння напруги на опорі *IR* позитивно, якщо струм на даній ділянці збігається з напрямком обходу, і, навпаки; ЕРС, що діють за обраним напрямом обходу, вважаються позитивними, проти - негативними.
3. Скласти стільки рівнянь, щоб їх число дорівнювало числу шуканих величин (в систему рівнянь повинні входити всі опору і ЕРС даної ланцюга); кожен розглянутий контур повинен містити хоча б один елемент, що не міститься в попередніх контурах, інакше вийдуть рівняння, що є простою комбінацією вихідних.

Застосуванню правил Кірхгофа до знаходження величин струмів або напруг на елементах ланцюга присвячено розділ завдань в пропонованому методичному посібнику.
Детально теоретичний матеріалу по темі постійний електричний струм може бути знайдений в рекомендованій літературі (Трофімова).