

ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

3.16. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца. Генератори електричного струму.

3.17. Явище самоіндукції, індуктивність. Перехідні процеси у колі з індуктивністю. Взаємна індуктивність, трансформатори.

3.18. Енергія провідника із струмом. Об'ємна густина енергії магнітного поля.

3.19. Магнітне поле в речовині. Характеристики намагніченого стану речовини, магнетики. Феромагнетики та їхнє застосування.

3.20. Електромагнітне поле. Струм зміщення. Рівняння Максвела в інтегральній та диференціальній формах.

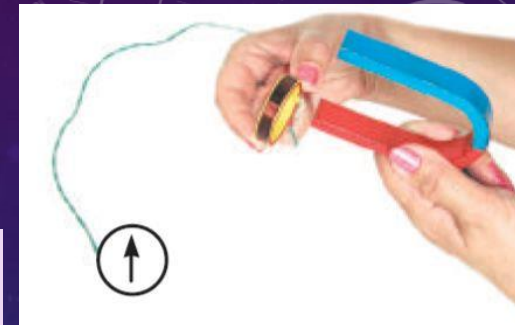
3.16. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца.



У березні 1821 р. **Майкл Фарадей** записав у своєму щоденнику: «Перетворити магнетизм на електрику».

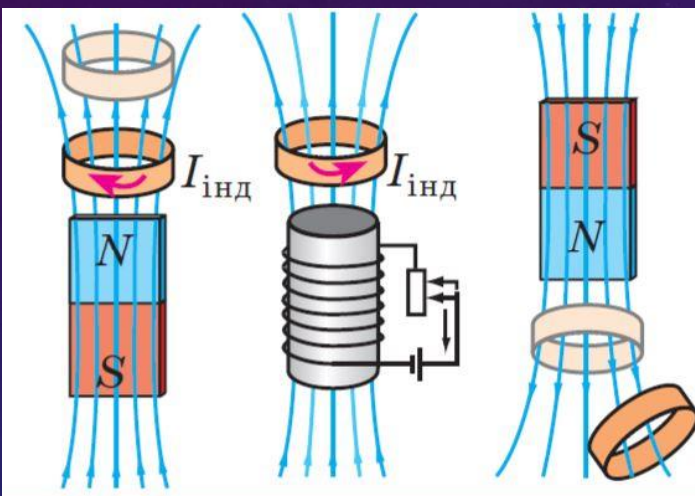
29 серпня 1831 р. після численних дослідів учений досяг своєї мети — він отримав електричний струм за допомогою магнітного поля.

Цей струм Фарадей назвав *індукційним (наведеним) струмом*.



Експериментальні спостереження М. Фарадея сприяли відкриттю нового закону про зв'язок електричного і магнітного полів: у тих ділянках, де змінюється магнітне поле, виникає електричне поле, яке спричинює спрямований рух електронів у провідному контурі.

Електромагнітна індукція:



1. Електричний струм у замкненому провідному контурі індукується тільки тоді, коли **змінюється магнітний потік** через поверхню, обмежену контуром.

2. Чим **швидше** змінюється магнітний потік, тим **більшою** є сила індукційного струму в контурі.

3. **Напрямок** індукційного струму в контурі залежить від того, **збільшується** чи **зменшується** магнітний потік через поверхню, обмежену контуром.

4. Під час зміни магнітного потоку виникають **сторонні (не кулонівські)** сили, які й «працюють» у контурі, перемішуючи в ньому електричні заряди.

$$\Phi = (\vec{B} \cdot \vec{S}) = BS \cos \alpha$$

Закон Фарадея для явища електромагнітної індукції:
будь-яка зміна магнітного потоку через площу замкненого контуру викликає (індукує) в ньому **ЕРС індукції**, що пропорційна **швидкості зміни** магнітного потоку

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

3.16. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея

Закон електромагнітної індукції довів Гельмгольц (1847 р.) – *ґрунтується на законі збереження та перетворення енергії*

Розглянемо замкнене коло, що містить джерело та повний опір дорівнює R .
Кількість енергії, що витрачає джерело за час dt буде:

$$dW = I\varepsilon \cdot dt$$

Якщо зовнішнє магнітне поле відсутнє (або контур нерухомий) ця енергія виділяється у вигляді кількості теплоти:

$$dQ = I^2 R \cdot dt$$

Можемо прирівняти:

$$I\varepsilon \cdot dt = I^2 R \cdot dt$$

Звідси:

$$I = \frac{\varepsilon}{R}$$

- закон Ома для постійного струму

При переміщенні контуру з джерелом у магнітному полі енергія джерела частково буде витрачатися проти переміщення контуру, а частково виділятися у вигляді тепла.

Робота по переміщенню провідника зі струмом виконується лише за рахунок енергії джерела струму:

$$dA = Id\Phi$$

Тоді закон збереження енергії:

$$dW = dQ + dA$$

Підставимо:

$$I\varepsilon \cdot dt = I^2 R \cdot dt + I \cdot d\Phi$$

Отже:

$$\varepsilon = IR + \frac{d\Phi}{dt}$$

Остаточно отримаємо:

$$I = \frac{\varepsilon - \frac{d\Phi}{dt}}{R} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{R}$$

Порівняємо закон Ома для постійного струму та останню формулу, робимо висновки.

1. Внаслідок *зміни потоку магнітної індукції* у колі з'являється *електрорушійна сила індукції*.
2. Величина електрорушійної сила індукції *не залежить від ЕРС джерела*, а отже зберігає своє значення і за відсутності джерела струму у колі (при $\varepsilon = 0$)

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

3.16. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца.

Правило Ленца (посноє знак «-» у законі Фарадея)

Індукційний струм, який виникає в замкненому провідному контурі, має такий напрямок, що створений цим струмом магнітний потік перешкоджає зміні магнітного потоку, який спричинив появу індукційного струму.

Електрорушійна сила індукції – це робота сторонніх сил $A_{ст}$ із переміщення одиничного позитивного заряду:

$$\varepsilon_i = \frac{A_{ст}}{q_0}$$

Силу індукційного струму i в контурі опором R визначають за законом Ома:

$$i = \frac{\varepsilon_i}{R}$$



Ленц Генріх Емілій

Фізичний зміст правила Ленца (закон збереження енергії): на створення індукційного струму потрібна енергія, тому має бути виконана робота. Під час наближення магніту до контуру або під час його віддалення завжди виникає сила, що перешкоджає рухові. Щоб подолати цю протидію й виконується робота.

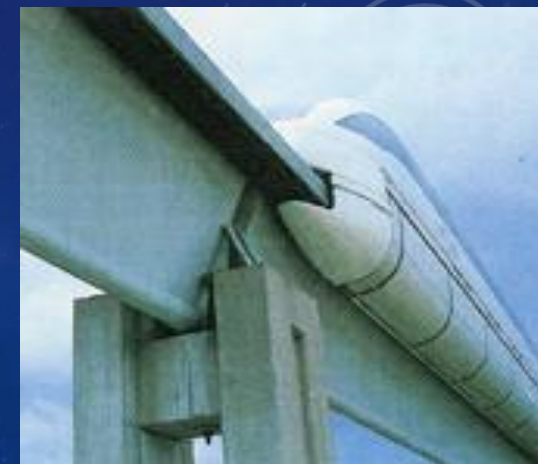
Принцип правила Ленца нині реалізують у транспортно-будівельній галузі для міжміських пасажирських перевезень. Це потяги на так званій магнітній подушці.

Під днищем вагона такого потяга змонтовано потужні магніти, розташовані за декілька сантиметрів від сталевго полотна.

Під час руху потяга магнітний потік, що проходить через контур полотна, постійно змінюється і в ньому виникають сильні індукційні струми, що створюють потужне магнітне поле, яке відштовхує магнітну підвіску потяга.

Ця сила настільки велика, що, досягаючи певної швидкості, потяг у буквальному розумінні відривається від полотна на 10-15 сантиметрів і фактично летить у повітрі.

Потяги на магнітній подушці здатні досягати швидкості понад 500 км/год, завдяки чому вони є ідеальним засобом міжміського сполучення середньої дальності.



3.16. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца.

Більш загальне тлумачення явища електромагнітної індукції дав Дж. К. Максвелл.

М. Фарадей уявляв електромагнітну індукцію як збудження електричного струму в замкненому провіднику під дією змінного магнітного поля.

На думку Дж. К. Максвелла, суть *явища електромагнітної індукції зводиться до виникнення вихрового електричного поля скрізь, де є змінне магнітне поле*, отже для прояву явища електромагнітної індукції *наявність провідників не є обов'язковою*.

Виникнення індукційного струму в замкненому провідному контурі – це лише один із проявів *виникнення вихрового електричного поля під дією змінного в часі магнітного поля*.

Вихрове електричне поле може спричинювати й інші дії, наприклад, поляризувати діелектрик, викликати пробій діелектрика між обкладинками конденсатора, прискорювати або гальмувати заряджені частинки тощо.

Робота вихрового електричного поля на замкненій траєкторії не дорівнює нулю, на відміну від стаціонарного електричного поля.

Отже:

Для вихрового електричного поля циркуляція вектора напруженості вздовж довільного обраного замкненого контуру L дорівнює електрорушійній силі:

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = \varepsilon$$

Закон електромагнітної індукції в узагальненому Максвеллом інтегральному вигляді:

$$d\Phi = (\vec{B} \cdot d\vec{S})$$

\Rightarrow

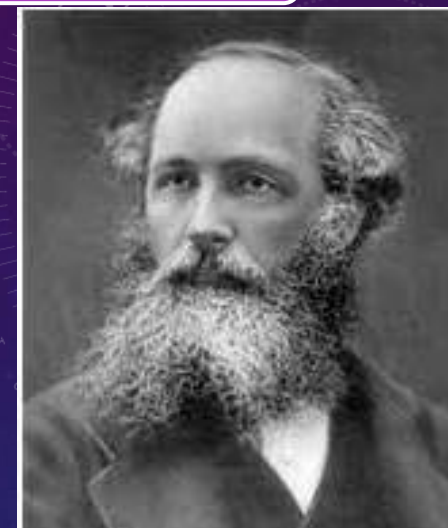
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

\Rightarrow

$$\varepsilon_i = -\frac{d(\vec{B} \cdot d\vec{S})}{dt}$$

\Rightarrow

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = -\frac{d}{dt} \int_S (\vec{B} d\vec{S})$$



Максвелл Джеймс Клерк

3.16. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея. Генератори електричного струму.

Уперше спосіб практичного використання явища електромагнітної індукції запропонував М. Фарадей.

Електричні генератори - пристрої, що працюють за принципом явища електромагнітної індукції та призначені для перетворення енергії механічного руху в енергію електричного струму.

Принцип роботи генераторів електричного струму

Між полюсами **постійного магніту** (тобто в однорідному магнітному полі відносно осі, перпендикулярної до напрямку ліній магнітної індукції) **рівномірно обертається рамка з провідника**, у якій, згідно із законом М. Фарадея виникає електрорушійна сила.

Для **зняття ЕРС**, що індукується в рамці, кінці провідника прикріплюють до **контактних кілець**, від яких через контактні щіточки ЕРС вмикають у коло споживача. Очевидно, коли б кільця були замінені двома півкільцями, в зовнішній частині кола був би пульсуючий струм одного напрямку.

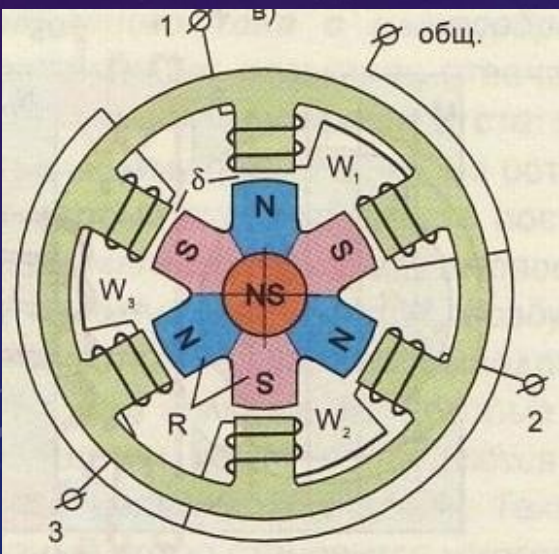
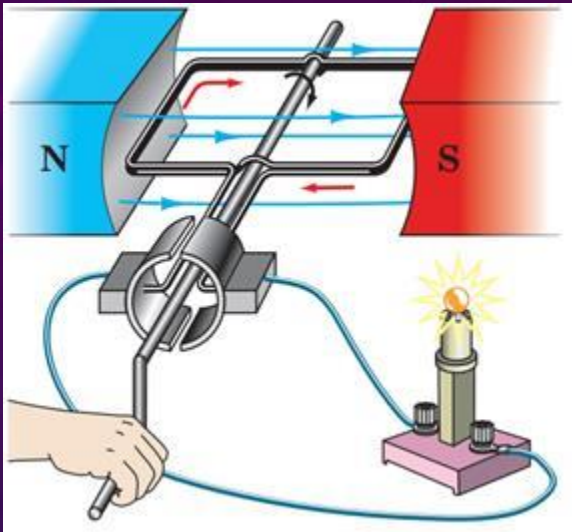
Таку конструкцію генератора змінного струму використовують тільки в малопотужних генераторах. Оскільки, за допомогою ковзних контактів практично неможливо відвести від генератора потужний струм високої напруги. Теплова дія струму та іскріння на контактах зумовили б їхнє швидке руйнування.

Практично генератори конструюють так, що змінний струм індукується в нерухомій обмотці (її вкладають у пази на внутрішній поверхні пластинчастого феромагнітного статора), а обертальною складовою (ротором) є дво- або багатополосний електромагніт (з чергуванням полюсів).

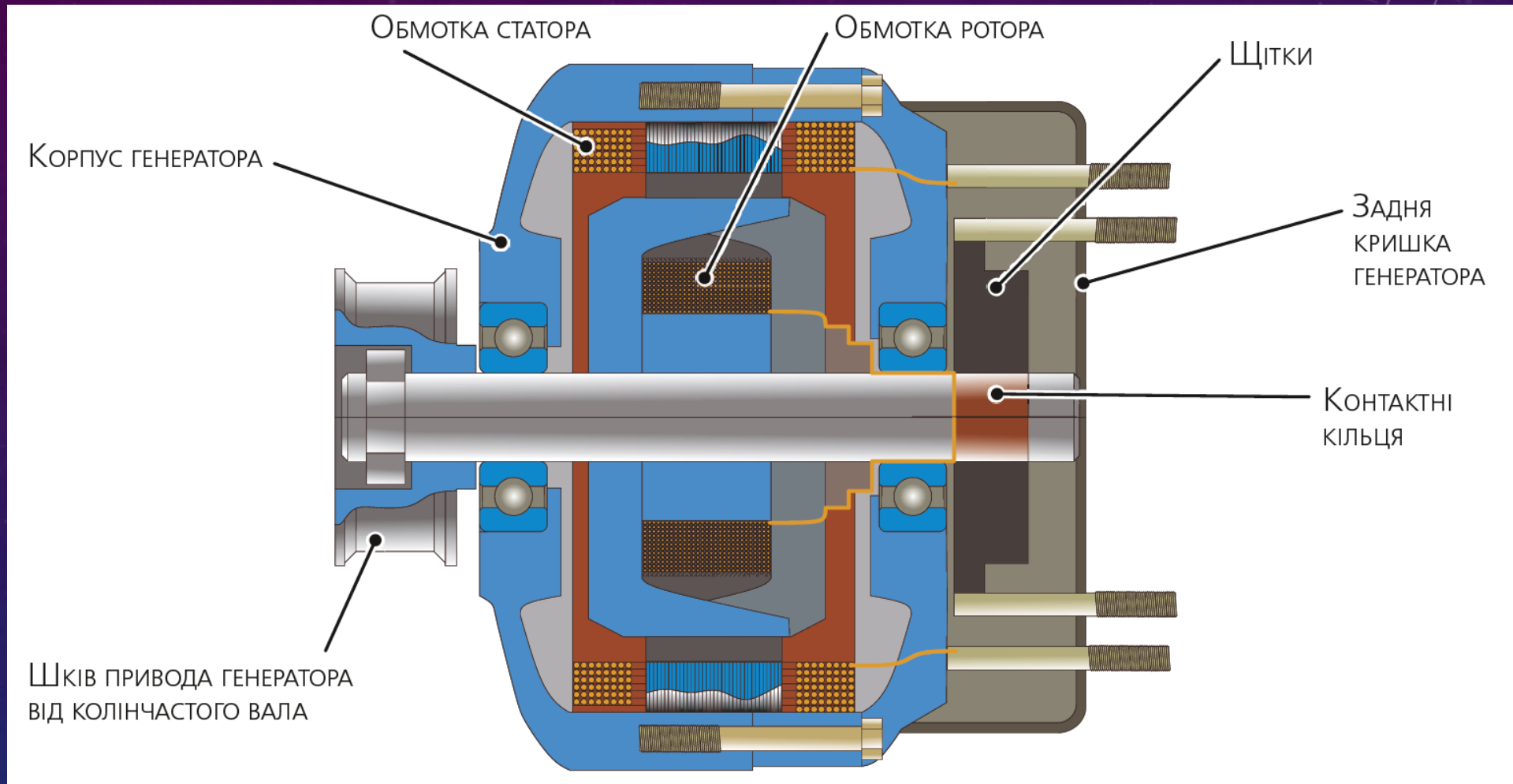
Останній живиться порівняно слабким постійним струмом, що подається через контактні кільця. Обмотку, в якій індукується ЕРС, називають **якорем**, а рухома магнітна система – **індуктором**.

Час одного оберту ротора двополюсного індуктора дорівнює періоду ЕРС в обмотці статора; отже, за n обертів за 1 хв. індуктора з p парами полюсів частота індукованої ЕРС становить:

$$\nu = p \frac{n}{60}$$



3.16. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея. Генератори електричного струму.



3.16. Явище електромагнітної індукції. Струми Фуко

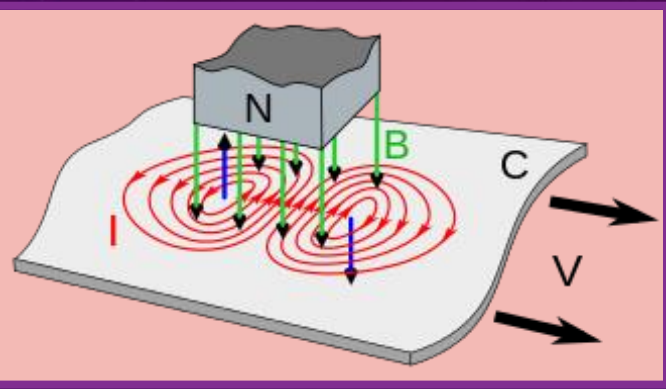
Струми Фуко - вихрові індукційні струми, які виникають у масивних провідниках при зміні магнітного потоку, який їх пронизує.

Струми Фуко, як і індукційні струми в лінійних провідниках, підпорядковуються **правилу Ленца**: їхнє магнітне поле спрямоване так, щоб **протидіяти зміні магнітного потоку**, що індукував вихрові струми.

Так, наприклад, швидко гасяться коливання масивних металевих маятників, розміщених між полюсами магнітів, це явище використовують для заспокоєння (**демпфування**) рухомих частин приладів.



Фуко, Жан Бернар Леон



Вихрові струми також зумовлюють **нагрівання провідників**.

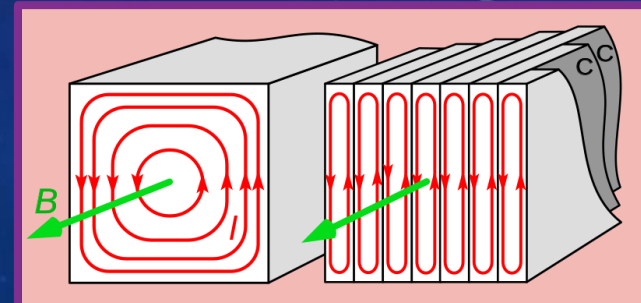
Джоулеве тепло, що виділяється струмами Фуко, у промисловості використовується в **індукційних пічках**.

Індукційна піч (**тремолит**) являє собою тигель, який вводять всередину котушки з високочастотним струмом. У металі виникають інтенсивні вихрові струми, здатні розігріти його до плавлення. Такий спосіб дає змогу плавити метали у вакуумі, в результаті чого отримують **надчисті матеріали**.



У побуті використовують індукційні плити для приготування їжі. Головна їхня відмінність від електричних і газових плит полягає у тому, що **тепло генерується безпосередньо на посуді**, в якому готують їжу, а не на поверхні самої плити. Відмінність індукційних плит від традиційних полягає в їхній енергоефективності, скороченні часу приготування, безпеці щодо опіків, значному зменшенні нагрівання навколишнього середовища.

Для **зменшення втрат** на нагрівання якорі генераторів та осердя трансформаторів роблять **не суцільними**, а виготовляють **із тонких пластин**, відокремлених одна від одної шарами ізолятора, і встановлюють так, щоб вихрові струми були направлені уперек пластин.

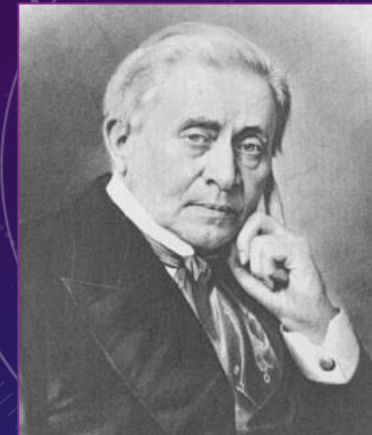


3.17. Явище самоіндукції, індуктивність.

Самоіндукція - явище виникнення індукційного струму в провіднику внаслідок зміни магнітного потоку, зумовленої **зміною струму в цьому ж провіднику**.

Величина **електрорушійної сили самоіндукції** була визначена американським фізиком Дж. Генрі (за умови $L = \text{const}$):

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}$$



Генрі, Джозеф

Порівняємо закон Генрі та закон Фарадея:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Отже, магнітний потік, зумовлений зміною струму в провіднику, пропорційний силі струму:

$$\Phi = LI$$

де L – коефіцієнт пропорційності, який називають індуктивністю контуру.

Індуктивність контуру не залежить від сили струму та індукції магнітного поля, а є **однозначною характеристикою** провідного контуру, що визначається формою і розмірами контуру, а також магнітними властивостями навколишнього середовища.

Фізичний зміст індуктивності провідника: це характеристика, що визначає міру інертних властивостей провідника стосовно зміни струму, чисельно дорівнює тій ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі за швидкості зміни сили струму в ньому 1 А за 1 с:

$$L = \frac{|\varepsilon_{si}|}{dI/dt} \quad L = [1\text{Гн}]$$

Визначимо індуктивність довгого соленоїда завдовжки l з площею перерізу S і кількістю витків N .

Потокозчеплення: $\Psi = N\Phi \Rightarrow \varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(NBS)}{dt}$

Для соленоїда:

$$B = \mu\mu_0 \frac{N}{l} I \Rightarrow$$

$$\varepsilon_{si} = -\frac{d\left(\mu\mu_0 \frac{N^2}{l} SI\right)}{dt} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{si} = -\mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S \frac{dI}{dt}$$

Індуктивність довгого соленоїда:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S$$

Або:

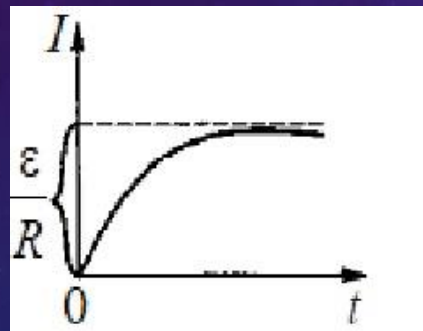
$$L = \mu\mu_0 n^2 V$$

де n - кількість витків на одиницю довжини.

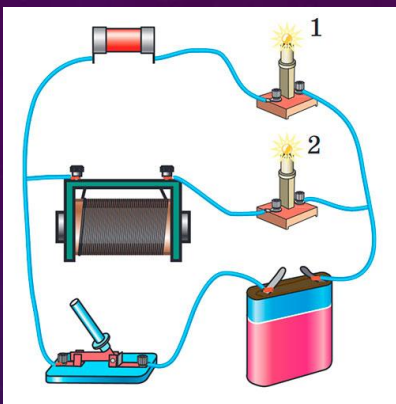
3.17. Явище самоіндукції. Перехідні процеси у колі з індуктивністю.

Екстраструмом замикання - струм самоіндукції, який виникає внаслідок вмикання джерел струму в електричне коло з індуктивністю L

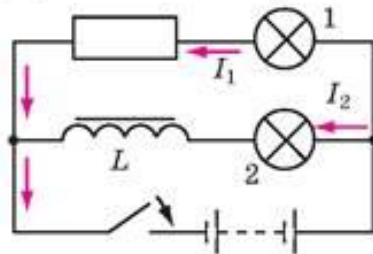
$$I = I_0 \left(1 - e^{-R/L \cdot t}\right)$$



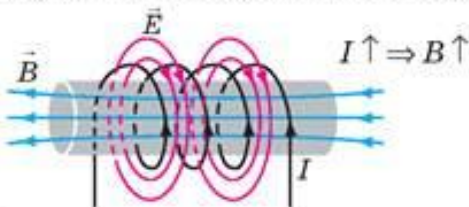
У разі розмикання або замикання електричних кіл сила струму в них різко змінюється, що призводить до виникнення струмів самоіндукції, які називають **екстраструмами самоіндукції**.



Коло замикають
Відразу після замкнення кола сила струму I в колі збільшується.



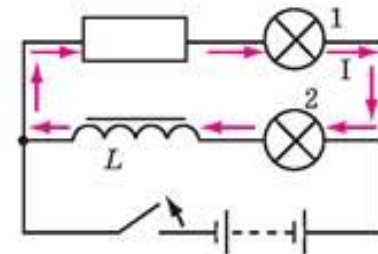
Усередині котушки виникає змінне магнітне поле, магнітна індукція \vec{B} якого теж збільшується. Змінне магнітне поле створює *вихрове електричне поле* \vec{E} , яке в цьому випадку буде *протидіяти струму* в котушці (правило Ленца).



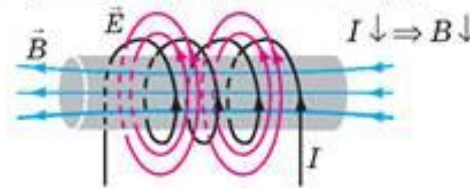
Саме тому сила струму в колі котушки (а отже, і в лампі 2) зростатиме не відразу, а поступово. Зрозуміло, що в провідниках, які підводять струм до лампи 1, також виникає вихрове електричне поле, але створена ним ЕРС є незначною.

Коло розмикають

Відразу після розмикання кола сила струму I в колі зменшується.



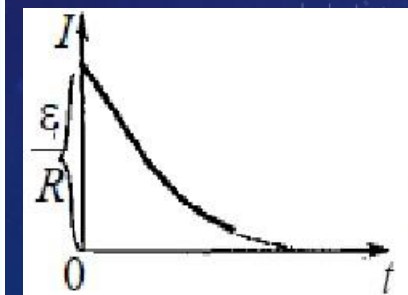
Магнітна індукція \vec{B} поля, створеного струмом, теж зменшується. Змінне магнітне поле створює *вихрове електричне поле* \vec{E} , яке в цьому випадку *підтримуватиме струм* у котушці (правило Ленца).



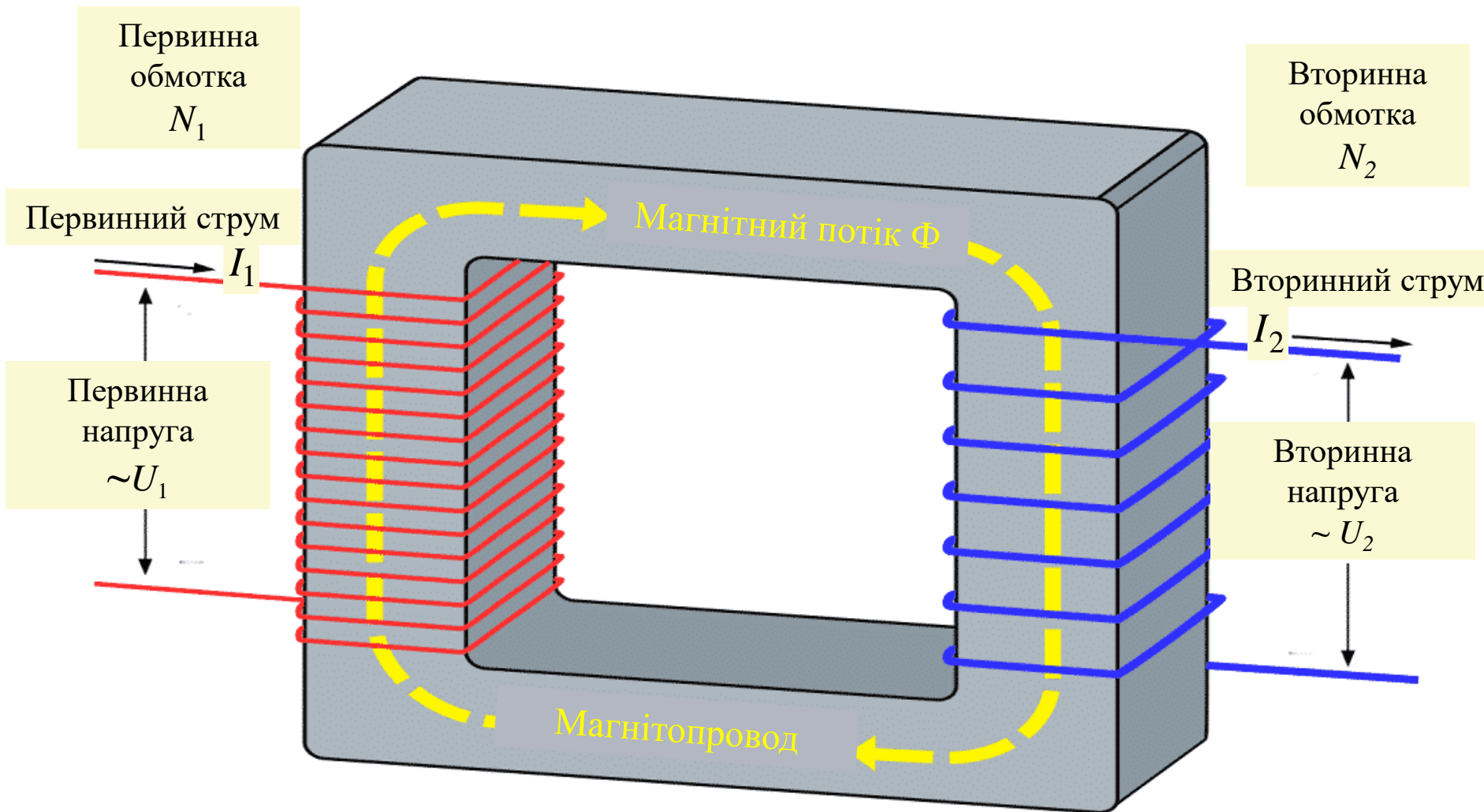
Здається, що лампа 2 повинна згаснути пізніше, ніж лампа 1, але обидві гаснуть одночасно! Річ у тім, що коло, яке складається із двох ламп, котушки і резистора, залишається замкненим. *Котушка* в цьому колі слугує *джерелом струму*: вихрове електричне поле, що виникло в котушці, підтримує в колі струм. Струм через котушку і лампу 2 продовжує йти в тому самому напрямку, а напрямок струму в лампі 1 і резисторі змінюється на протилежний.

Екстраструмом розмикання - струм самоіндукції, який виникає внаслідок розмикання джерел струму з електричного кола з індуктивністю L

$$I = I_0 e^{-R/L \cdot t}$$



3.17. Взаємодія. трансформатори



Трансформатор – пристрій для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги за сталої частоти струму.

Магнітна індукція поля, створюваного першою котушкою:

$$B = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l}$$

Магнітний потік крізь один виток другої котушки:

$$\Phi_2 = BS = \mu\mu_0 \frac{N_1 I_1}{l} S$$

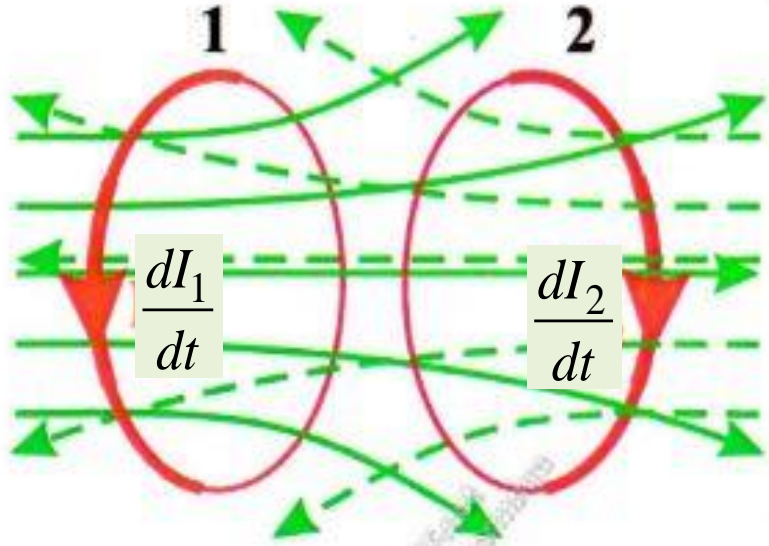
Повний магнітний потік (потокозчеплення) крізь витки вторинної котушки:

$$\Psi = N_2 \Phi_2 = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S I_1$$

Повний магнітний потік (потокозчеплення) створюється струмом I_1 , тоді **взаємна індуктивність**:

$$L = \frac{\Psi}{I_1} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S$$

3.17. Взаємодія. Взаємна індуктивність



Якщо провідні контури чи котушки зі струмами розміщені так, що магнітні потоки кожної з них хоча б частково перетинають витки сусідніх, то, окрім струмів самоіндукції, в кожному контурі буде виникати струм, зумовлений *зміню потоку вектора індукції магнітного поля*, утвореної струмом сусідніх контурів, такий струм називають *струмом взаємодія*.

При протіканні в контурі 1 змінного струму I_1 магнітний потік пронизує контур 2:

$$\Phi_2 = L_{12}I_1$$

Аналогічно:

$$\Phi_1 = L_{21}I_2$$

Електрорушійні сили, що виникають унаслідок взаємодія, пропорційні швидкості змін струмів в контурах, які мають індуктивний зв'язок:

$$\varepsilon_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

та

$$\varepsilon_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

де $L_{12} = L_{21}$ - коефіцієнти взаємної індуктивності контурів.

Явище взаємної індукції – це процес виникнення електрорушійної сили індукції в замкненому контурі, розміщеному близько до замкненого контуру, в якому тече змінний струм

Коефіцієнти взаємодія є мірою магнітного зв'язку між контурами і залежать від геометричної форми, розмірів і взаємного розміщення контурів зі струмом, а також від магнітних властивостей середовища, де розміщені контури.

На практиці для збільшення значення коефіцієнта взаємодія обидва контури насаджують на спільне залізне осердя з магнітною проникністю ($\mu \gg 1$)

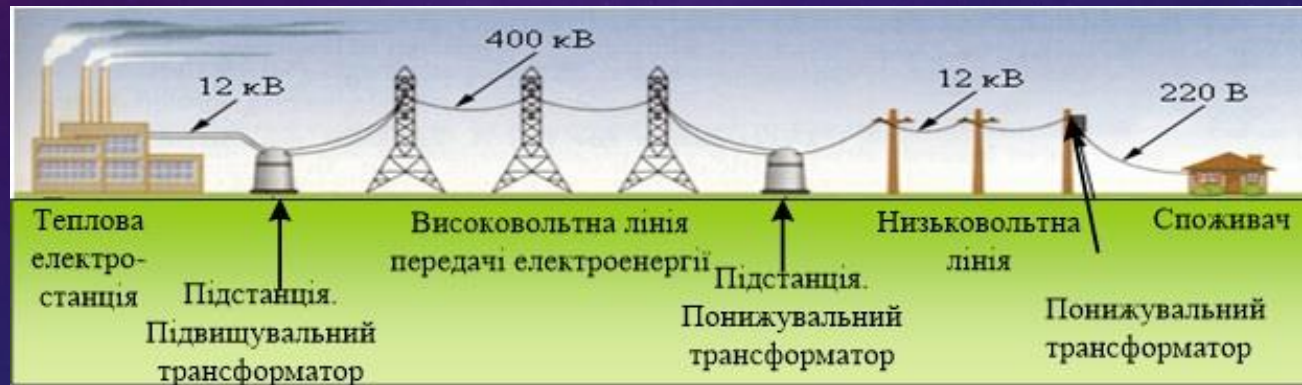
3.17. Взаємодукція. Трансформатори

Коефіцієнт трансформації чисельно дорівнює відношенню кількості витків другої обмотки трансформатора до кількості витків першої обмотки та показує, у скільки разів змінюється вихідна напруга порівняно із напругою на вході трансформатора.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

Якщо $k > 1$ то трансформатор підвищує напругу і його називають **підвищувальним**, а за $k < 1$ трансформатор є **знижувальним**.

- Електричну енергію, що зазвичай виробляється електростанціями, потрібно передавати на сотні і тисячі кілометрів до загальної енергетичної системи, промислових підприємств або безпосередньо до споживачів.
- Під час проходження струму по дротах ліній електропередачі відбуваються втрати електроенергії на їхнє нагрівання.
- Оскільки кількість теплоти, що виділяють дроти, прямо пропорційна квадрату сили струму й опору, то для обмеження втрат електроенергії треба або збільшувати переріз проводів, що є дуже економічно не вигідним і технічно неможливим, або зменшити силу струму, за підвищивши напругу.
- Для підвищення напруги на початку лінії електропередачі встановлюють підвищувальні трансформатори, а на кінці – знижувальні.



Трансформатори є **основними елементами систем енергопостачання**, електромашин, електрообладнання, електроустановок та їхніх деталей для отримання потрібної для них напруги живлення.

Зокрема, можна виділити:

- трансформатори для зварювальних апаратів,
- апаратів для прогріву бетону, ґрунту і труб,
- трансформатори для компресорів, транспортерів, бетономішалок, електроприводів будівельних машин, насосних і компресорних установок,
- гідродинамічні трансформатори для будівельних і транспортних машин,
- трансформатори для освітлення будівельних майданчиків, ручних електричних машин та інших споживачів енергії.



3.18. Енергія провідника із струмом. Об'ємна густина енергії магнітного поля.

Для збудження у контурі електричного струму стороннім джерелам електрорушійних сил потрібно затратити **певну енергію**. Унаслідок зміни струму у замкненому провіднику виникає електрорушійна сила самоіндукції, що протидіє змінам струму.

Щоб сила струму зростала, необхідно електрорушійній силі самоіндукції **компенсувати енергією** сторонніх електрорушійних сил. Тобто у процесі зростання сили струму джерело сторонніх електрорушійних сил **виконує роботу** проти електрорушійних сил самоіндукції.

Ця **робота** спрямовується на **утворення магнітного поля, енергія якого дорівнює роботі сторонніх електрорушійних сил**.

За час dt за сили струму I буде виконана робота, яка, як відомо з механіки, буде дорівнювати зміні енергії, а у даному випадку енергії магнітного поля:

$$dA = dW_m = -\varepsilon_{si} Idt = \frac{d\Phi}{dt} Idt = Id\Phi$$

Оскільки:

$$d\Phi = LdI$$

То:

$$dW_m = ILdI$$

Проінтегруємо останній вираз у межах від нуля до I та отримаємо значення **енергії магнітного поля** замкненого провідного контуру зі струмом I та індуктивністю L :

$$W_m = \int_0^I ILdI = \frac{LI^2}{2}$$

Енергія магнітного поля розподілена **в усьому просторі**, де локалізоване поле. Для обчислення енергетичних характеристик в окремих ділянках чи навіть точках заданого магнітного поля, **виразимо формулу для обчислення енергії поля через його характеристики**.

Для спрощення розглянемо окремий випадок – магнітне поле довгого соленоїда зі струмом індуктивністю L :

$$W_m = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2 V$$

Оскільки в середині довгого соленоїда магнітне поле є однорідним, а його індукція:

$$B = \mu\mu_0 In$$

то:

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu\mu_0} B^2 V$$

Якщо взяти до уваги формулу зв'язку вектора індукції магнітного поля і вектора напруженості магнітного поля:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$$

Енергія магнітного поля у даній точці:

$$W_m = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2} V$$

Об'ємна густина енергії магнітного поля в околі кожної точки простору:

$$\varpi_m = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2}$$

3.19. Магнітне поле в речовині. Характеристики намагніченого стану речовини, магнетика. Феромагнетики та їхнє застосування.

Магнітні властивості речовини залежать від наявності (чи відсутності) *постійних магнітних моментів атомів* за відсутності зовнішнього магнітного поля.

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

За сучасними поглядами *магнітні властивості речовини* зумовлені трьома причинами:

1. *Орбітальним магнітним моментом електронів*, який виникає внаслідок їхніх рухів навколо ядер;
2. *Спіновим магнітним моментом електронів*, який перебуває у певному співвідношенні з їхнім власним механічним моментом імпульсу, пов'язаним із обертовим рухом електронів навколо власних осей – спіном електрона;
3. *Власним магнітним моментом атомних ядер*

Магнетиками називають речовини, які під впливом зовнішнього магнітного поля набувають магнітних властивостей, тобто стають джерелами *власного магнітного поля*

Намагнічування магнетика – це набуття магнітних властивостей речовиною під дією зовнішнього магнітного поля

Вектор намагніченості – це сумарний магнітний момент одиниці об'єму речовини:

$$\vec{j} = \frac{\sum \vec{p}_m}{V}$$

Магнітна сприйнятливість – це здатність речовини намагнічуватись у зовнішньому магнітному полі (χ)

Вектор намагніченості пов'язаний з вектором індукції магнітного поля або напруженості магнітного поля:

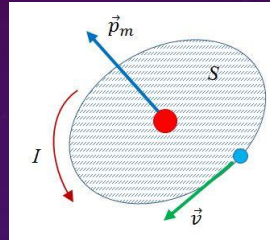
$$\vec{j} = \chi \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}$$

$$\vec{j} = \chi \vec{H}$$

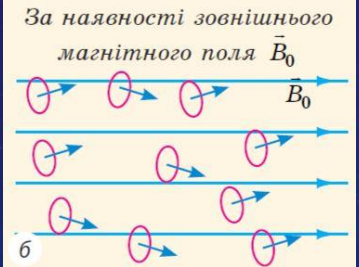
3.19. Магнітне поле в речовині. Характеристики намагніченого стану речовини, магнетики.

Магнетики поділяються на *два основних класи*

Діамагнетики – речовини, атоми яких не мають власних магнітних моментів, тобто у цих атомів *орбітальні та спінові магнітні моменти електронів* повністю скомпенсовані



Парамагнетики – речовини, структурні елементи (атоми, молекули, іони) яких, якщо *немає зовнішнього магнітного поля*, мають *власний магнітний момент*.



Абсолютне значення магнітної сприйнятливості для діамагнетиків є малим – близько

$$\chi_D \approx 10^{-5} \div 10^{-6}$$

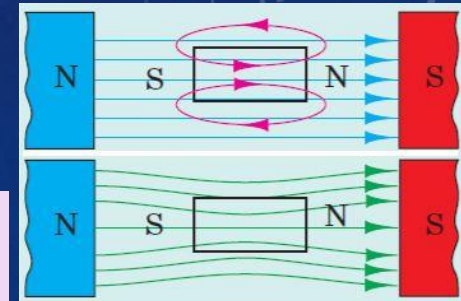
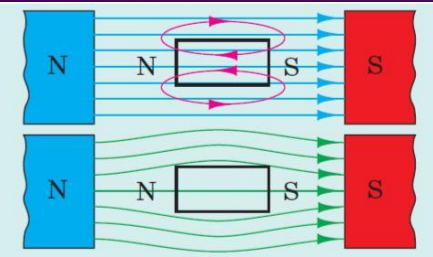
Атоми (або молекули) парамагнітні речовин мають власні магнітні моменти, які за відсутності зовнішнього магнітного поля орієнтовані хаотично

Якщо парамагнетик помістити в магнітне поле, його частинки починають орієнтуватися так, що їхні власні магнітні моменти спрямовуються в напрямку зовнішнього магнітного поля

$$\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B}_0$$

Абсолютне значення магнітної сприйнятливості для парамагнетиків становить близько

$$\chi_{\Pi} \approx 10^{-3} \div 10^{-4}$$



У разі внесення діамагнетика у зовнішнє магнітне поле *електрони в атомах змінюють свій орбітальний рух* внаслідок впливу на них зовнішнього магнітного поля. Такі колові струми створюють додаткові *магнітні моменти атомів*, спрямовані *протилежно* до напрямку зовнішнього магнітного поля.

$$\vec{p}_m \uparrow\downarrow \vec{B}_0$$

До діамагнетиків належать:

інертні гази, вода, мідь, цинк, ртуть, свинець, срібло, золото тощо, багато органічних і неорганічних сполук

Діамагнітна речовина виштовхується з магнітного поля. Цікаво, що людина в магнітному полі поводить як діамагнетик, бо майже на 70 % складається з води.

Діамагнітна левітація

Якщо пластинку з піролітичного графіту, який є діамагнетиком, помістити над полюсами потужних неодимових магнітів, то пластинка, виштовхуючись із магнітного поля, буде левітувати в повітрі.

До діамагнетиків належать:

магній, алюміній, кальцій, хром, марганець, кисень, літій, уран та інші

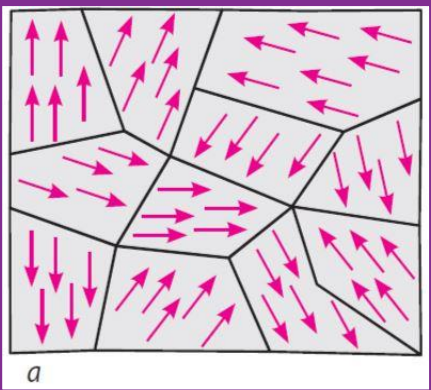
Якщо *парамагнітну речовину* помістити в магнітне поле, *вона буде втягуватися в поле*, тобто рухатися в бік збільшення магнітної індукції.



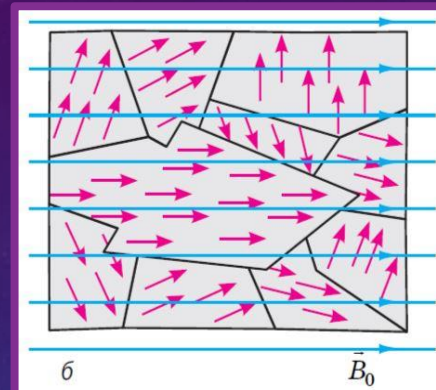
3.19. Магнітне поле в речовині. Феромагнетики

Феромагнетики – матеріали, атоми яких мають значні *нескомпенсовані спінові магнітні моменти*, взаємодія яких обумовлює спонтанну намагніченість окремих областей (*доменив*) матеріалу.

Домени — макроскопічні ділянки із лінійними розмірами 1–10 мкм, в яких власні магнітні моменти сусідніх йонів співнапрямлені, а отже, домени *мають власну намагніченість*.



За відсутності зовнішнього магнітного поля *магнітні моменти окремих доменив* орієнтовані хаотично, тому зразки феромагнітного матеріалу зазвичай розмагнічені



Коли феромагнітний зразок поміщують у зовнішнє магнітне поле, то *домени*, магнітні моменти яких зорієнтовані за напрямком цього поля, *збільшуються* за рахунок зменшення доменив з іншою орієнтацією магнітних моментів; також відбувається частковий *поворот магнітного моменту* в кожному домені

Феромагнетики залишаються намагніченими й у разі відсутності зовнішнього магнітного поля.

Феромагнетики, як і парамагнетики, *втягуються* в магнітне поле.

Матеріали, які після припинення дії зовнішнього магнітного поля залишаються намагніченими довгий час, називають *магнітножорсткими феромагнетиками*.

Їх застосовують для виготовлення *постійних магнітів*.

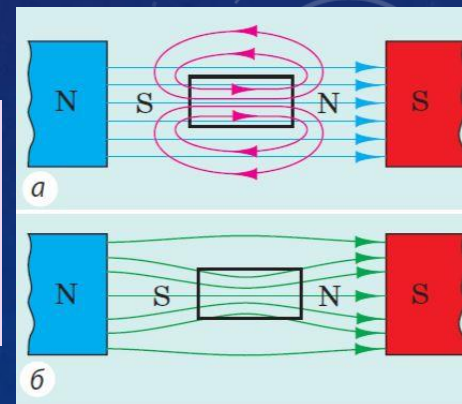
Феромагнітні матеріали, які легко намагнічуються і швидко розмагнічуються, називають *магнітном'якими феромагнетиками*.

Їх застосовують для виготовлення *осердь* електромагнітів, двигунів, трансформаторів, електромеханічних генераторів тощо.

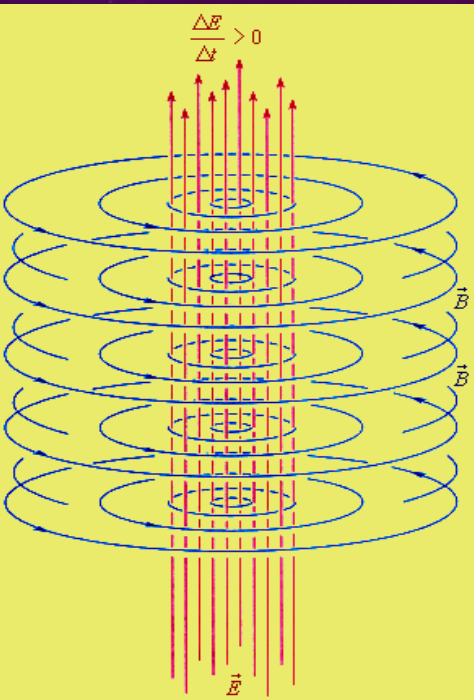
Абсолютне значення магнітної сприйнятливості для феромагнетиків становить близько

$$\chi_{\Phi} \approx 10^2 \div 10^5$$

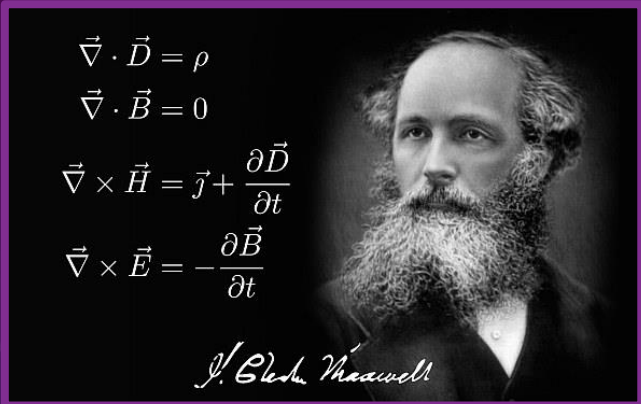
Ферити – феромагнітні матеріали, що не проводять електричного струму, – використовують у радіотехніці для виготовлення осердь котушок індуктивності, внутрішніх антен малогабаритних приймачів тощо.



3.20. Електромагнітне поле. Струм зміщення. Рівняння Максвела в інтегральній та диференціальній формах.



Закон електромагнітної індукції

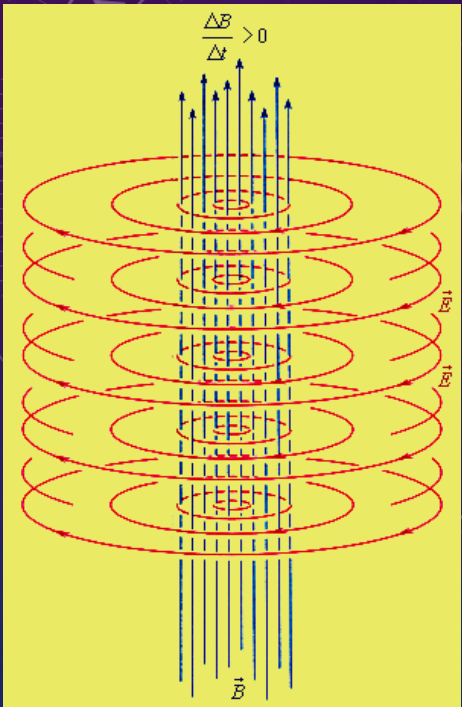


$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

Узагальнюючи закони електромагнетизму, Джеймс Клерк Максвелл висловив дві гіпотези.

1. Гіпотеза про існування, поряд з електростатичним, вихрового електричного поля, так що сумарне електричне поле буде:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{ст}} + \vec{E}_{\text{вихр}}$$



Гіпотеза Максвела

Причому, циркуляція електростатичного поля дорівнює нулеві:

$$\oint_L (\vec{E}_{\text{ст}} \cdot d\vec{\ell}) = 0,$$

а вихрового численно рівна ЕРС індукції:

$$\oint_L (\vec{E}_{\text{вихр}} \cdot d\vec{\ell}) = \varepsilon_i$$

2. Гіпотеза про існування, поряд зі струмом провідності $\vec{j}_{\text{пр}}$, струмів зміщення – змінного електричного поля, яке також здатне породжувати магнітне поле:

$$\vec{j}_{\text{зм}} = \frac{d\vec{D}}{dt}$$

3.20. Електромагнітне поле. Струм зсуву. Рівняння Максвелла в інтегральній та диференціальній формах.

Розглянемо процес розрядження конденсатора та існування струму у колі

Числове значення густини струму у товщі обкладки дорівнює похідній за часом від густини заряду:

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

$$\sigma = \frac{q}{S} \Rightarrow q = \sigma S$$

$$j = \frac{I}{S} = \frac{dq}{dt \cdot S} = \frac{d(\sigma S)}{dt \cdot S} = \frac{S d\sigma}{dt \cdot S} \Rightarrow$$

$$j = \frac{d\sigma}{dt}$$

У просторі між обкладками така зміна густини заряду зумовлює зміну вектора індукції електричного поля.

(згідно з теоремою Гауса для електричного поля конденсатора $\mathbf{D} = \boldsymbol{\sigma}$).

Зміну вектора електричної індукції Дж. К. Максвелл назвав **струмом зміщення**:

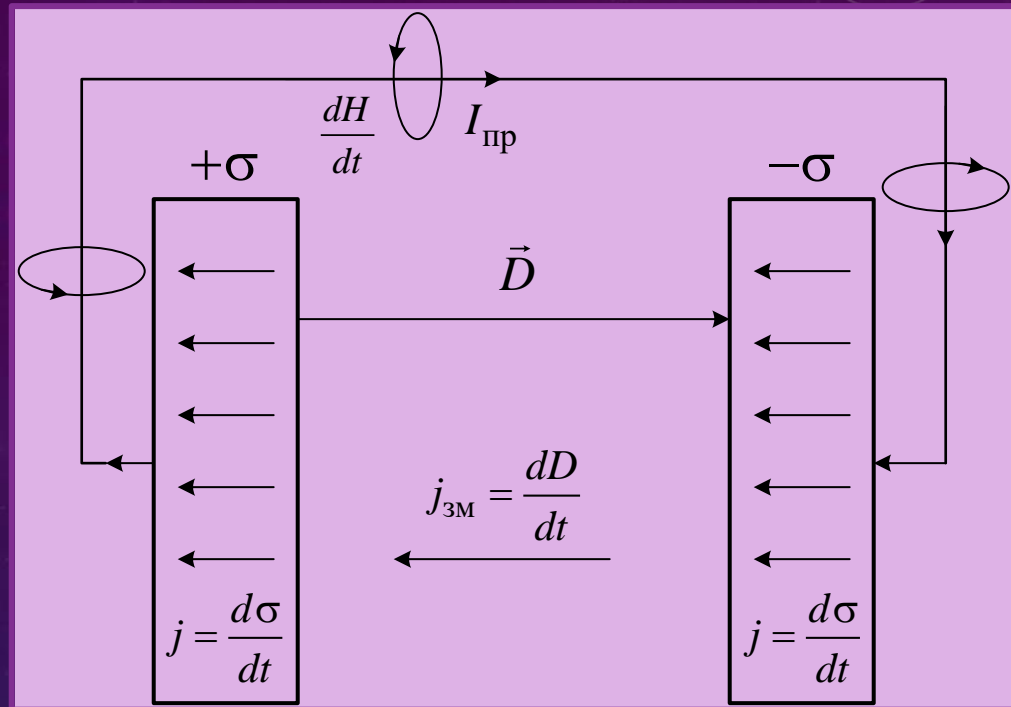
$$\frac{dD}{dt} = j_{\text{зМ}}$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dI_{\text{зМ}}}{dS} \Rightarrow$$

$$I_{\text{зМ}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S (D dS)$$

Оскільки при розрядженні конденсатора поле між його обкладками зменшується, то похідна dD/dt від'ємна, отже, вектор $\vec{j}_{\text{зМ}}$ спрямований протилежно до вектора \vec{D} .

Висновок: під час розрядження конденсатора струм провідності замикається струмом зміщення!!!



3.20. Електромагнітне поле. Струм зміщення. Рівняння Максвела в інтегральній та диференціальній формах.

Отже, аналогічно до закону електромагнітної індукції, зі зміною у часі індукції D (зміщення) електричного поля виникає магніторушійна сила \mathcal{E}_m .

Тобто зміна у часі електричного поля має спричиняти виникнення вихрового магнітного поля:

$$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$$

Крім цього, як відомо, вихрове магнітне поле утворюється також струмами провідності, що описується законом повного струму:

$$\oint_l (\vec{H} d\vec{l}) = \int_S (\vec{j} d\vec{S})$$

Поєднуючи обидві причини виникнення вихрового магнітного поля та, матимемо:

$$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \int_S (\vec{j} d\vec{S}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$$

Висновок: в природі існує *два джерела вихрового магнітного поля*

– струм провідності $I = \int_S (\vec{j} d\vec{S})$

– змінне у часі електричне поле $I_{\text{зМ}} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$

Система рівнянь Максвелла

- є узагальненим математичним записом основних експериментальних законів електромагнітних явищ у довільному середовищі;
- Встановлює співвідношення між векторними характеристиками електромагнітного поля E , B , D та H та розподілом у просторі їхніх джерел: електричних зарядів і струмів.

Перше рівняння Максвелла – це узагальнення *закону Біо – Савара – Лапласа* і є більш узагальненою формою *закону повного струму*, який відображає той експериментальний факт, що джерелами вихрового магнітного поля можуть бути струми провідності і струми зміщення.

$$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \int_S (\vec{j} d\vec{S}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_S (\vec{D} d\vec{S})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Друге рівняння Максвелла є математичним записом експериментального *закону електромагнітної індукції Фарадея*. Узагальнений фізичний зміст його полягає в тому, що будь-яка зміна в часі магнітного поля спричиняє збудження *вихрового електричного поля*.

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = - \frac{d}{dt} \int_S (\vec{B} d\vec{S})$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Третє рівняння Максвелла відображає експериментальний факт *відсутності в природі магнітних зарядів*, тобто відсутність джерел магнітного поля, подібних до джерел електричного поля (зарядів).

$$\int_S (\vec{B} d\vec{S}) = 0$$

$$\text{div} \vec{B} = 0$$

Четверте рівняння Максвелла є узагальненням, на основі *теорему Гаусса*, *закону Кулона* і фізично вказує на *існування в природі джерел електричного поля* у вигляді електричних зарядів, розподілених у просторі з об'ємною густиною ρ

$$\int_S (\vec{D} d\vec{S}) = \int_V \rho dV$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho$$

Система рівнянь Максвелла

Матеріальні рівняння відображають властивості середовища і пов'язують між собою окремі характеристики електромагнітного поля:

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

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

Найважливіший **висновок** теорії Дж. Максвелла:

існування магнітного поля струмів зміщення, дав Максвеллу можливість **передбачити** існування **електромагнітних хвиль** – змінного електромагнітного поля, що поширюється у просторі з кінцевою швидкістю.

Цей висновок і теоретичні дослідження властивостей електромагнітних хвиль привели Максвелла до створення **електромагнітної теорії світла**, згідно з якою **світло також є електромагнітною хвилею**.