

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

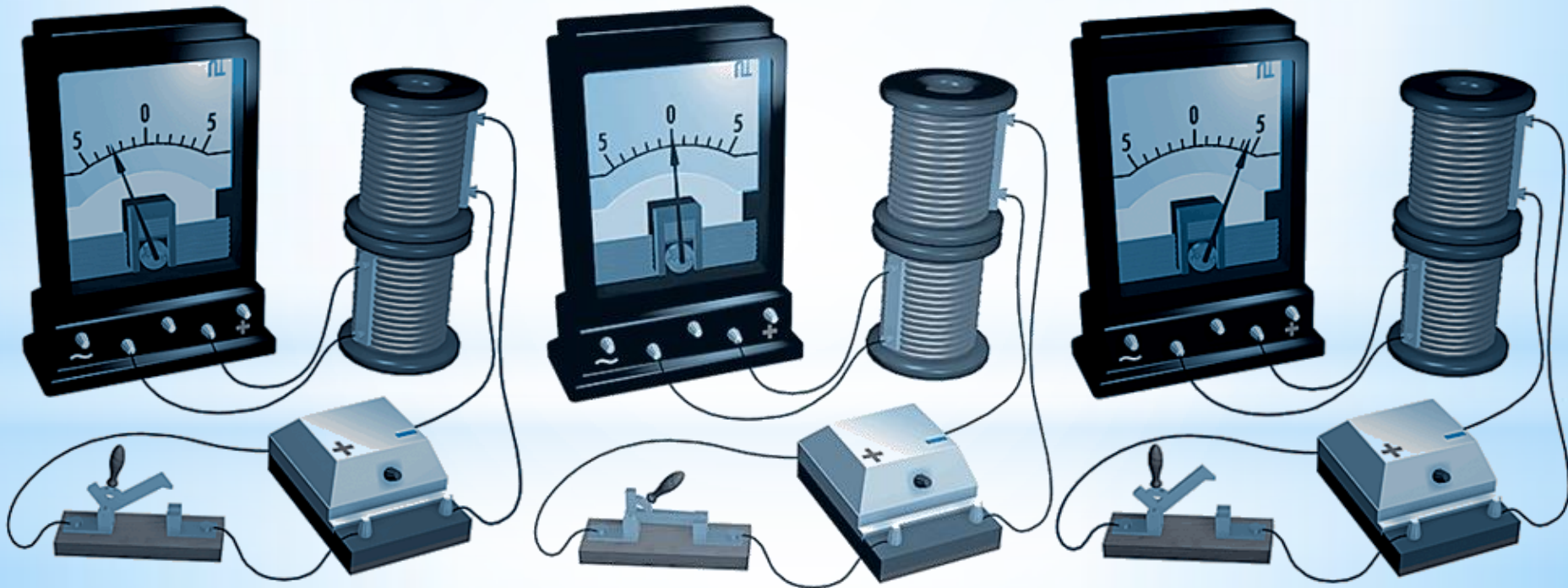
Досліди Фарадея

Дослід 1. Якщо в замкнений на гальванометр соленоїд вводити або виводити постійний магніт, то в моменти його руху спостерігається відхилення стрілки гальванометра; напрями відхилення стрілки при введенні та виведенні протилежні. Відхилення стрілки гальванометра тим більше, чим більше швидкість руху магніту відносно котушки. У разі зміни полярності магніту напрям відхилення стрілки зміниться.



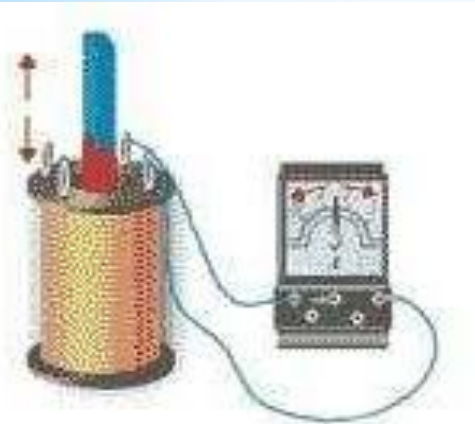
Досліди Фарадея

Дослід II. Кінці однієї з котушок, вставлених одна в другу, приєднуються до гальванометра, а через іншу котушку пропускається струм. Відхилення стрілки гальванометра спостерігається в моменти ввімкнення або вимкнення струму, в моменти його збільшення або зменшення або у разі переміщування котушок одна відносно одної. Напрями відхилень стрілки гальванометра також протилежні у разі ввімкнення і вимкнення струму, його збільшення і зменшення, зближення і віддалення котушок.

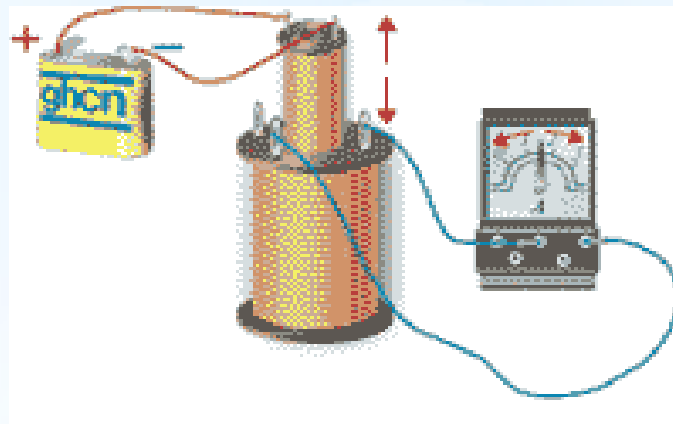


електричний струм у другій котушці виникає при замиканні або розмиканні кола першої котушки

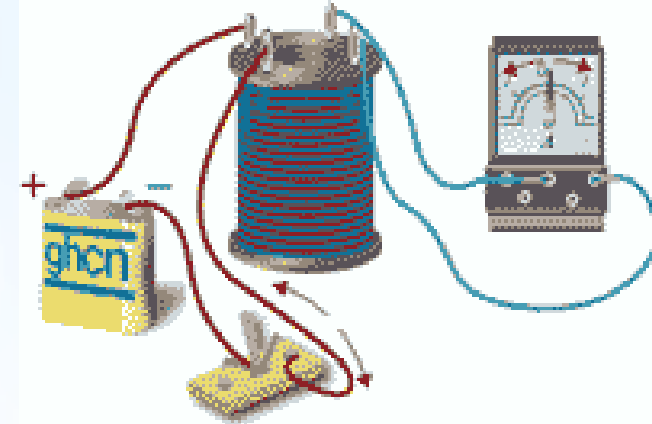
Відкриття М. Фарадея полягало у тому, що електричний струм у замкненому контурі може виникнути під час:



1) Руху магніту відносно котушки



2) Руху котушок одна відносно іншої



3) Зміни сили струму в колі першої котушки за допомогою реостата або ключа



4) Обертання контуру в магнітному полі



5) Обертання магніту всередині контуру

Висновки з дослідів Фарадея

Експериментальні спостереження М. Фарадея сприяли відкриттю нового закону про зв'язок електричного і магнітного полів: *у тих областях, де змінюється магнітне поле, виникає електричне поле*, яке саме і спричинює направлений рух електронів у провідному контурі, тобто зумовлює виникнення електрорушійної сили при всякій зміні магнітного потоку.

1. Індукційний струм виникає при будь-якій зміні зчепленого з контуром потоку магнітної індукції.
2. Сила індукційного струму абсолютно не залежить від способу зміни потоку магнітної індукції, а визначається лише швидкістю його зміни.

Електромагнітна індукція – це явище виникнення електричного струму у замкненому контурі при зміні потоку магнітної індукції, що охоплюється цим контуром.

Кількісно описується **законом 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:

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

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

де ε_i – електрорушійна сила індукції,
 Φ – магнітний потік вектора індукції магнітного поля через площу контуру,
“–“ – пояснюється тим, що індукційний струм у контурі завжди має такий напрямок, що його власне магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, який збудив цей струм – **правило Ленца**.

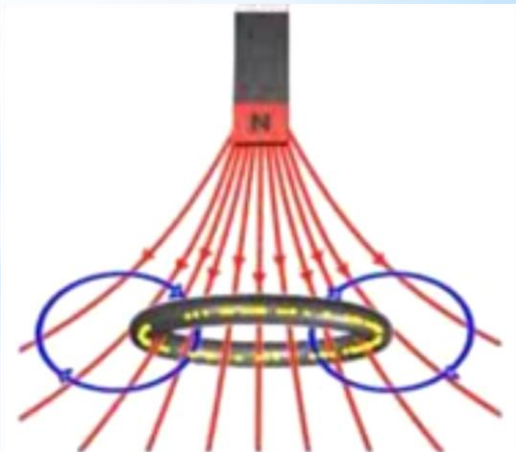
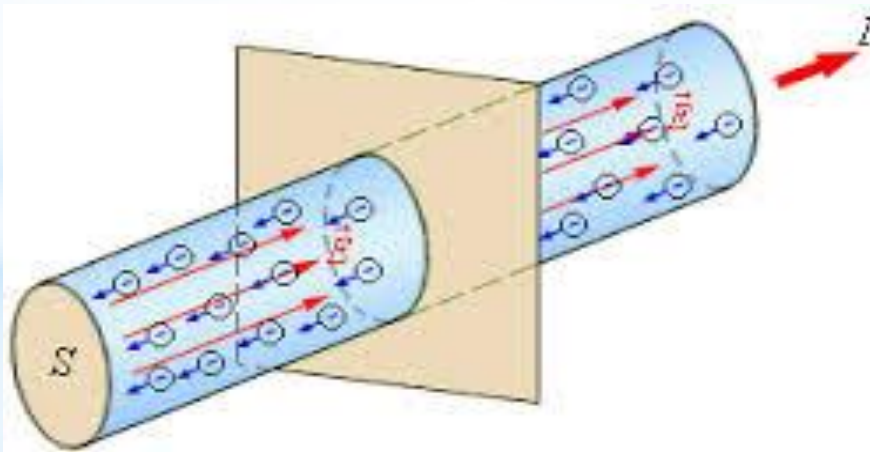
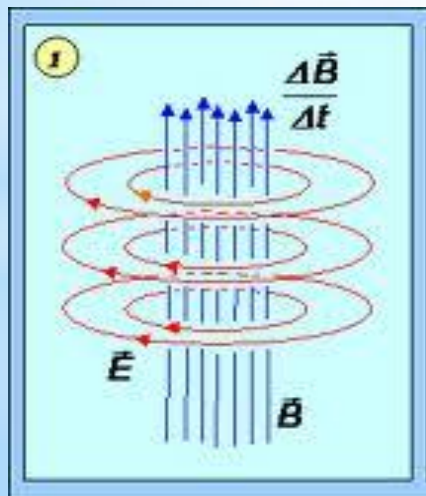
Індукційний струм в контурі завжди має такий напрям, що створюване ним магнітне поле заважає змінюванню магнітного потоку, який викликав цей індукційний струм.

Принцип правила Ленца сьогодні реалізують у транспортно-будівельній галузі для міжміських пасажирських перевезень. Це потяги на так званій магнітній подушці. Під днищем вагону такого потягу змонтовані потужні магніти, розташовані у декількох сантиметрах від сталевого полотна. При русі потягу 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 потягу.

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 розвивати швидкість більше 500 км/год, що робить їх ідеальним засобом міжміського сполучення середньої дальності.



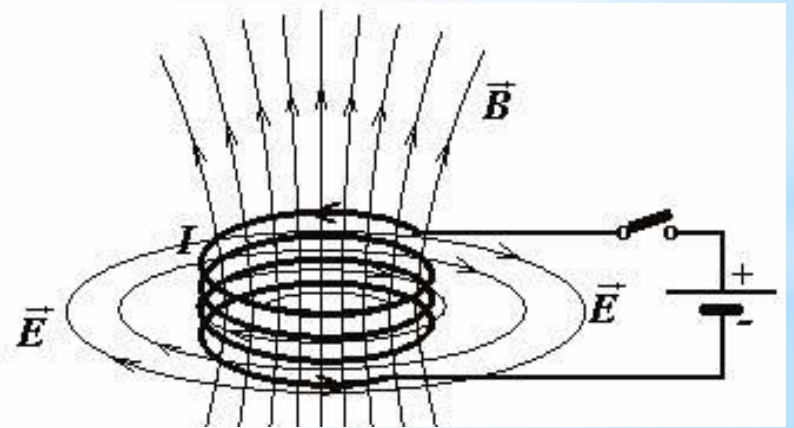
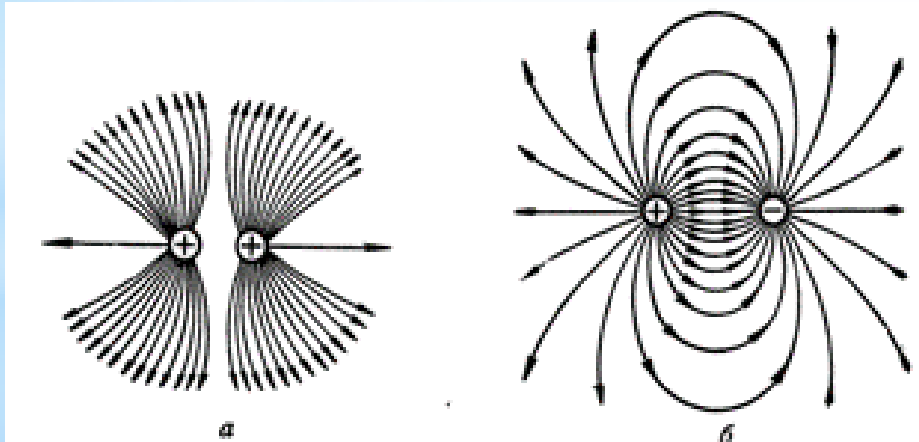
Якщо М. Фарадей уявляв електромагнітну індукцію як збудження електричного струму в замкненому провіднику під дією змінного магнітного поля, то, на думку Дж. К. Максвелла, суть явища електромагнітної індукції зводиться до виникнення вихрового електричного поля скрізь, де є змінне магнітне поле, і, отже для прояву явища електромагнітної індукції наявність провідників не є обов'язковою.



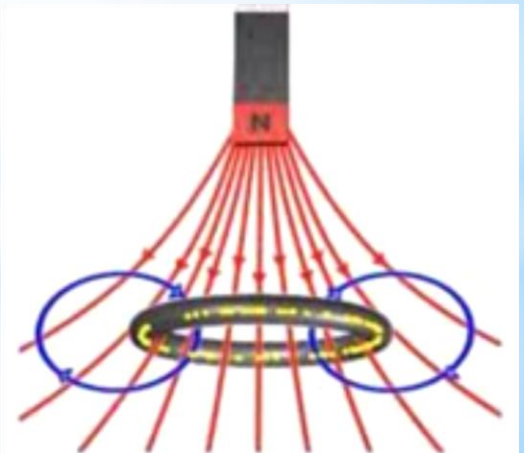
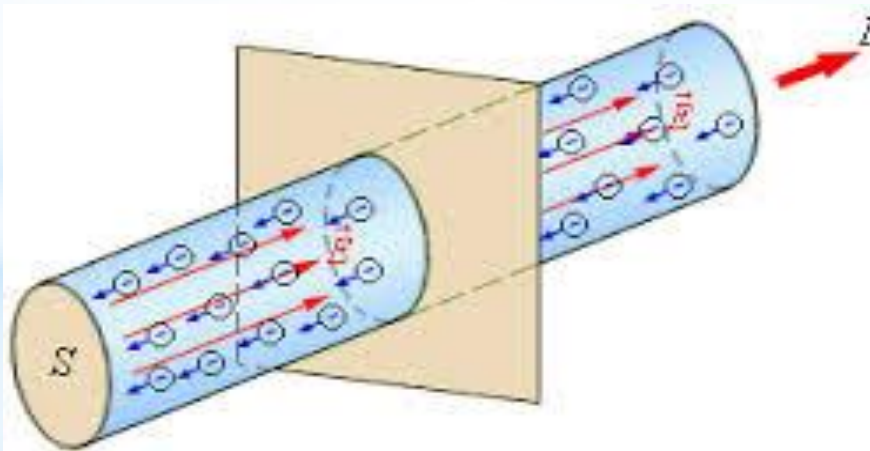
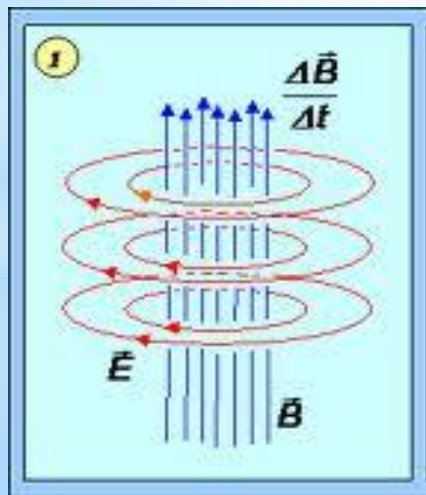
Вихрове електричне поле

Виникнення струму у провіднику можливим лише при наявності у ньому електрорушійної сили. Отже, при будь-якій зміні магнітного потоку, зчепленого з замкненим провідним контуром, в ньому виникає ЕРС. Але виникнення ЕРС, в свою чергу, є проявом електричного поля. Таким чином, при зміні магнітного потоку, зчепленого з замкненим провідним контуром, в цьому контурі виникає електричне поле, яке називають індукційним. Індукційне електричне поле відрізняється від електричного поля нерухомого електричного заряду. Силкові лінії індукційних електричних полів відрізняються від силових ліній електричних полів нерухомих зарядів тим, що вони завжди замкнені. Тому індукційне електричне поле називають вихровим.

Електростатичне поле	Вихрове (індукційне) електричне поле
Створюється зарядженими тілами	Створюється змінним магнітним полем
Силкові лінії починаються на позитивному заряді і закінчуються на негативному (лінії незамкнені)	Силкові лінії замкнені (вихрове поле)
Потенціальне	Не потенціальне

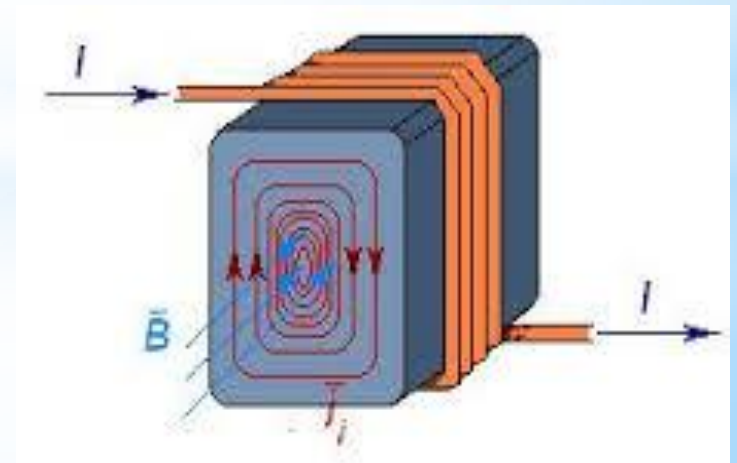


Виникнення індукційного струму в замкненому провідному контурі – це лише один із проявів виникнення вихрового електричного поля під дією змінного в часі магнітного поля. Вихрове поле напруженістю E може спричинювати й інші дії, наприклад, поляризувати діелектрик, викликати пробій діелектрика між обкладками конденсатора, прискорювати або гальмувати заряджені частинки тощо.

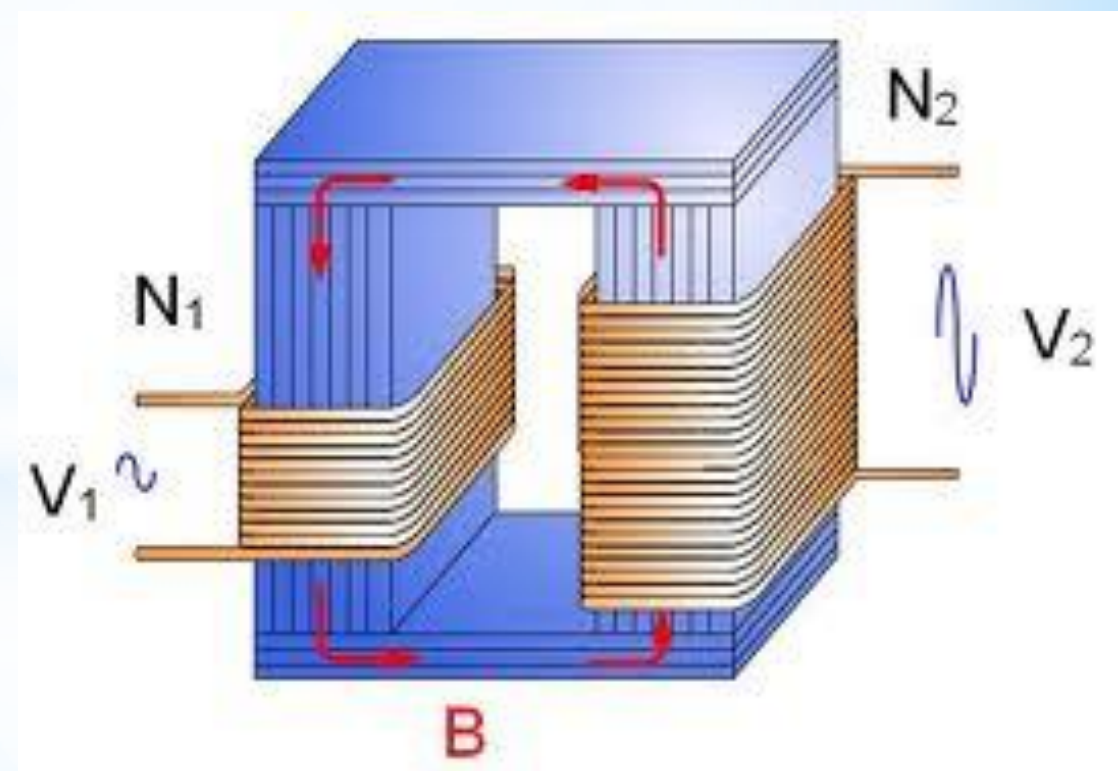
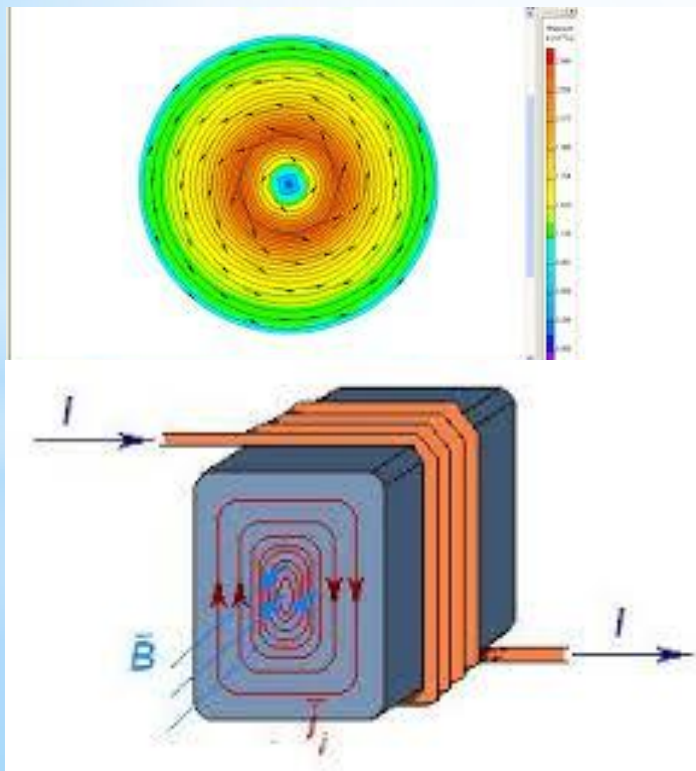


Якщо в тонких провідниках зі зміною магнітного потоку, що їх пронизує, індукуються струми провідності, то в масивних провідниках – індукуються замкненні електричні струми, які називають *вихровими* або *струмами Фуко*.

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



Вихрові струми також зумовлюють нагрівання провідників. Тому для зменшення втрат на нагрівання якорі генераторів та осердя трансформаторів роблять не суцільними, а виготовляють із тонких пластин, відокремлених одна від іншої шарами ізолятора, і встановлюють так, щоб вихрові струми були направлені упоперек пластин.



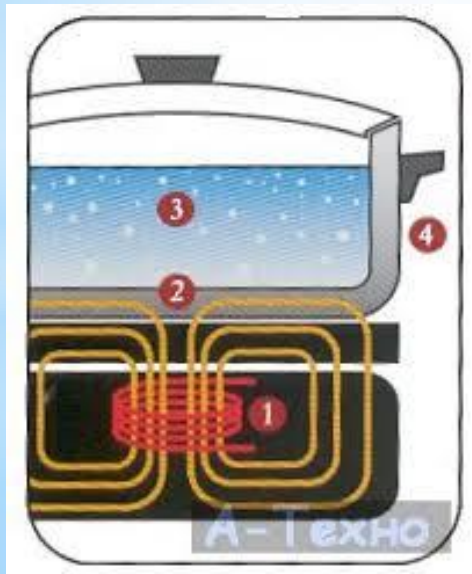
Джоулеве тепло, що виділяється струмами Фуко, у промисловості використовується в індукційних пічках. Індукційна піч являє собою тигель, який вводять всередину котушки з високочастотним струмом. У металі виникають інтенсивні вихрові струми, здатні розігріти його до плавлення. Такий спосіб дозволяє плавити метали у вакуумі, в результаті чого отримують надчисті матеріали.



Індукційні плавильні пічки використовуються для розплавлення та отримання сталевих, чавунних відливок високої якості, а також для лиття феросплавів, легуючих та нержавіючих сплавів. Застосовуються у ливарних цехах металургійних заводів, а також у цехах точної виливки, зокрема для виливки кольорових металів (бронзи латуні, алюмінію, міді тощо).

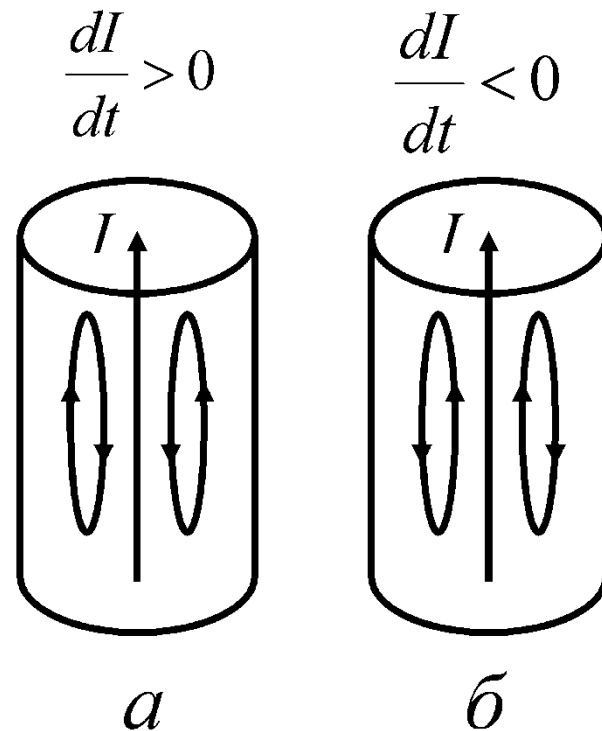


У побуті використовують індукційні плити для приготування їжі. Головна їх відмінність від електричних і газових плит полягає у тому, що тепло генерується безпосередньо на посуді, в якій готується їжа, а не на поверхні самої плити. Відмінність індукційних плит від традиційних полягає у їх енергоефективності, скороченні часу готування, безпечності щодо опіків, значне зменшення нагрівання навколишнього середовища.

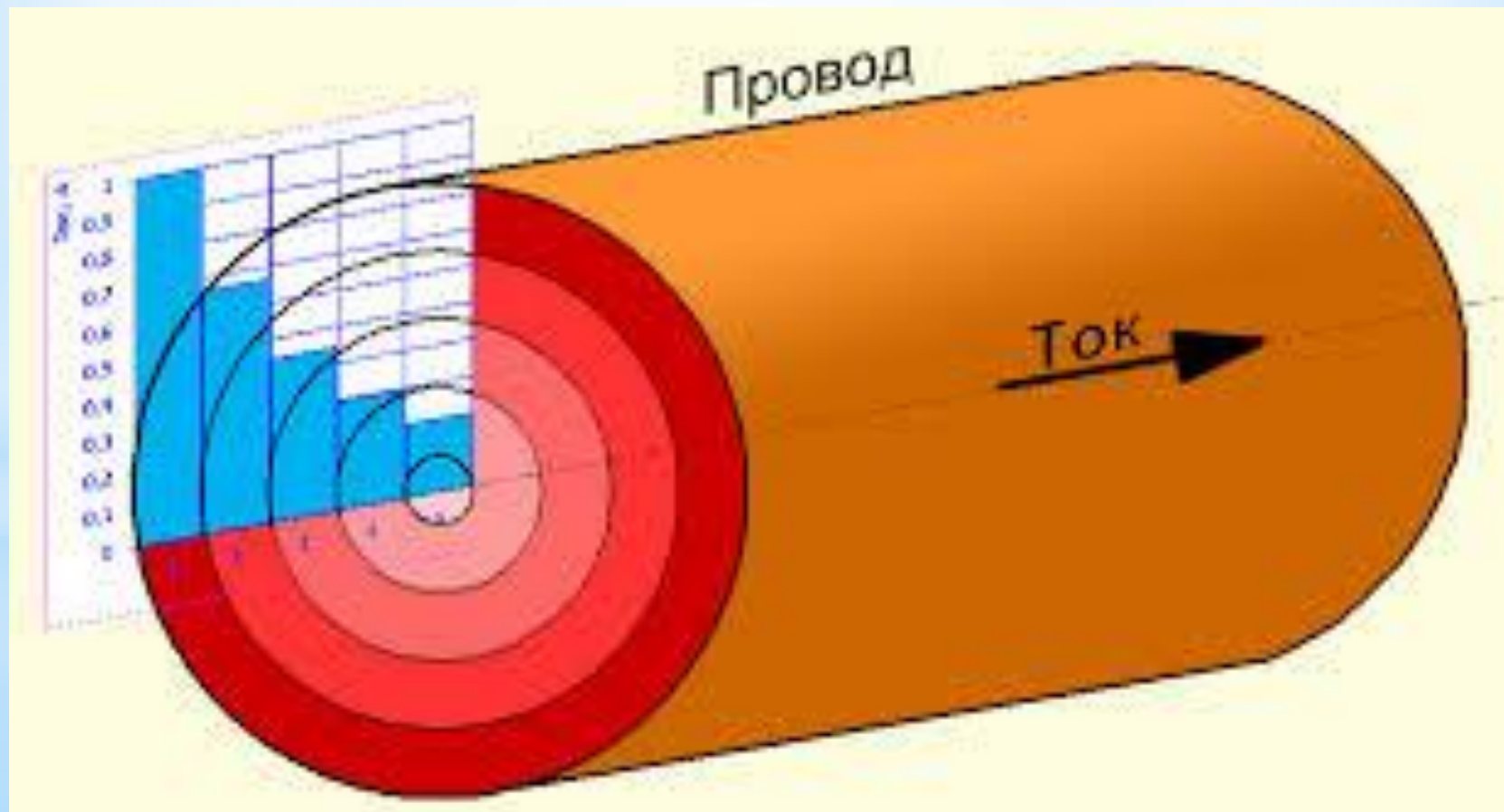




Вихрові струми виникають і у провідниках, по яким тече змінний струм. Напрямок цих струмів можна визначити за правилом Ленца. На рисунку *а* показано напрями вихрових струмів при зростанні первинного струму у провіднику, а на рисунку *б* – при його зменшенні. В обох випадках напрями вихрових струмів такі, що вони протидіють зміні первинного струму всередині провідника і сприяють його зміні поблизу провідника.



Таким чином, внаслідок виникнення вихрових струмів швидкозмінний струм виявляється розподіленим по перерізу провідника нерівномірно – він нібито витісняється на поверхню провідника. Це явище отримало назву **скін-ефекту** (від англ. skin – шкіра) або **поверхневого ефекту**.



Так як струми високої частоти практично проходять по тонкому поверхневому шару, то проводи для них роблять пустими всередині.

Так в дешевих електроприладах провідники виготовляють з пластика, а методом напилювання поверху наносять тонкий шар металу (ремонт така проводка не підлягає).

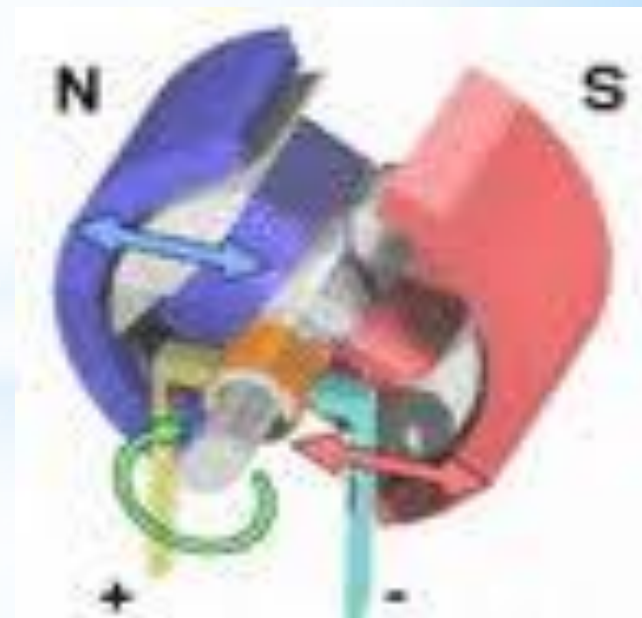




3. Генератори електричного струму.

Вперше спосіб практичного використання явища електромагнітної індукції запропонував Фарадей. Пристрої, що працюють за принципом явища електромагнітної індукції та призначені для перетворення енергії механічного руху в енергію електричного струму, називають електричними генераторами.

Схему генератора змінного струму подано на рисунку: між полюсами постійного магніту обертається рамка, у якій, згідно закону М. Фарадея виникає електрорушійна сила.



ЕРС електромагнітної індукції

*ЕРС, що виникає у провідниках при зміні магнітного потоку, називають **ЕРС електромагнітної індукції \mathcal{E}_i** . Струм, що виникає у замкнених провідниках при зміні магнітного потоку, називають **індукційним струмом**.

ЕРС індукції \mathcal{E}_i виникає у кожному відрізку провідника навіть у тому випадку, якщо провідник не є замкненим. Прояв ЕРС електромагнітної індукції у провідниках виявляється різницею потенціалів, що виникає на його кінцях .

ЕРС електромагнітної індукції \mathcal{E}_i виявляється розподіленою, на відміну від ЕРС джерела струму, яка є зосередженою безпосередньо у самому джерелі.

Явище виникнення індукційного струму в провіднику внаслідок зміни магнітного потоку, зумовленої зміною струму в цьому ж провіднику, називають самоіндукцією.

Величина електрорушійної сили самоіндукції була визначена американським фізиком Дж. Генрі:

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

Порівнюючи закон Генрі та закон Фарадея:

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

можна зробити висновок, що магнітний потік Φ , зумовлений зміною струму в провіднику, пропорційний силі струму:

$$\Phi = LI ,$$

де L – індуктивність контуру – коефіцієнт пропорційності, який 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, $L=[Гн]$.

Оскільки

$$L = \frac{|\varepsilon_{si}|}{\frac{dI}{dt}},$$

то фізичний зміст індуктивності провідника полягає у тому, що: *індуктивність* – це характеристика, що визначає міру інертних властивостей провідника стосовно зміни струму, чисельно дорівнює тій ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі при швидкості зміни сили струму в ньому 1А за 1 с.

Визначимо індуктивність довгого соленоїда завдовжки l , з площею перерізу S і кількістю витків N . Для цього застосуємо закон Генрі:

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d\Phi}{dt},$$

де Φ – повний потік вектора індукції крізь усі витки (потокозчеплення).

Для довгого соленоїда потік вектора індукції магнітного поля крізь поверхню площею S , яку охоплює один виток

$$\Phi_0 = BS = \mu\mu_0 I \frac{N}{l} S.$$

Повний потік крізь усі N витків

$$\Phi = \Phi_0 N = \mu\mu_0 I \frac{N^2}{l} S.$$

Тоді

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\left(\mu\mu_0 I \frac{N^2}{l} S\right)}{dt} = -\mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S \frac{dI}{dt},$$

порівнюючи останнє рівняння із законом Генрі

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt},$$

Одержуємо

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

Оскільки $Sl=V$, то формулу індуктивності довгого соленоїда можна записати так:

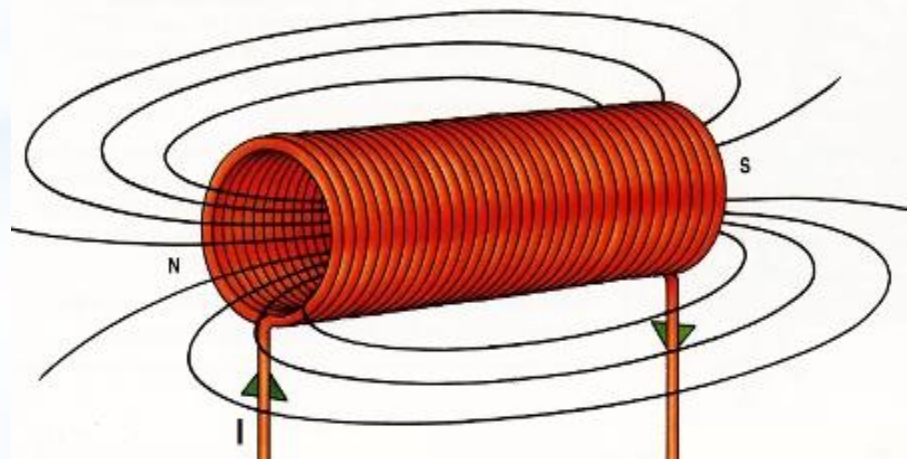
$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S \text{ або } .$$

Самоіндукція

* При зміні сили струму в контурі змінюватиметься і зчеплений з ним магнітний потік, а тому буде індукватися ЕРС. Явище виникнення ЕРС в контурі при зміні в ньому сили струму називається *самоіндукцією*.

Розрахуємо ЕРС самоіндукції, яка виникає у нескінченно довгому соленоїді, магнітне поле якого є однорідним та знаходиться всередині його об'єму, заповненого середовищем з магнітною проникністю μ . Магнітний потік Φ_1 , що пронизує кожен виток перерізом S ,

$$\Phi_1 = BS = \mu\mu_0 HS = \mu\mu_0 \frac{IN}{l} S$$



Самоіндукція

* При зміні струму в соленоїді у кожному витку виникає ЕРС самоіндукції :

$$\mathcal{E}_{si1} = -\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\mu\mu_0 \frac{IN}{l} S \right)$$

В N послідовно з'єднаних витках соленоїда виникає ЕРС самоіндукції

$$\mathcal{E}_{si} = \mathcal{E}_{si1} N = -\frac{d}{dt} \left(\mu\mu_0 \frac{IN^2}{l} S \right) = -\frac{d}{dt} (\mu\mu_0 n^2 l S)$$

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d}{dt} (LI)$$

Тут $L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu\mu_0 n^2 l S = \mu\mu_0 n^2 V$ - коефіцієнт самоіндукції або індуктивність.

Індуктивність залежить від форми, розмірів провідника та магнітної проникності середовища, яке його оточує.

$$\mathcal{E}_{si} = - \frac{d}{dt} (LI)$$

ІНДУКТИВНІСТЬ ПРОВІДНИКА

* При $\frac{dI}{dt} = 1 \frac{A}{c}$ $|\mathcal{E}_{si}| = |L|$, тобто

індуктивність - це фізична величина, яка чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає у провіднику при швидкості зміни струму в ньому 1 A/c .

$$[L] = 1 \text{ Гн}$$

Один Гн (генрі) - це індуктивність такого провідника, в якому за швидкості зміни струму, рівній 1 A/c , індукується ЕРС самоіндукції 1 В .

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d}{dt}(LI)$$

ІНДУКТИВНІСТЬ ПРОВІДНИКА

* Якщо $L = \text{const}$, то $\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}$

Отже, ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни струму у провіднику.

Якщо ж $L \neq \text{const}$ (це можливо при $\mu = f(H)$), то

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d}{dt}(LI) = -L \frac{dI}{dt} - I \frac{dL}{dt}$$

Тобто при наявності феромагнітного середовища та у змінних магнітних полях коефіцієнт пропорційності у виразі для ЕРС самоіндукції не дорівнює L .

Таким чином, у провідниках зі змінним струмом існують одночасно дві ЕРС - джерела струму та самоіндукції.

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d}{dt}(LI)$$

ІНДУКТИВНІСТЬ ПРОВІДНИКА

* При зростанні струму $\frac{dI}{dt} > 0$ і $\mathcal{E}_{si} < 0$ - ЕРС самоіндукції перешкоджає збільшенню струму у провіднику.

При зменшенні струму $\frac{dI}{dt} < 0$ і $\mathcal{E}_{si} > 0$ - ЕРС самоіндукції перешкоджає зменшенню струму у провіднику.

Тобто \mathcal{E}_{si} перешкоджає причині, що її породжує (перешкоджає зміні струму у провіднику).

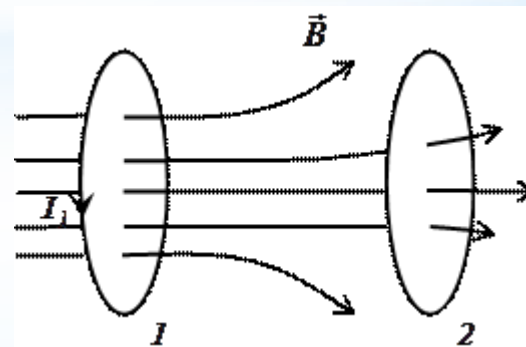
Порівнюючи вирази

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ та } \mathcal{E}_{si} = -\frac{d}{dt}(LI)$$

отримаємо вираз, що пов'язує магнітний потік з індуктивністю:
 $\Phi = LI.$

Взаємодукція

Взаємодукція - це явище, у якому виявляється магнітний зв'язок двох або більше електричних кіл. Внаслідок цього виникає ЕРС індукції в одному з контурів при зміні струму в іншому. Кількісною характеристикою магнітного зв'язку електричних кіл є їх взаємна індуктивність. Якщо два контури (два замкнених провідника) знаходяться в магнітному полі один одного, то при будь-якій зміні струму в одному з них відбувається зміна магнітного потоку, зчепленого з іншим, що викликає появу в ньому ЕРС індукції.



Взаємодукція

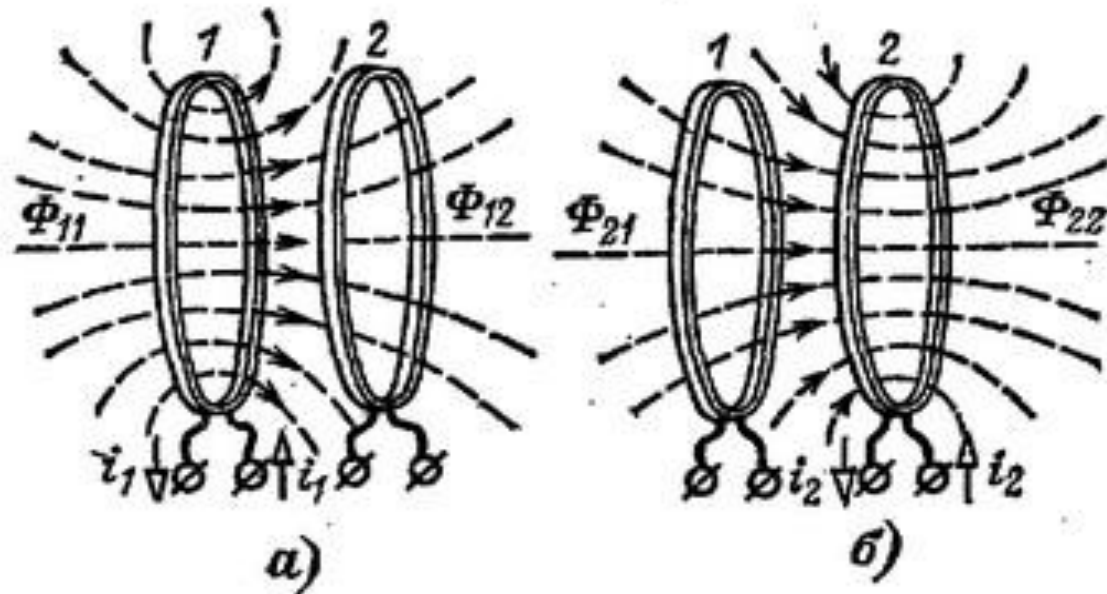
* Розглянемо два контури 1 і 2 з струмами I_1 і I_2 , які розташовані близько один до одного. При протіканні в контурі 1 струму магнітний потік пронизує контур 2:

$$\Phi_2 = LI_1$$

Аналогічно

$$\Phi_1 = LI_2$$

Коефіцієнти пропорційності L , які називаються **взаємною індуктивністю контурів**, виявились однаковими.



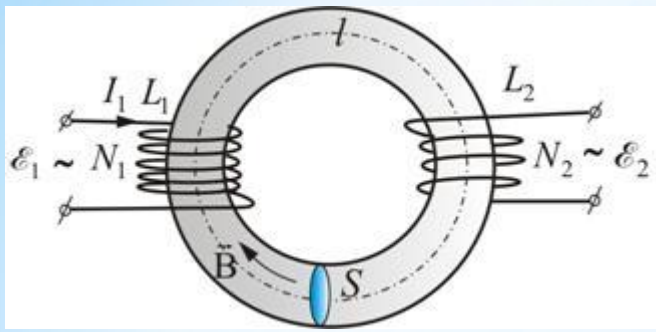
Взаємодукція

* У випадку зміни сили струму в одному з контурів, в другому індукується ЕРС згідно з законом Фарадея:

$$\mathcal{E}_{12} = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -L\frac{dI_1}{dt}$$
$$\mathcal{E}_{21} = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -L\frac{dI_2}{dt}$$

Взаємна індукція - це явище виникнення ЕРС в одному з контурів при зміні сили струму в другому.

Взаємна індуктивність контурів залежить від геометричної форми, розмірів, взаємного розташування контурів, а також від магнітної проникності оточуючого середовища.



Взаємна індуктивність двох котушок на спільному осерді

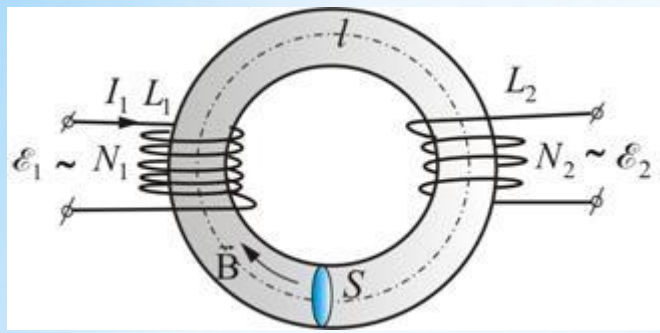
* Розглянемо дві котушки на спільному осерді. Магнітна індукція поля, створюваного першою котушкою з числом витків N_1 , струмом I_1 и магнітною проникністю осердя μ , дорівнюватиме

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

де l - довжина осердя по середній лінії.

Магнітний потік крізь один виток другої котушки

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



Взаємна індуктивність двох котушок на спільному осерді

* повний магнітний потік (потокозчеплення) крізь N_2 витків вторинної обмотки

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

Потік Ψ створюється струмом I_1 , тому взаємна індуктивність

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

ЕРС індукції в нерухомих провідниках

Згідно з законом Фарадея виникнення ЕРС електромагнітної індукції можливе також у випадку *нерухомого контуру*, який знаходиться в *змінному* магнітному полі.

Згідно з трактовкою Максвелла: *всяке змінне магнітне поле збуджує в оточуючому просторі електричне поле*, яке і є причиною виникнення індукційного струму в нерухомому провіднику. Циркуляція цього поля по будь-якому нерухомому контуру провідника є ЕРС електромагнітної індукції

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_B \cdot d\vec{\lambda} = -\frac{d\Phi}{dt} .$$

Енергія та об'ємна густина енергії магнітного поля

* Як відомо, будь-який електричний струм створює магнітне поле, яке має енергію. Енергія магнітного поля дорівнює роботі, яку виконує стороння сила проти ЕРС самоіндукції в процесі зростання струму при вмиканні джерела. Елементарна робота

$$dA = -\varepsilon_{si} dq$$

Оскільки $dq = Idt$, а $\varepsilon_{ci} = -L \frac{dI}{dt}$, то

$$dA = L \frac{dI}{dt} \cdot Idt = LI dI.$$

$$dA = LI dI$$

Енергія та об'ємна густина енергії магнітного поля

*А повна робота при зміні струму від 0 до I буде дорівнювати енергії магнітного поля котушки W_m

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

Врахувавши, що $I = \frac{H}{n}$, а індуктивність соленоїда $L = \mu_0 \mu n^2 V$, для енергії магнітного поля соленоїда отримаємо вираз:

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

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

Енергія та об'ємна густина енергії магнітного поля

* *Об'ємна густина енергії* (або енергія одиниці об'єму) магнітного поля соленоїда, яке однорідне і зосереджене всередині нього, виражається залежністю

$$w_M = \frac{W}{V} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{BH}{2}$$

Порівняємо вираз густини енергії магнітного поля з виразом густини електричного поля

$$w_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{D^2}{2\epsilon_0 \epsilon} = \frac{ED}{2}$$

Бачимо, що ці формули аналогічні.

*Оскільки \vec{B} і \vec{H} характеризують магнітне поле в даній точці, то отримані вирази для густини енергії також є функцією точки. Отже, густина енергії є диференціальною характеристикою поля:

$$w_m = w_m(x, y, z)$$

Повна енергія неоднорідного магнітного поля в об'ємі V

$$W_m = \int_V w_m dV = \int_V \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} dV$$

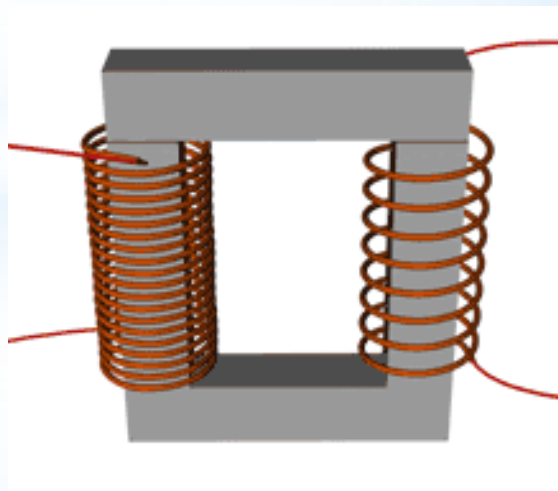
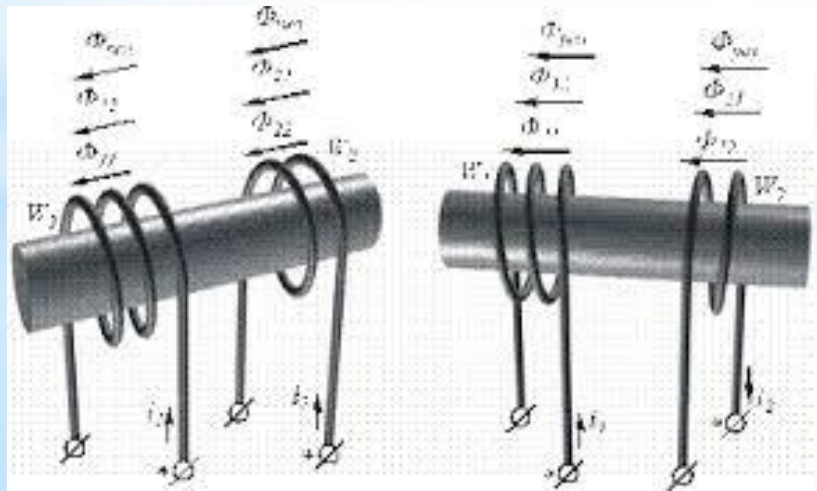
При одночасному існуванні електричного і магнітного полів повна густина енергії електромагнітного поля:

$$w = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} \right)$$



6. Взаємна індуктивність, трансформатори.

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 обумовлений зміною потоку вектора індукції магнітного поля, створюваною струмом сусідніх контурів, такий струм називають *струмом взаємоіндукції*.



*Явище виникнення електрорушійної сили індукції в замкненому контурі, близько розташованому до замкненого контуру в якому тече змінний струм називають **явищем взаємної індукції**.*

