

Лекція № 15

Електромагнітні явища

1. Потік вектора магнітної індукції.
2. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца.
3. Генератори електричного струму.
4. Явище самоіндукції, індуктивність.
5. Перехідні процеси у колі з індуктивністю.
6. Взаємна індуктивність, трансформатори.
7. Рівняння Максвелла.

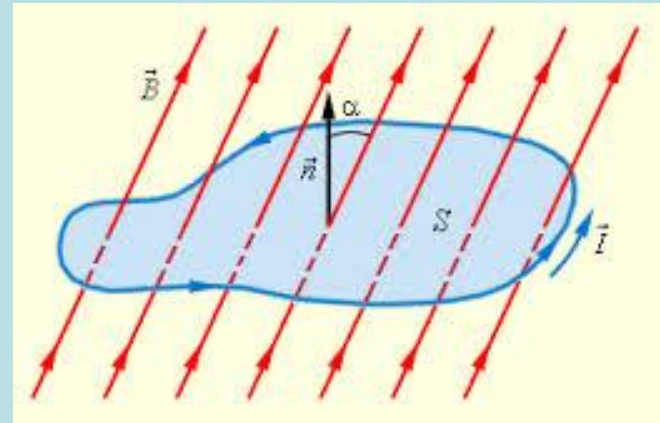
1. Потік вектора магнітної індукції.

Магнітним потоком або потоком вектора індукції магнітного поля називають скалярну фізичну величину, чисельно рівну скалярному добутку вектора індукції магнітного поля на площу контуру, яку пронизують лінії індукції:

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

де α – кут між вектором нормалі до поверхні \vec{n} і вектором \vec{B} .

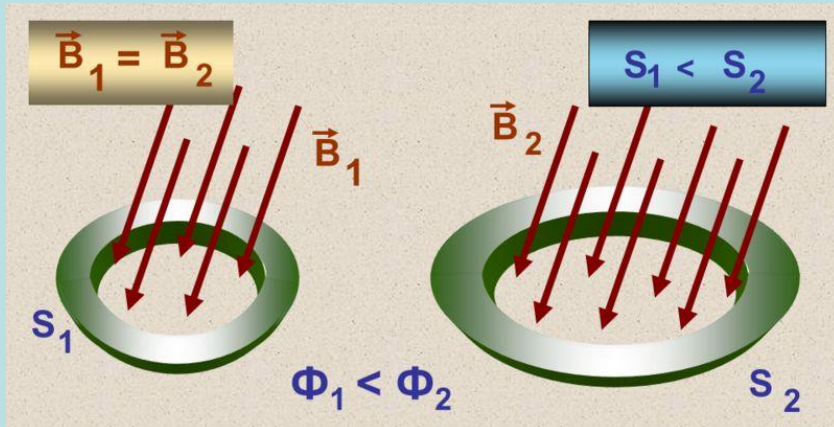
Одиницею вимірювання магнітного поля є 1Вб (вебер): $1\text{Вб} = 1\text{Тл} \cdot 1\text{м}^2$



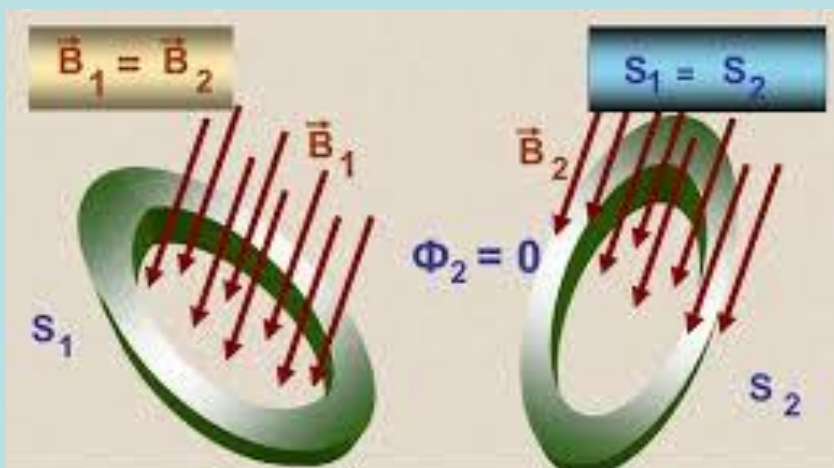


$$\Phi = (\vec{B}\vec{S}) = BS \cos \alpha$$

Магнітний потік пропорційний модулю вектора індукції магнітного поля



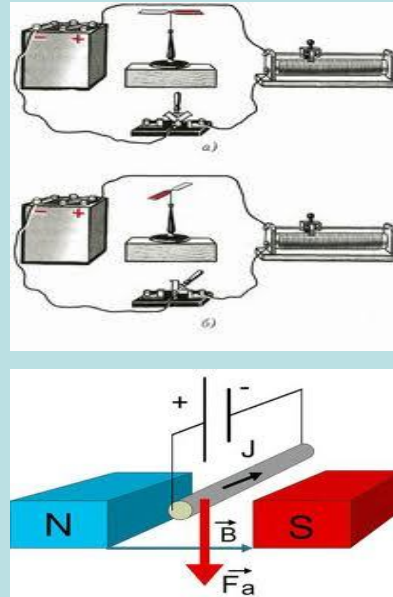
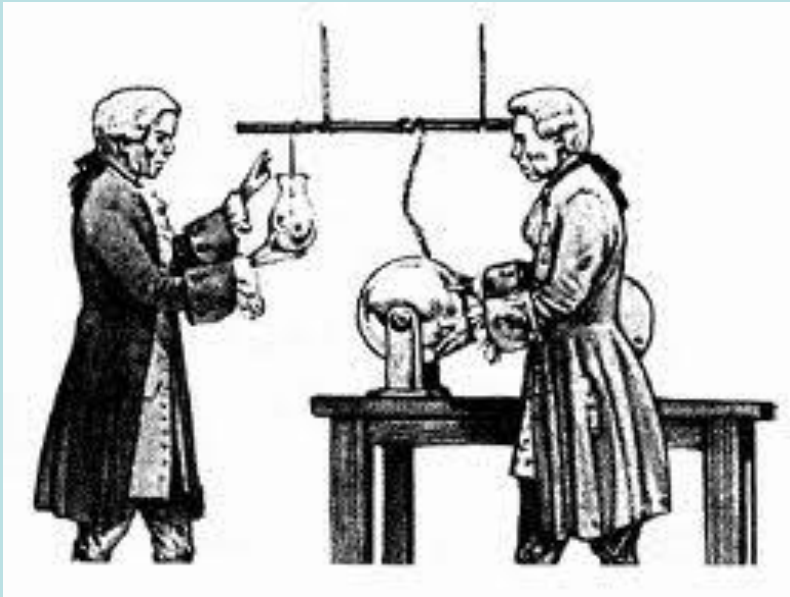
Магнітний потік пропорційний площі контура, яку перетинають лінії індукції магнітного поля



Магнітний потік залежить від взаємного розташування площини контура і лінії індукції магнітного поля

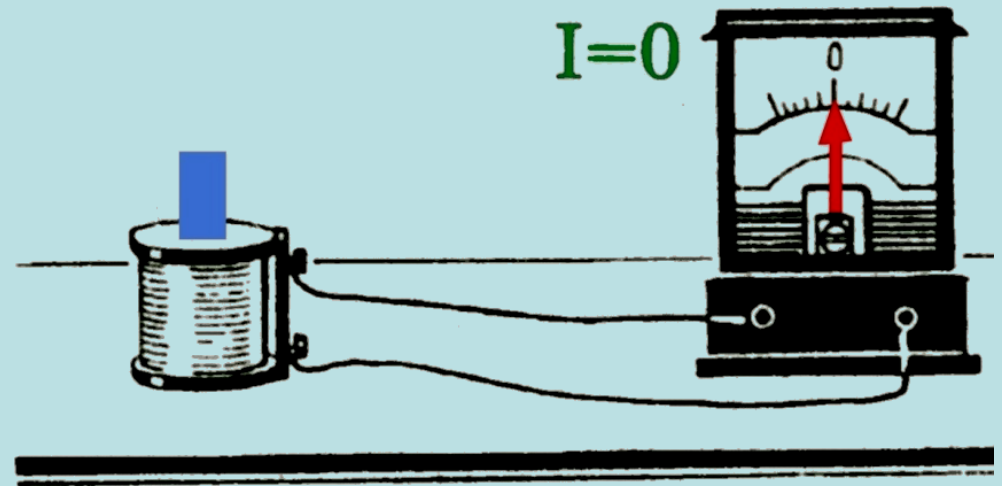
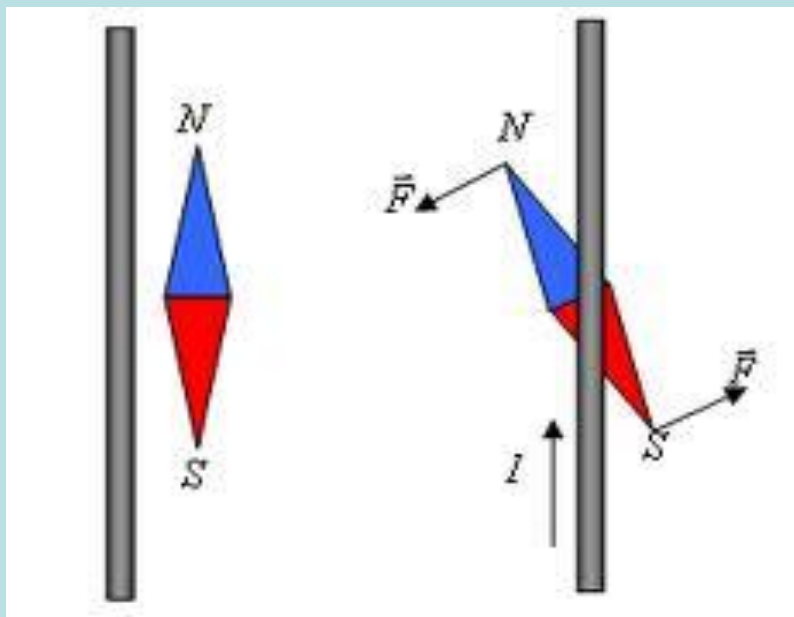
2. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца.

Результати дослідів Х. Ерстеда (здатність електричного поля породжувати навколо себе магнітне поле) та А. Ампера (пондеomotorна дія магнітного поля на провідники зі струмом), проведені у 1820 році, стали основою припущень про можливість одержання електричного поля за рахунок магнітного поля.



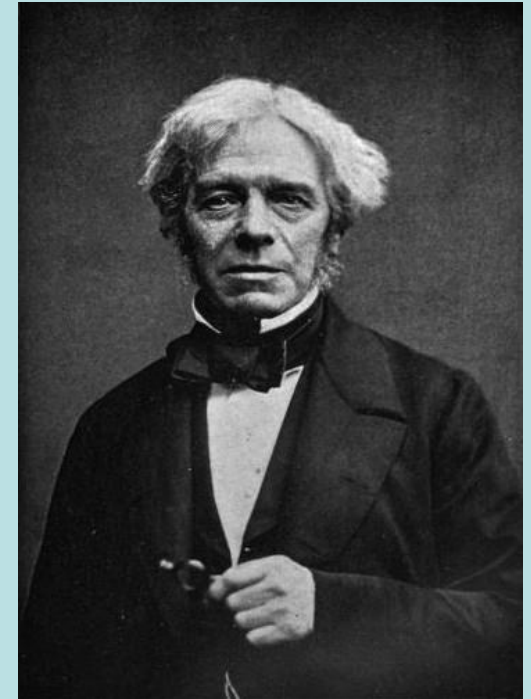
Øрстед (слева) демонстрирует силы влияния электрического тока на магнитную стрелку.

Для перевірки цієї гіпотези проводились різноманітні експерименти. Такі як, наприклад, безрезультатні спроби виявлення струму у замкненому провіднику, розміщеному біля іншого провідника, по якому проходив постійний електричний струм.



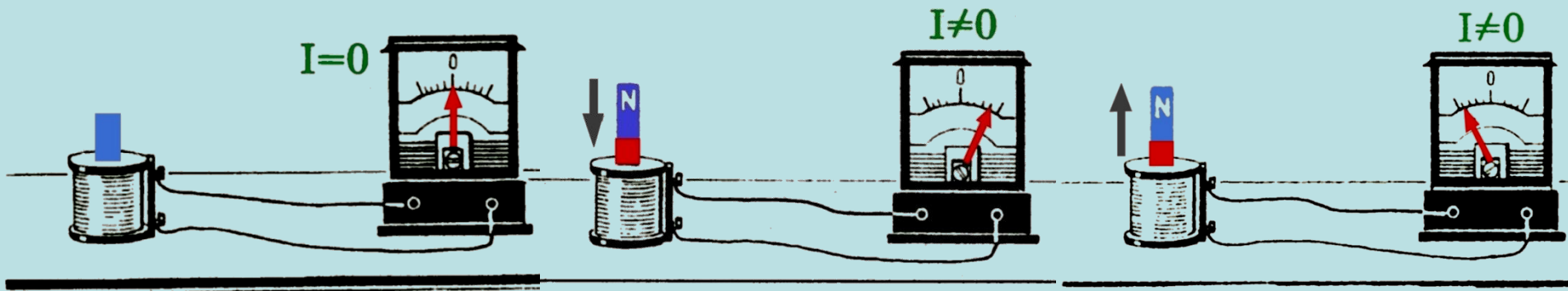
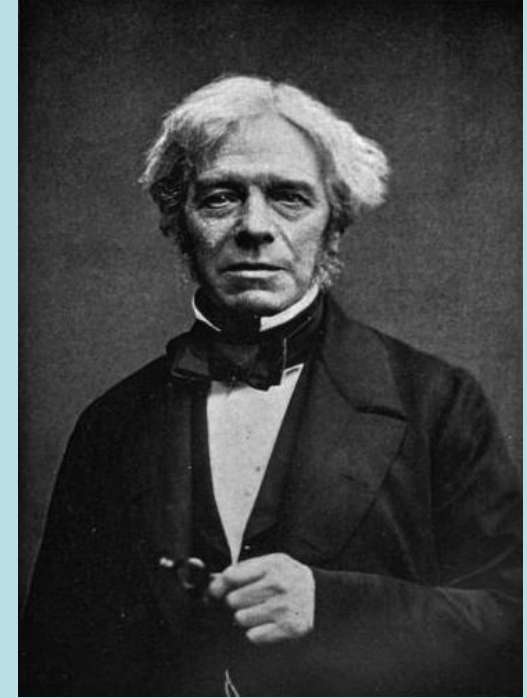
Майкл Фарадей

Лише у 1831 році англ. фізик і хімік М. Фарадей звернув увагу на те, що до виникнення короткочасних струмів у замкненому провіднику першого кола призводить розмикання або замыкання ключа другого поряд розташованого електричного кола з постійним струмом.

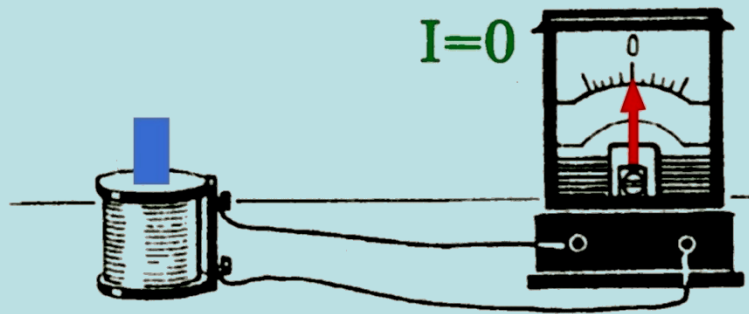


Майкл Фарадей

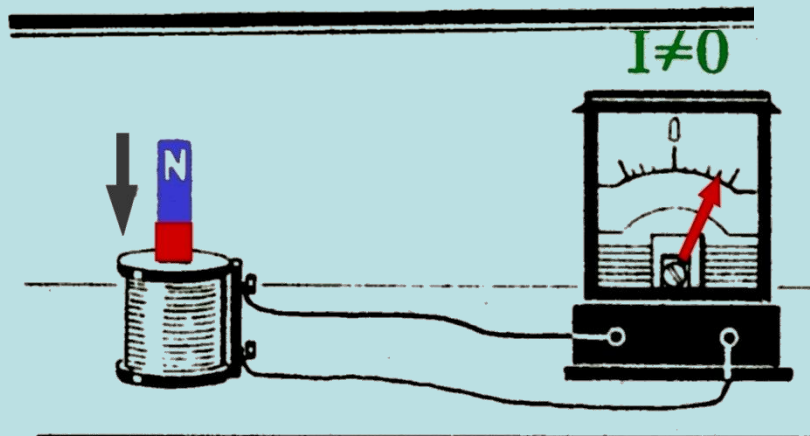
Подальші досліді показали, що у замкненому провіднику електричний струм виникає також при піднесенні до нього постійного магніту або зміненні величини струму у провіднику, що знаходиться поряд.



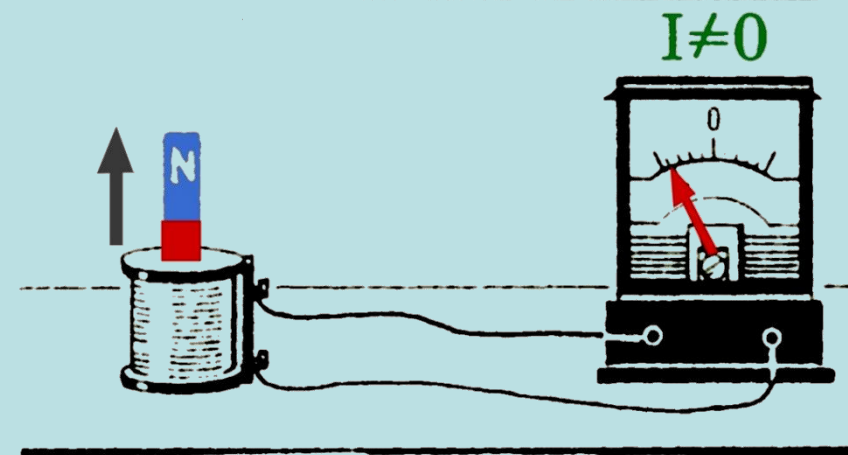
Досліди Фарадея



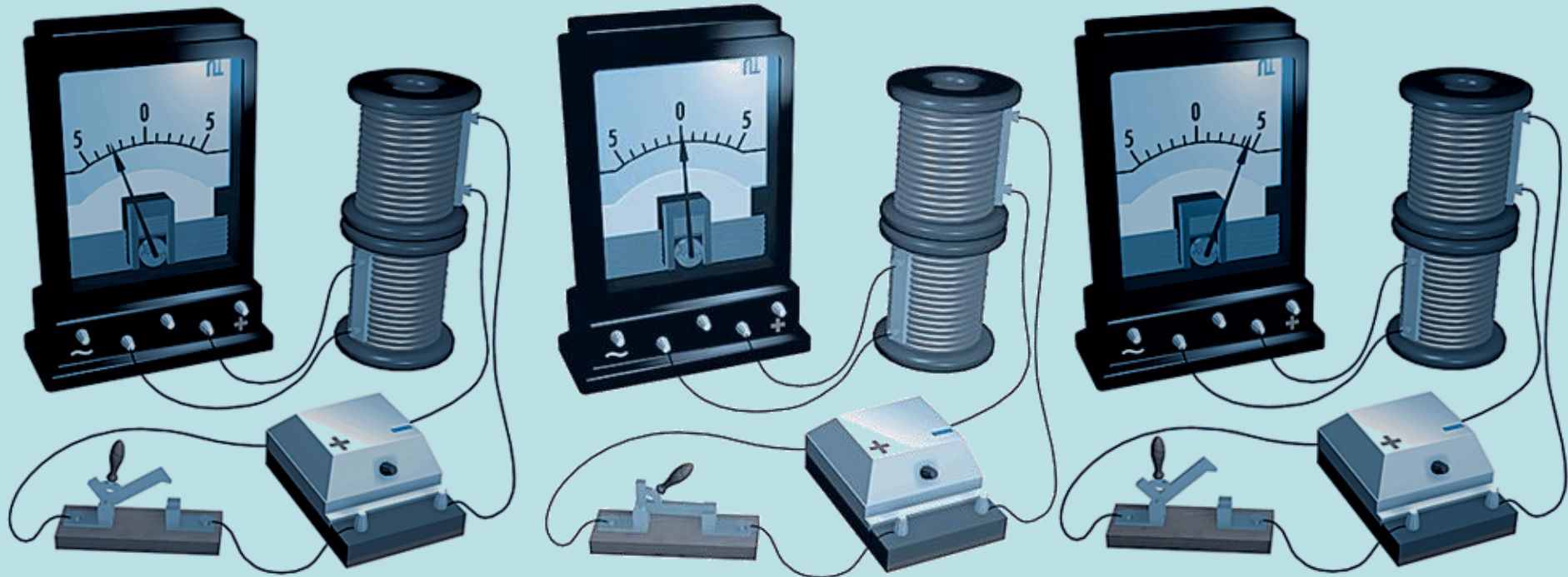
якщо магніт нерухомий,
струм у колі відсутній



якщо магніт рухається
відносно котушки, у колі
струм виникає (індуку-
ється) електричний струм



Досліди Фарадея з котушками

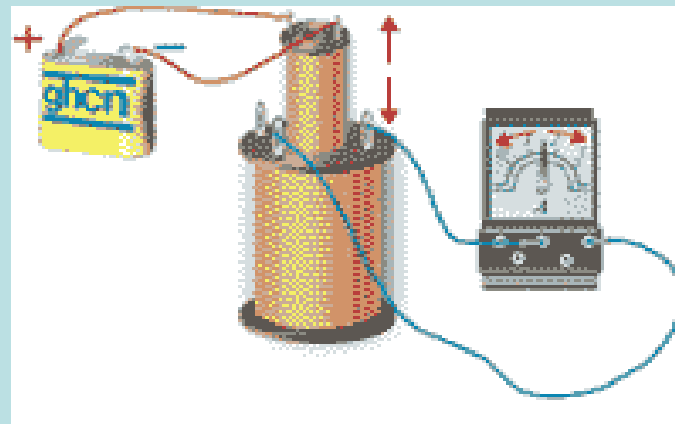


електричний струм у другій котушці виникає при замиканні або розмиканні кола першої котушки

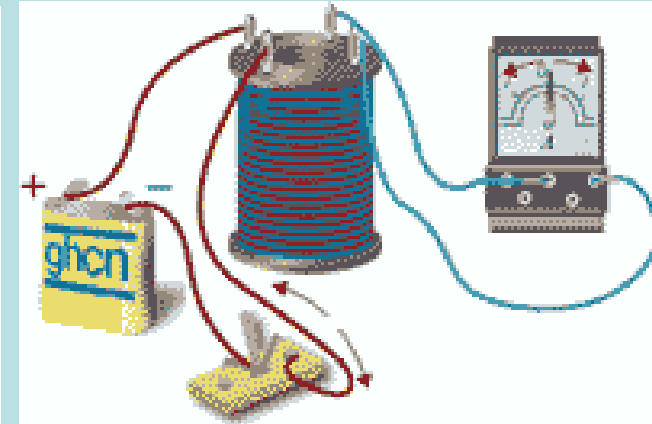
Відкриття М. Фарадея полягало у тому, що електричний струм у замкненому контурі може виникнути під час:



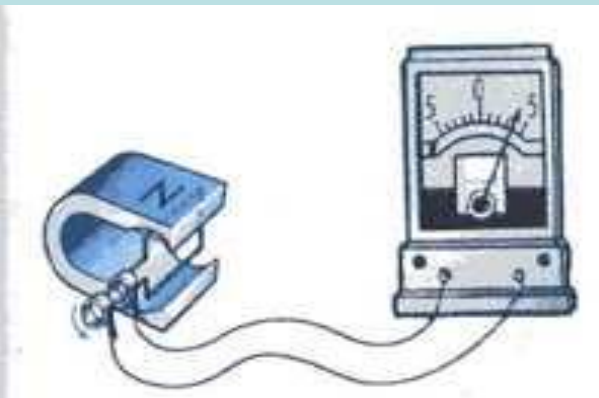
1) Руху магніту відносно котушки



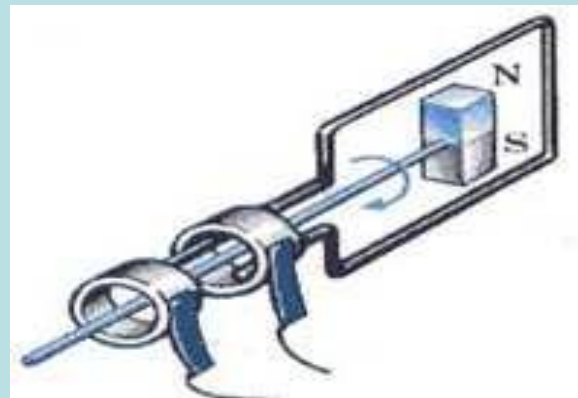
2) Руху котушок одна відносно іншої



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

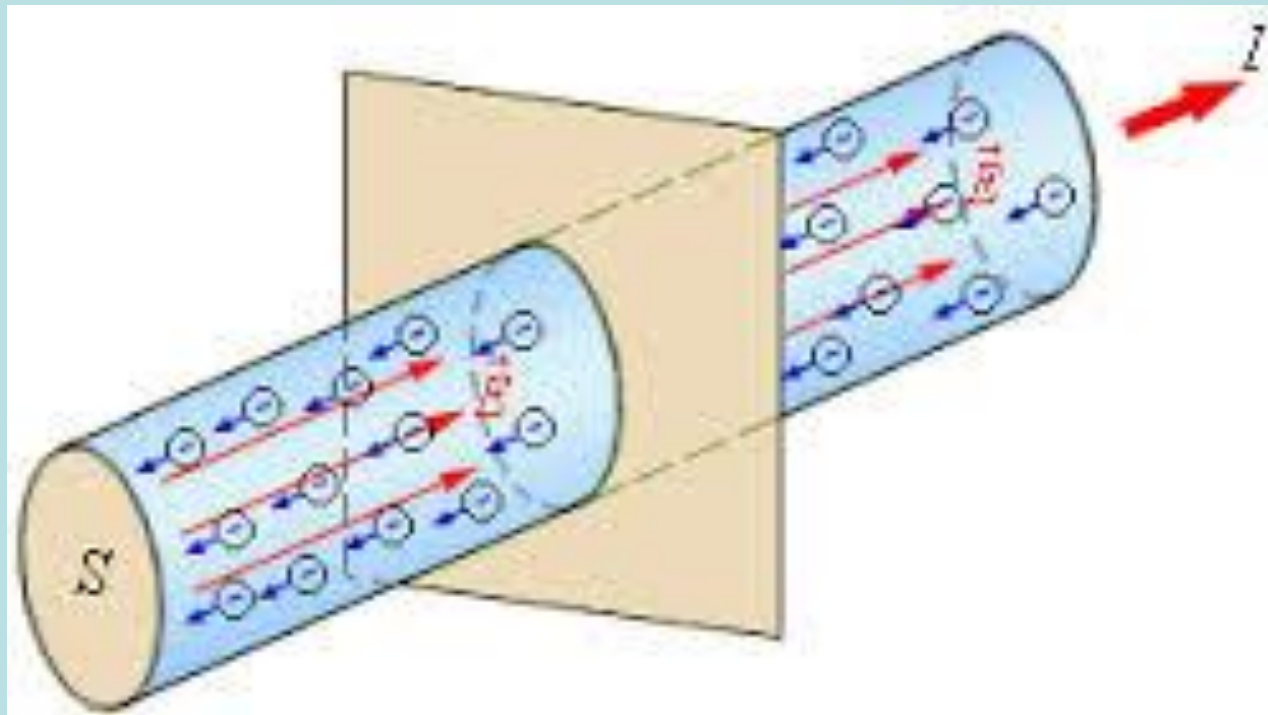
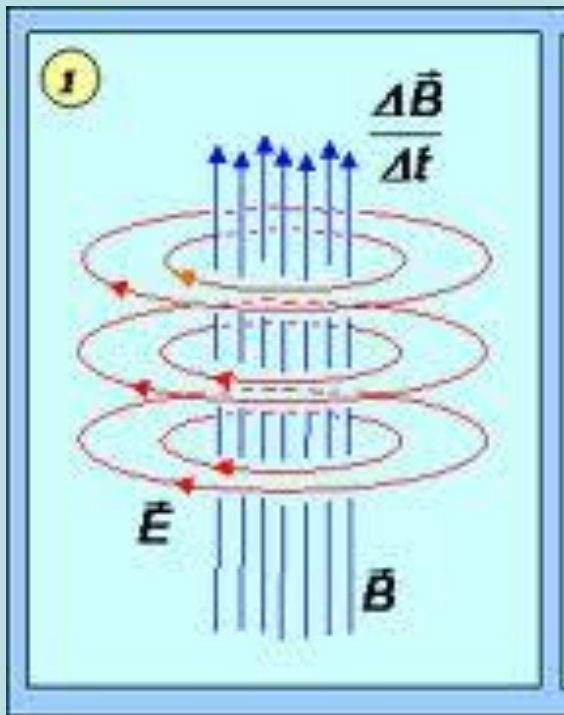


4) Обертання контуру в магнітному полі

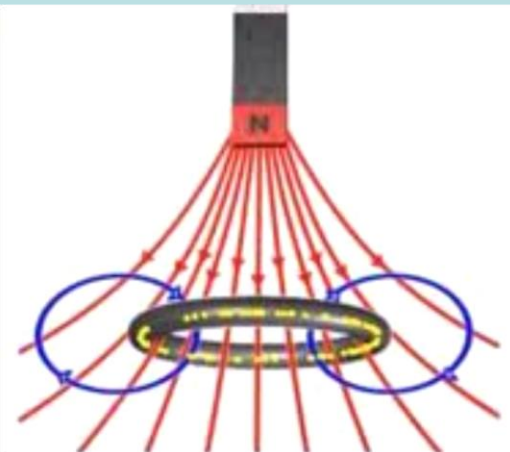
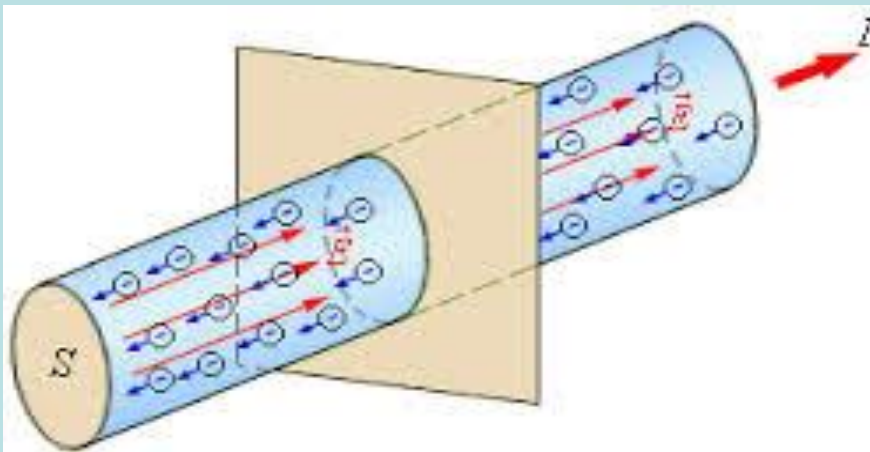
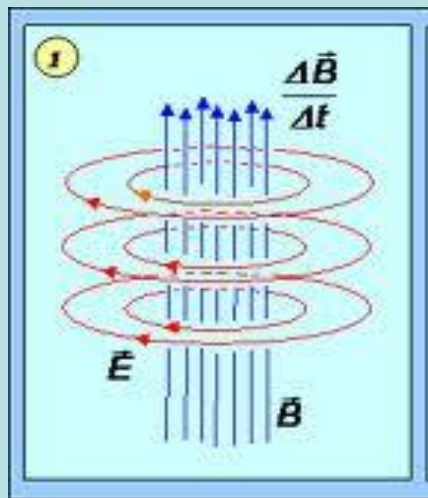


5) Обертання магніту всередині контуру

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.*



Явище виникнення електрорушійної сили (що у свою чергу спричиняє індукційний струм) у замкненому провіднику при зміні магнітного потоку з часом через даний контур називають *явищем електромагнітної індукції*



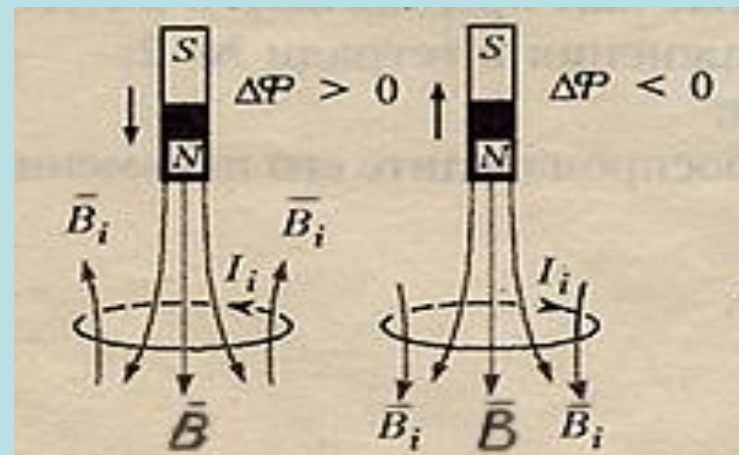
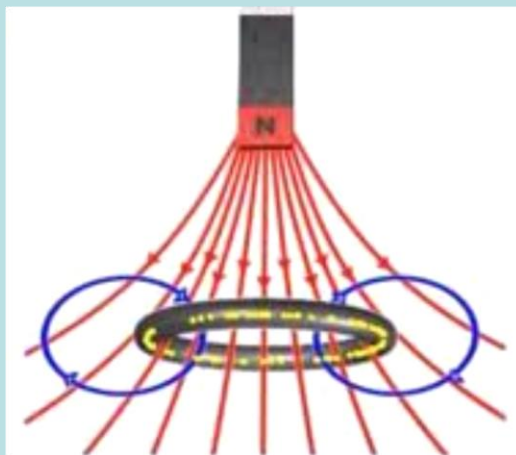
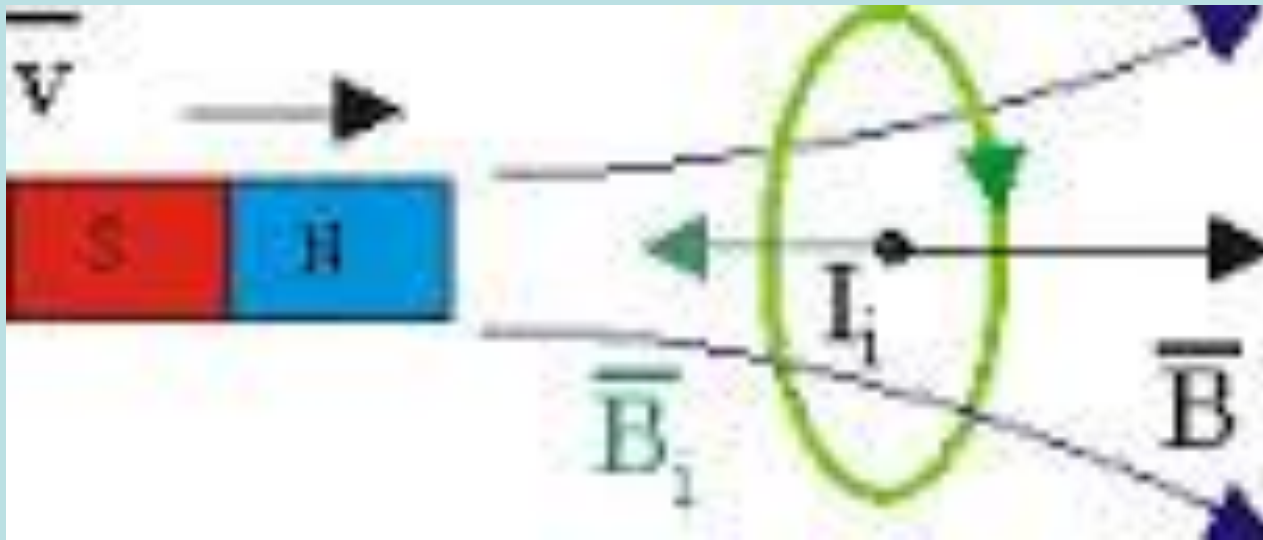
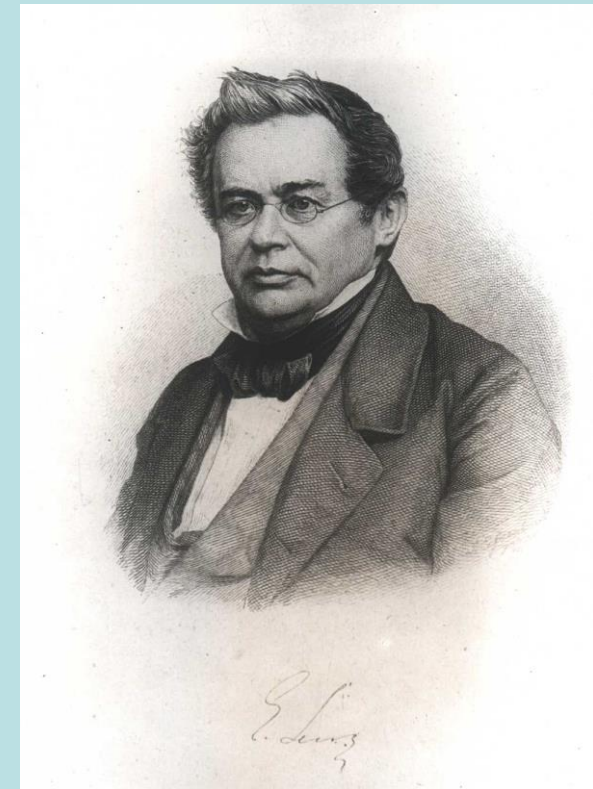
Кількісно описується *законом Фарадея для явища електромагнітної індукції* – будь-яка зміна магнітного потоку через площу замкненого контуру викликає (індукує) в ньому ЕРС індукції, що пропорційна швидкості зміни магнітного потоку:

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

де ε_i – електрорушійна сила індукції,
 Φ – магнітний потік вектора індукції магнітного поля через площу контуру, $\Phi = (\vec{B}\vec{S}) = BS \cos \alpha$
“–“ – 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 у контурі завжди має такий напрямок, що його власне магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, який збудив цей струм – *правило Ленца*.

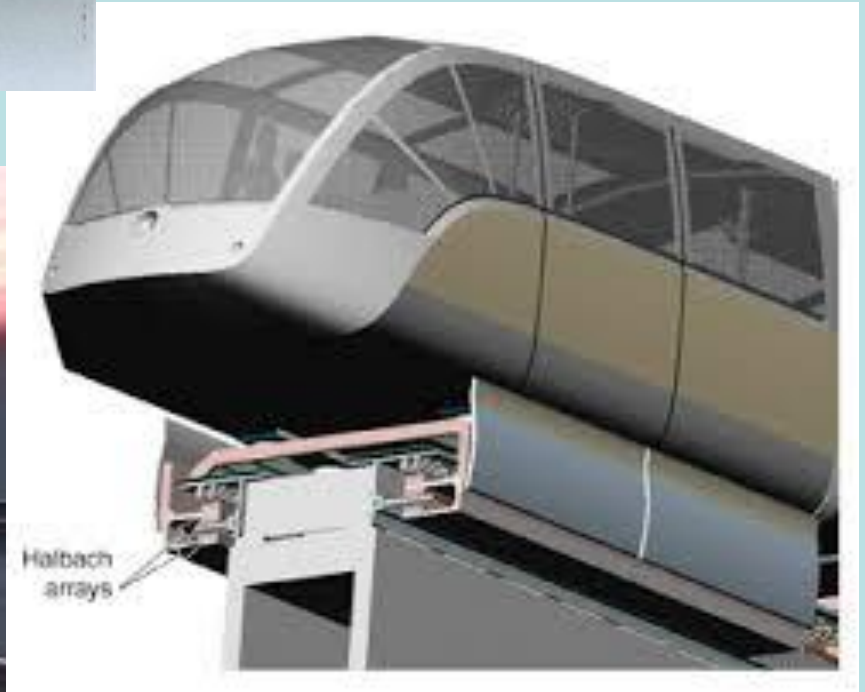
Еміль Ленц



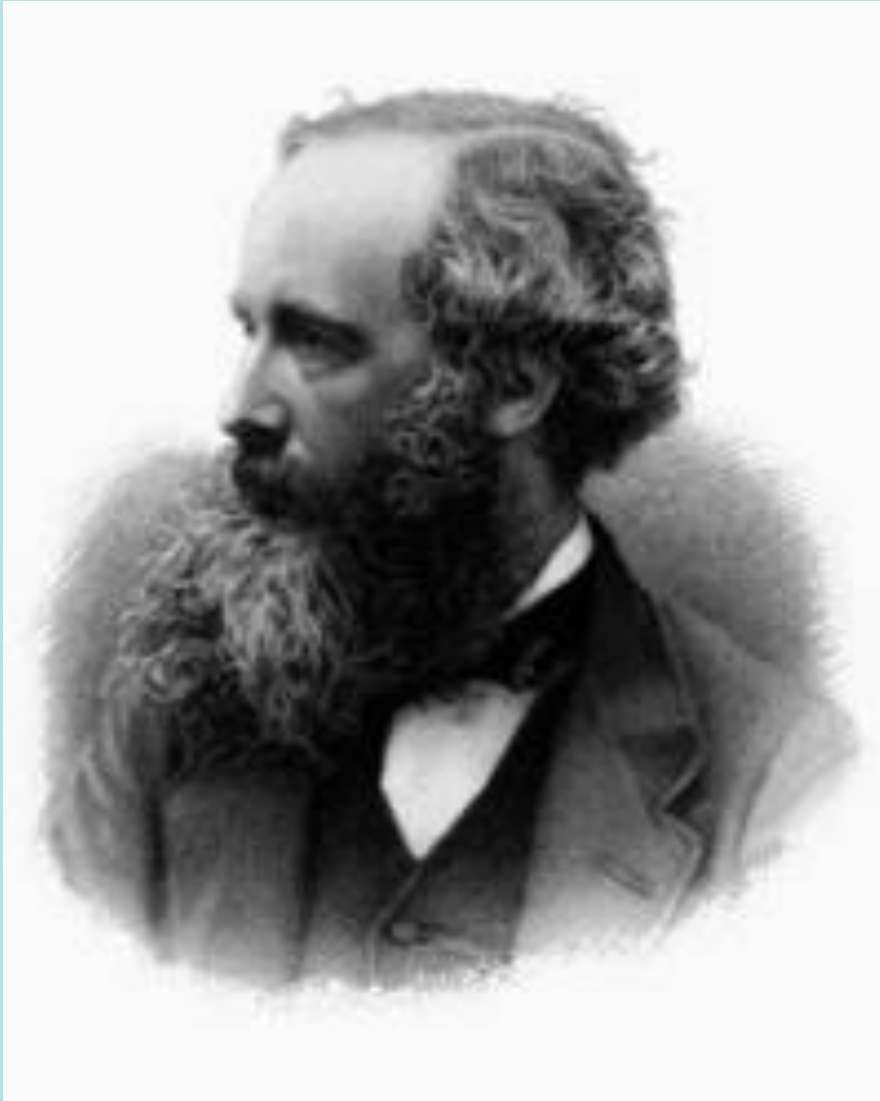
Принцип правила Ленца сьогодні реалізують у транспортно-будівельній галузі для міжміських пасажирських перевезень. Це потяги на так званій магнітній подушці. Під днищем вагону такого потягу змонтовані потужні магніти, розташовані у декількох сантиметрах від сталевго полотна. При русі потягу магнітний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



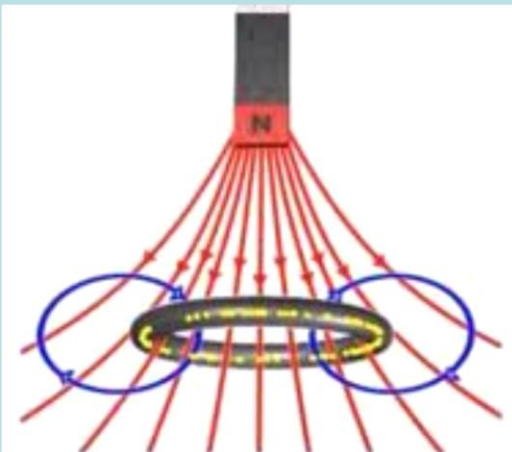
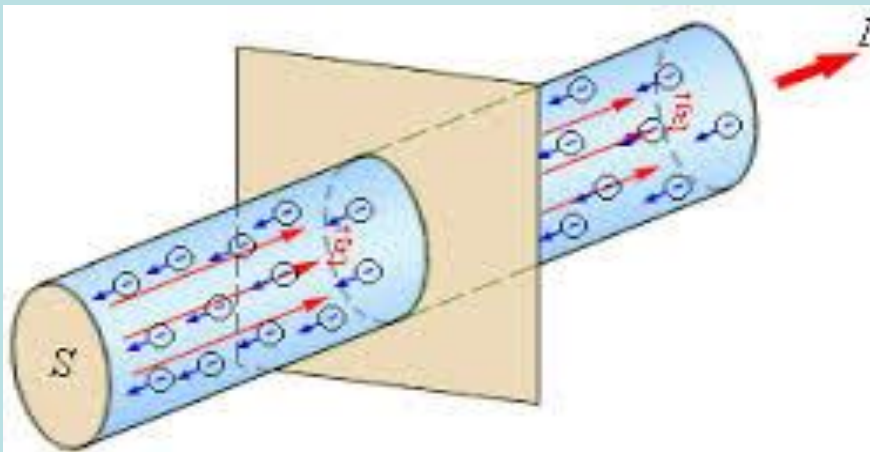
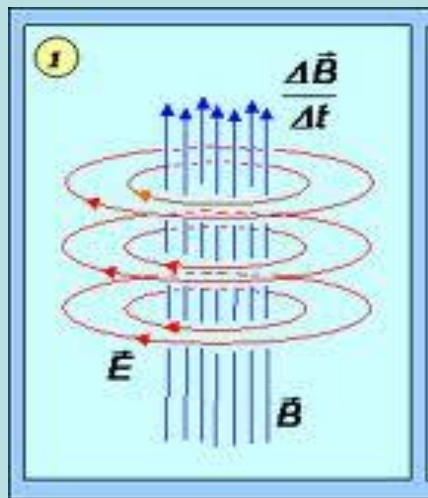


Більш загальне тлумачення явища електромагнітної індукції дав Дж. К. Максвелл.

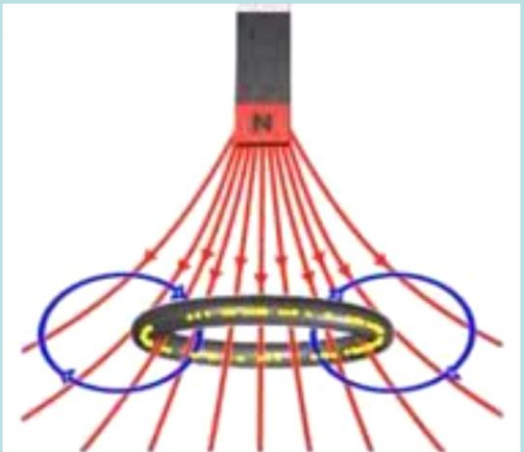
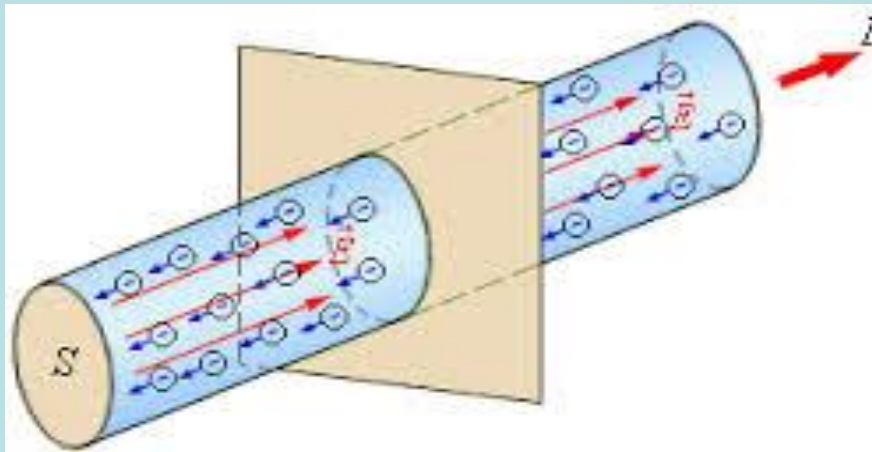
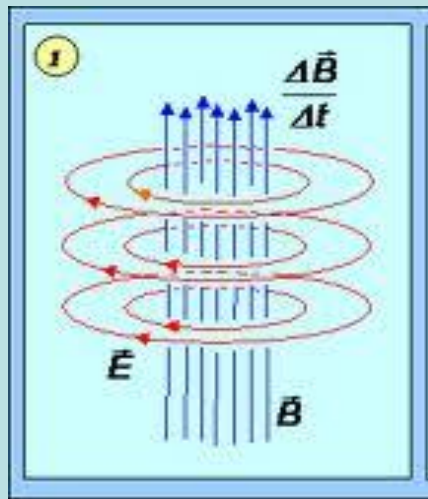


**Джеймс Клерк
Максвелл**

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.



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 \vec{E} може спричинювати й інші дії, наприклад, поляризувати діелектрик, викликати пробій діелектрика між обкладками конденсатора, прискорювати або гальмувати заряджені частинки тощо.



Для вихрового електричного поля циркуляція вектора напруженості \vec{E} по довільно обраному замкненому контуру L дорівнює електрорушійній силі, тобто

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = \varepsilon, \quad \varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S (\vec{B} d\vec{S}),$$

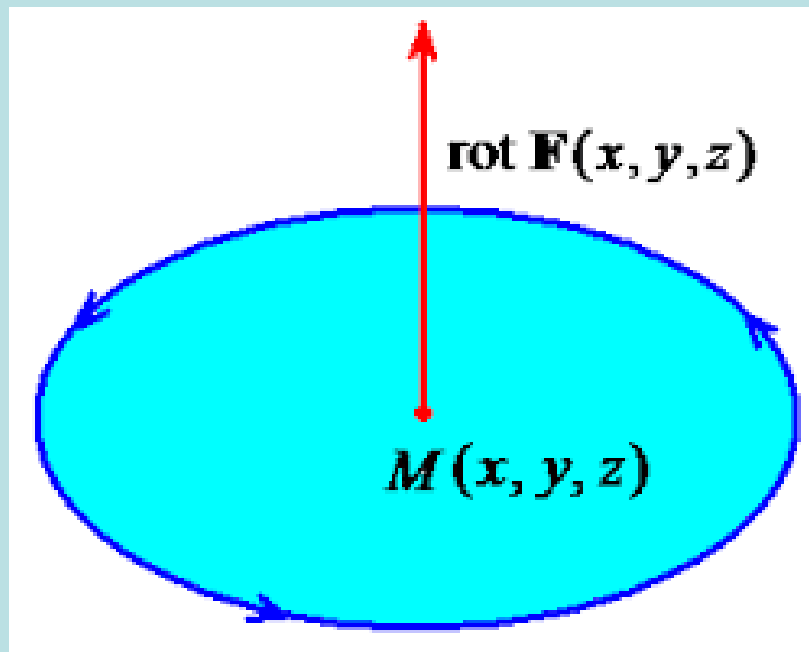
Тому закон електромагнітної індукції в узагальненому Максвеллом вигляді записується так:

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

або використовуючи теорему Стокса:

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

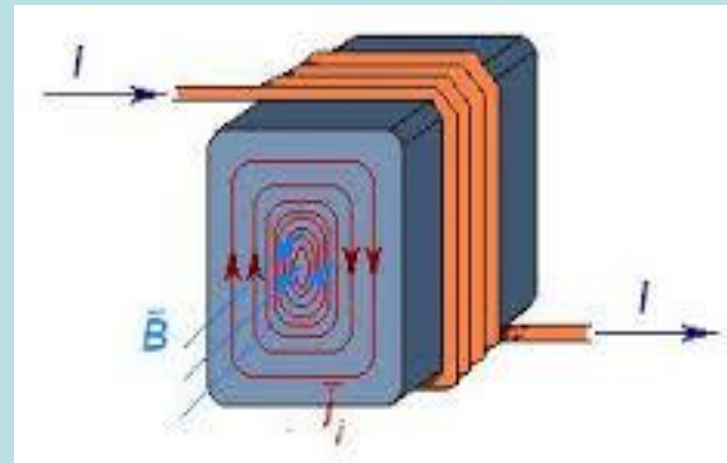
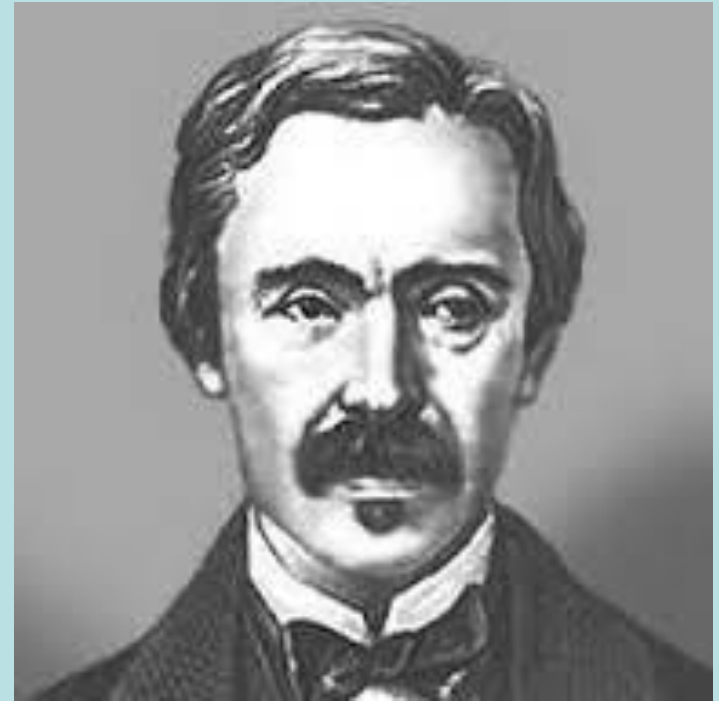
$$(\text{rot } \mathbf{A})_n = \lim_{\substack{L \rightarrow 0 \\ \Delta S_n \rightarrow 0}} \frac{\oint \mathbf{A} d\mathbf{l}}{\Delta S_n}$$



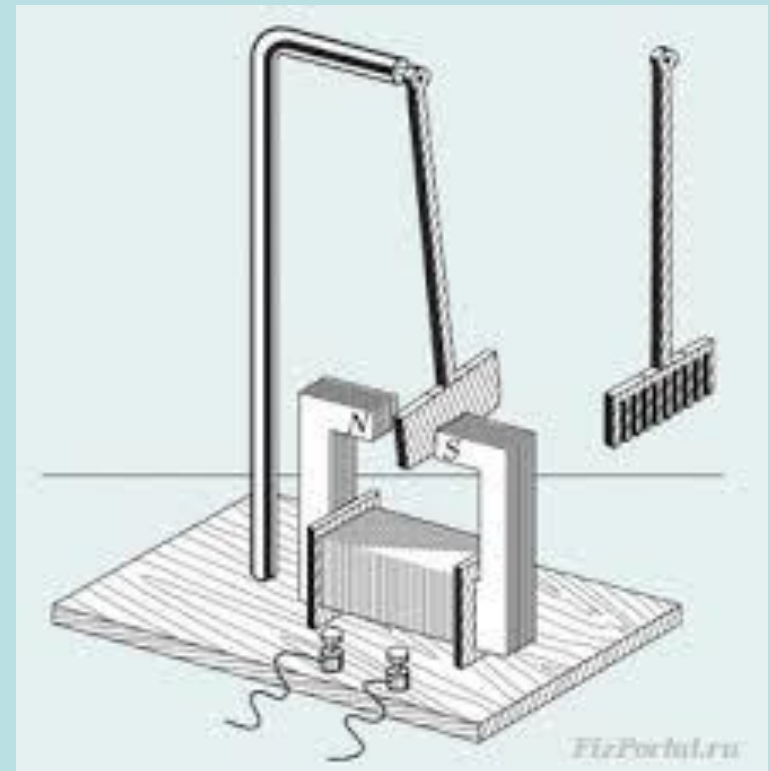
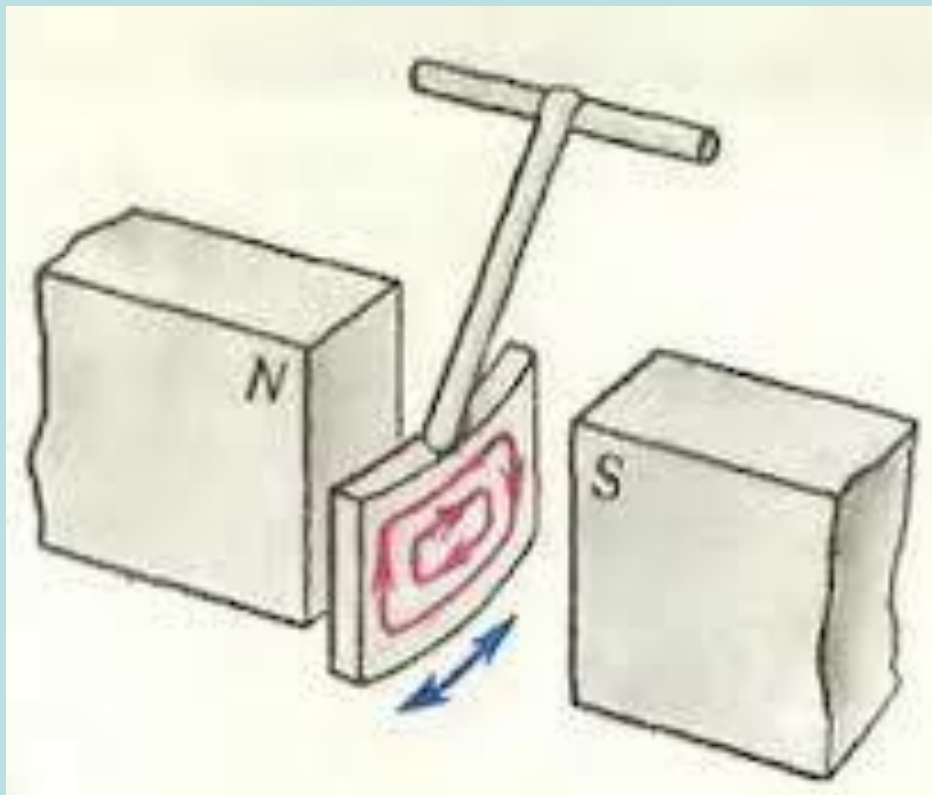
Жан Бернар Леон Фуко

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*.

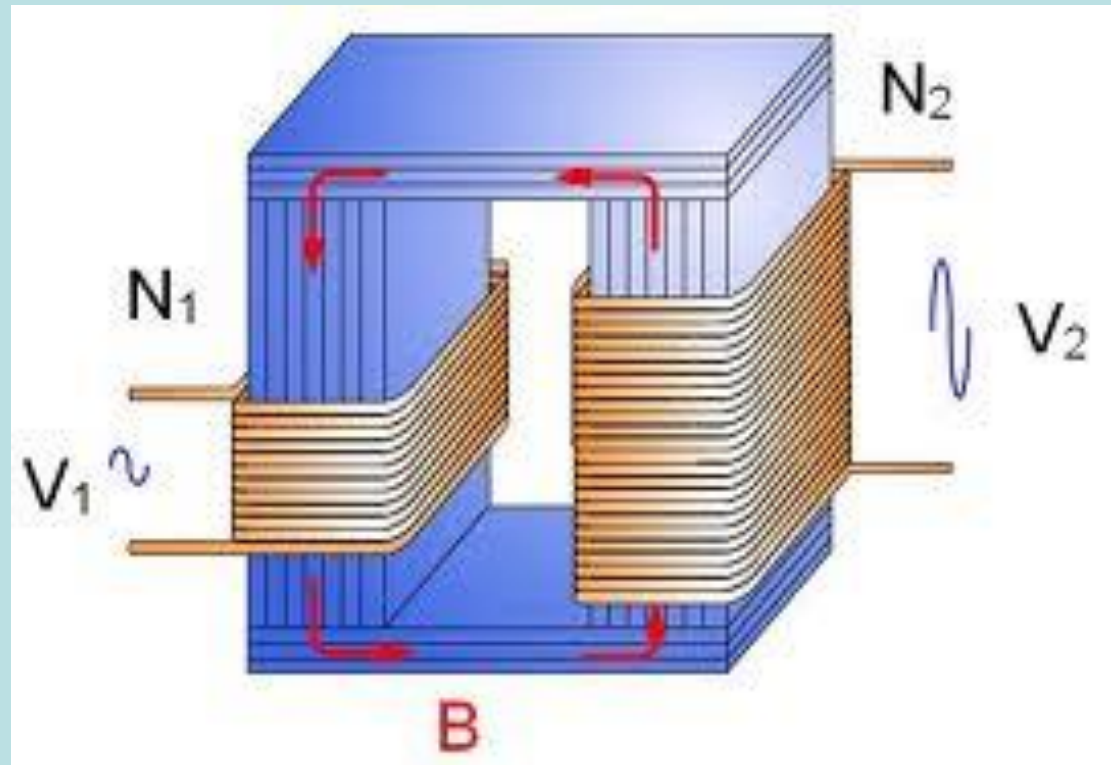
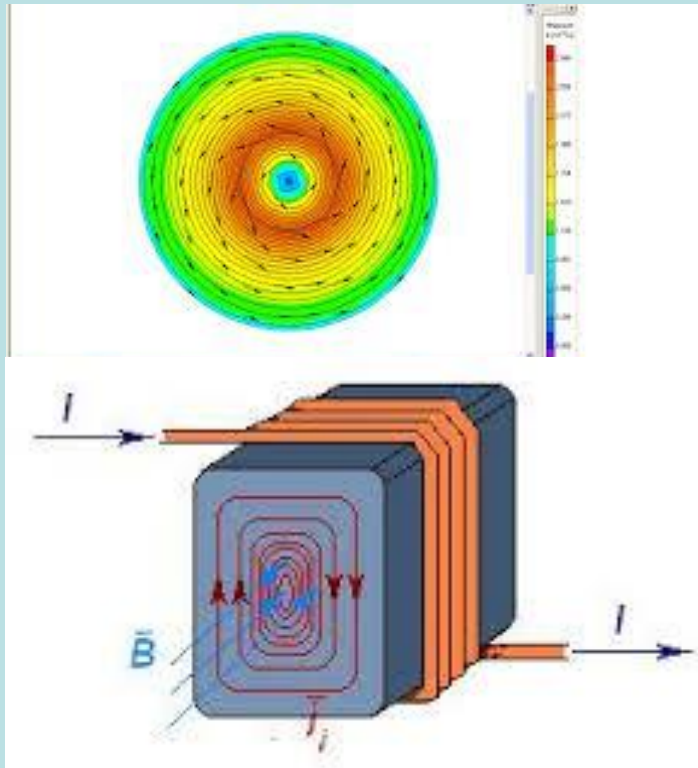
Струми Фуко, як і індукційні струми в лінійних провідниках, підпорядковуються правилу Ленца: їх магнітне поле направлене так, щоб протидіяти зміні магнітного потоку, що індукував вихрові струми.



Так, наприклад, швидко гасяться коливання масивних металевих маятників, розташованих між полюсами магнітів, це явище використовують для заспокоєння (демпфування) рухомих частин приладів. Якщо у вищеописаному маятнику зробити радіальні вирізи, то вихрові струми слабшають і гальмування майже відсутнє.



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.



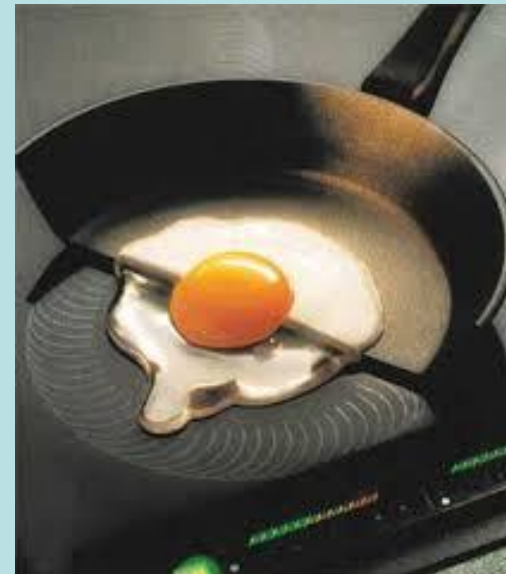
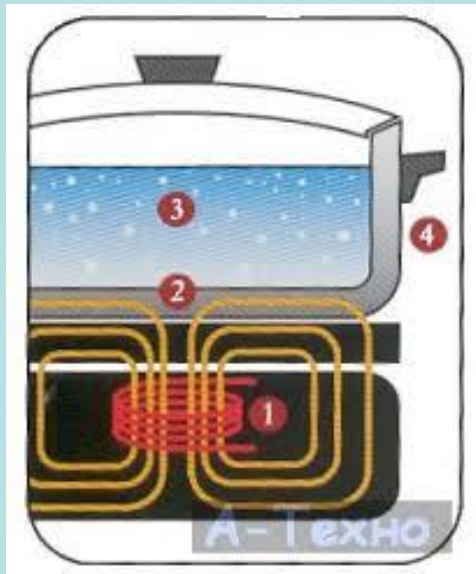
Джоулеве тепло, що виділяється струмами Фуко, у промисловості використовується в індукційних пічках. Індукційна піч являє собою тигель, який вводять всередину котушки з високочастотним струмом. У металі виникають інтенсивні вихрові струми, здатні розігріти його до плавлення. Такий спосіб дозволяє плавити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

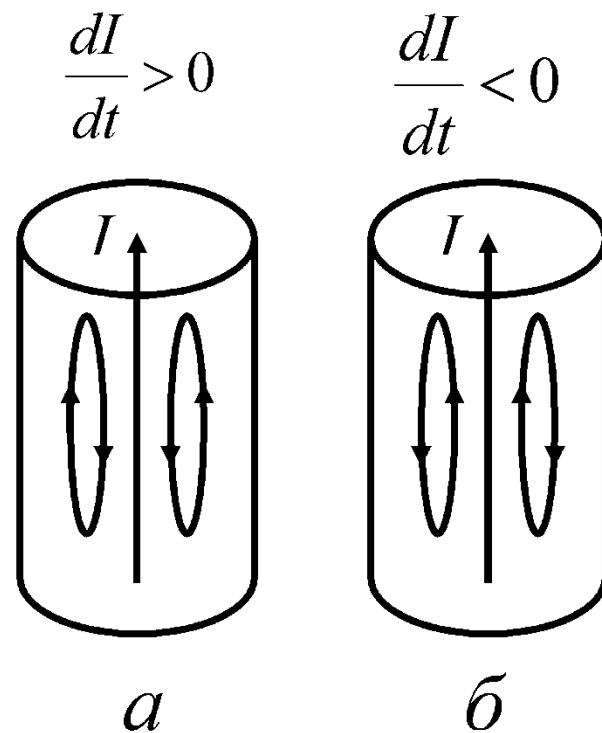


У побуті використовують індукційні плити для приготування їжі. Головна їх відмінність від електричних і газових плит полягає у тому, що тепло генерується безпосередньо на посуді, в якій готується їжа, а не на поверхні самої плити. Відмінність індукційних плит від традиційних полягає у їх енергоефективності,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

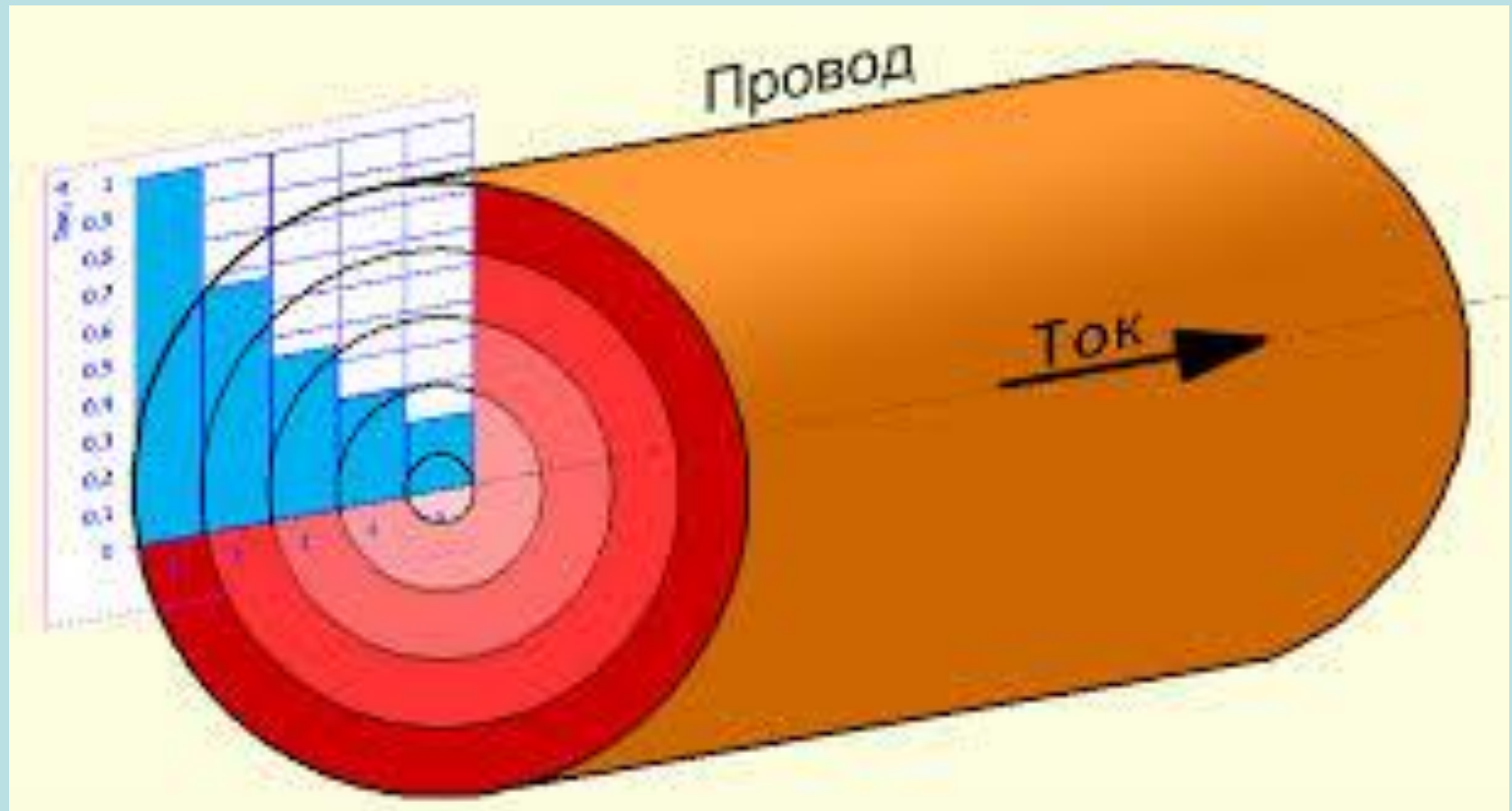




Вихрові струми виникають і у провідниках, по яким тече змінний струм. Напрямок цих струмів можна визначити за правилом Ленца. На рисунку *а* показано напрями вихрових струмів при зростанні первинного струму у провіднику, а на рисунку *б* – при його зменшенні. В обох випадках напрями вихрових струмів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

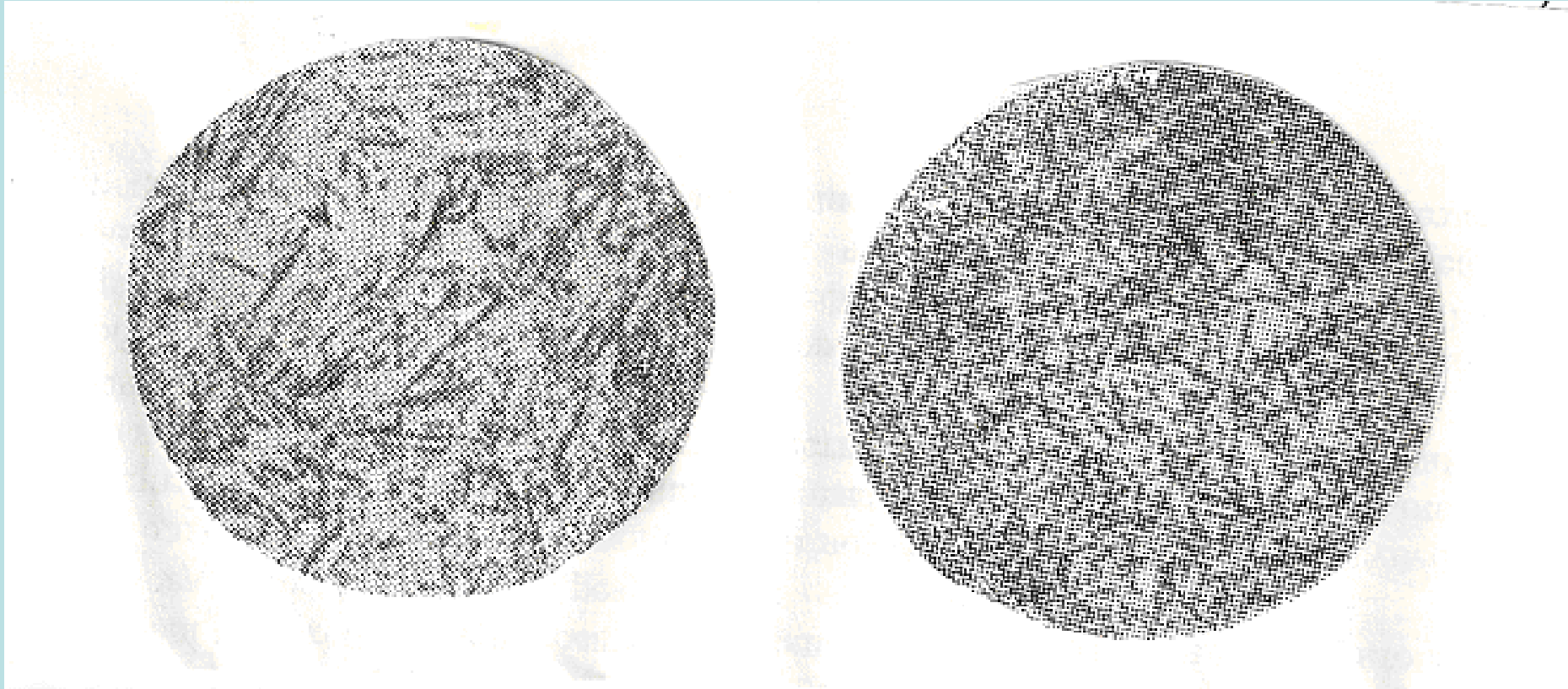


Так як струми високої частоти практично проходять по тонкому поверхневому шару, то проводи для них роблять пустими всередині.

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



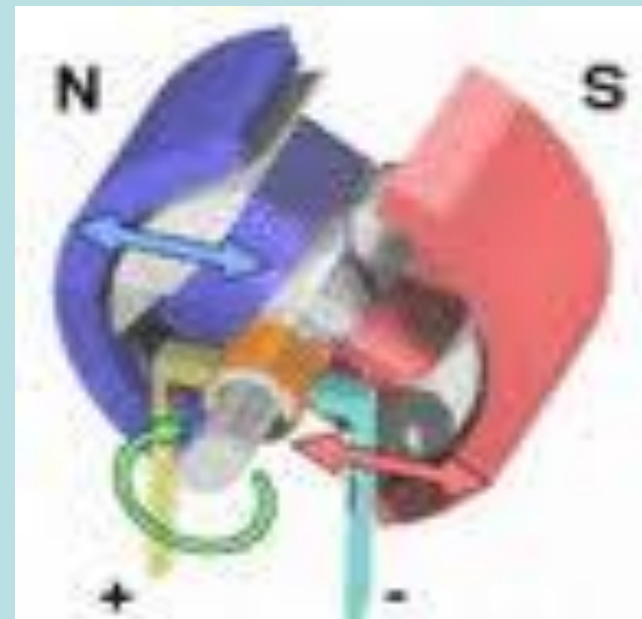
При проходженні по суцільним провідникам струмів високої частоти, в результаті скін-ефекту, нагріваються лише поверхневі його шари. На цьому заснований метод поверхневого закалювання металів способом зміни частоти поля.



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.

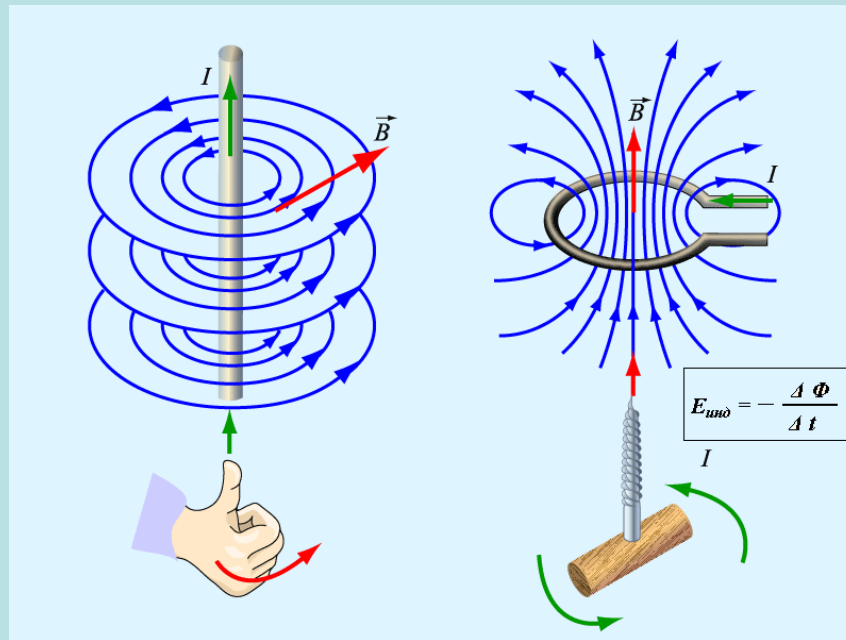
Схему генератора змінного струму подано на рисунку: між полюсами постійного магніту обертається рамка, у якій, згідно закону М. Фарадея виникає електрорушійна сила.

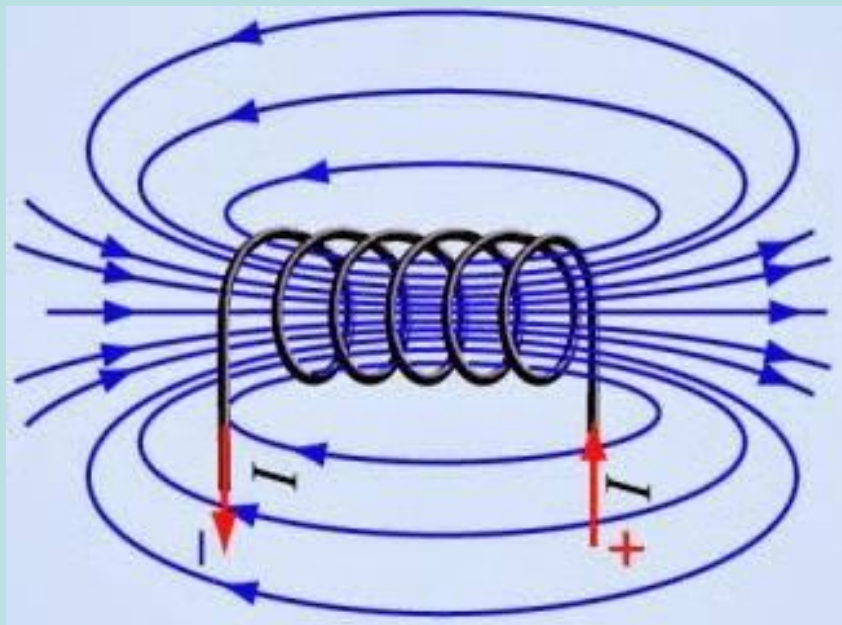
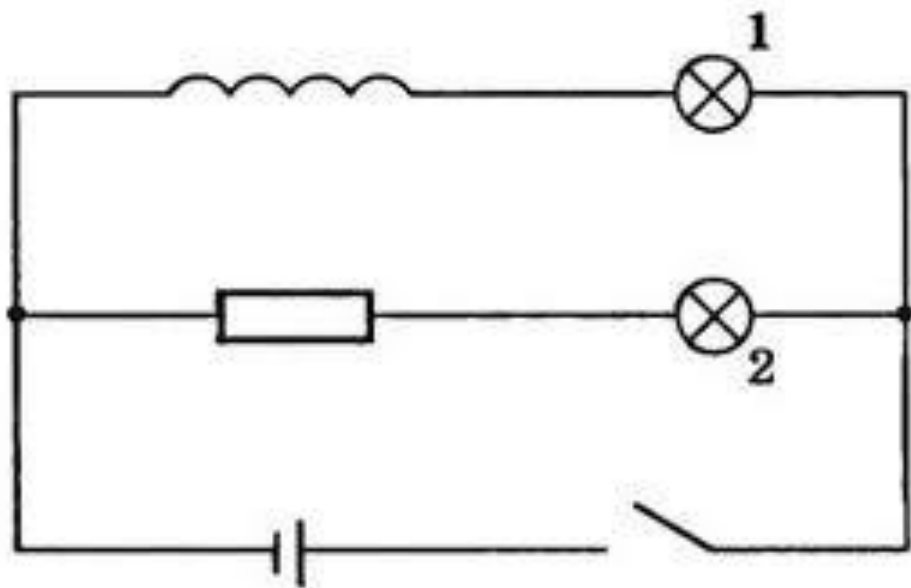
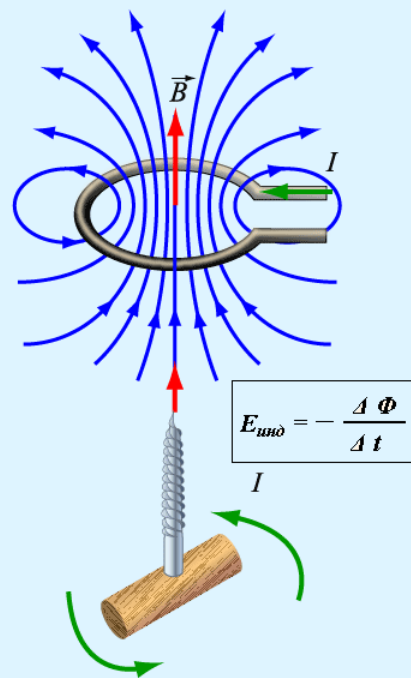
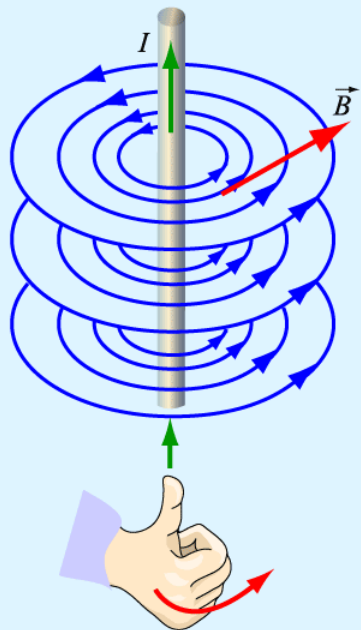


4. Явище самоіндукції, індуктивність.

Навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле, яке створює певний потік вектора індукції через власний контур провідника. Якщо по замкненому провіднику тече змінний струм, то навколо провідника існує змінне магнітне поле, тобто через замкнутий контур провідника з часом виникає зміна магнітного потоку вектора індукції.

Зміна магнітного потоку з часом через контур, за законом Фарадея, спричинює індукційний струм. Струм, що індукується у контурі провідника, по якому тече змінний струм, називають *струмом самоіндукції*.





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

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

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 1 А 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

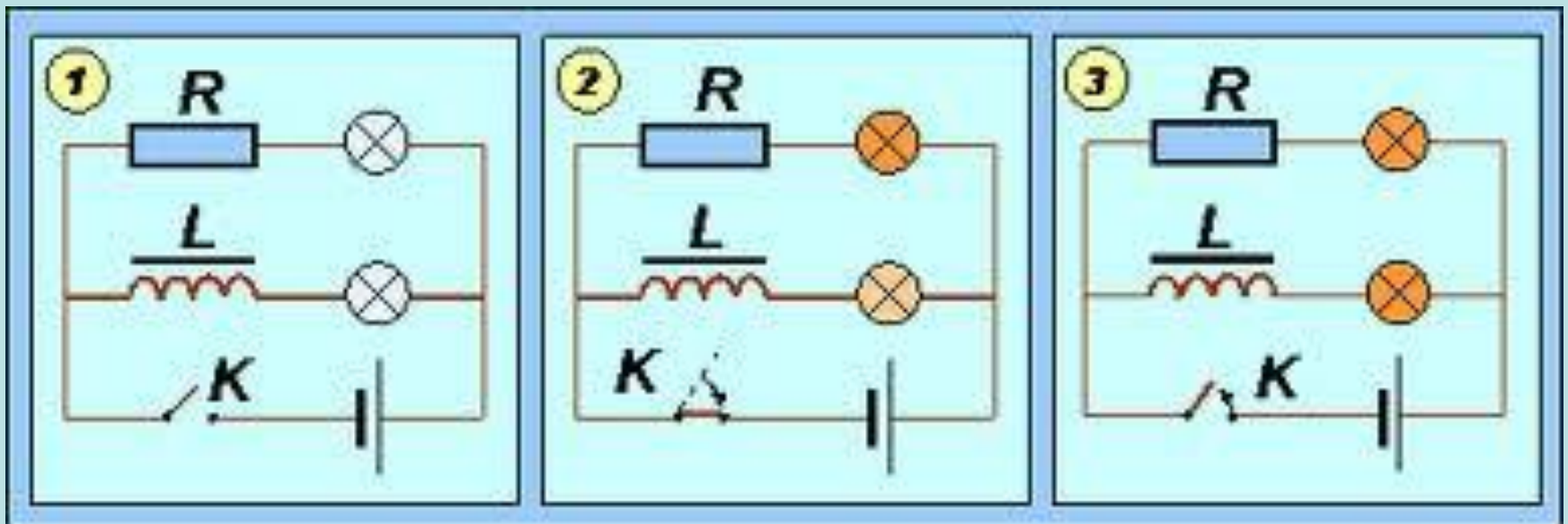
$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S .$$

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

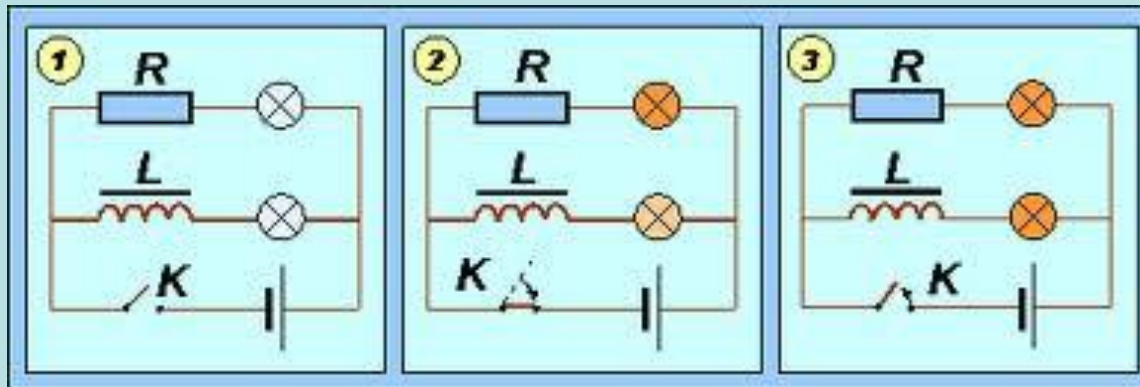
$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S \quad \text{або} \quad L = \mu\mu_0 n^2 V .$$

5. Перехідні процеси у колі з індуктивністю.

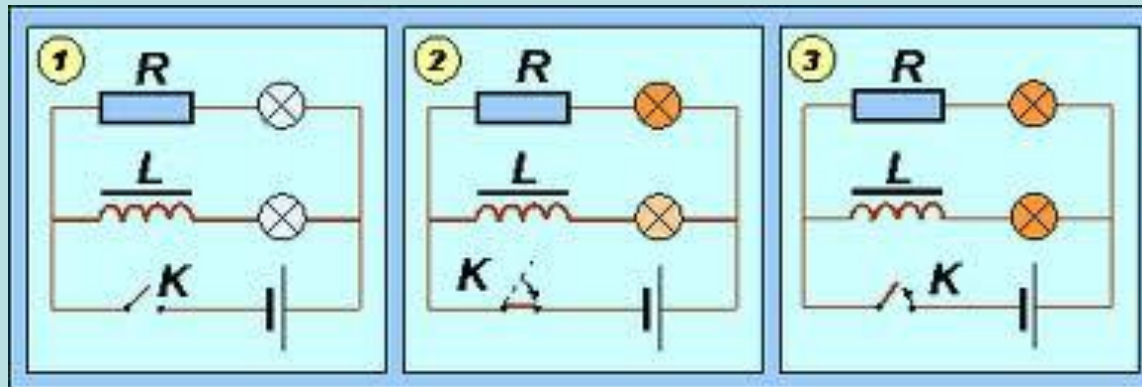
При розмиканні або замиканні електричних кіл сила струму в них різко змінюється, що призводить до виникнення струмів самоіндукції, які називають *екстраструмами самоіндукції*.



Якщо електричне коло містить котушки з великими значеннями індуктивності L , то *екстраструми розмикання* в таких колах можуть значно перевищувати струми в колі від джерела. Часто це стає причиною яскравого спалаху лампочок і плавлення запобіжників при розмиканні електричних кіл споживачів. Великі струми самоіндукції при швидкому вимкненні спричиняють пробій повітряного проміжку між контактами вимикачів і появу дугового розряду, що призводить до плавлення контактів. Для гасіння дуги в коло вмикають конденсатори. Явище самоіндукції використовують в пускачах ламп денного освітлення для запалювання газового розряду.

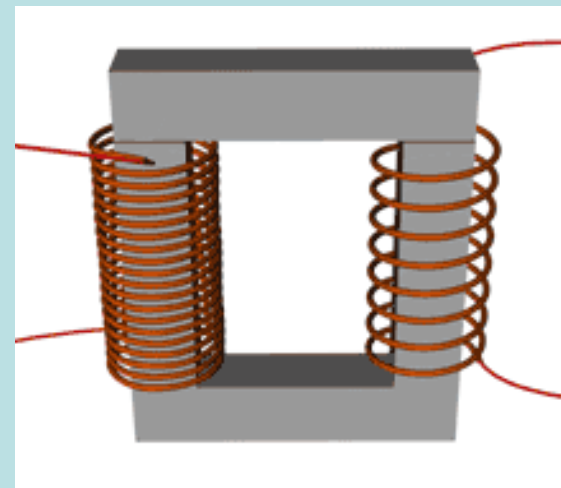
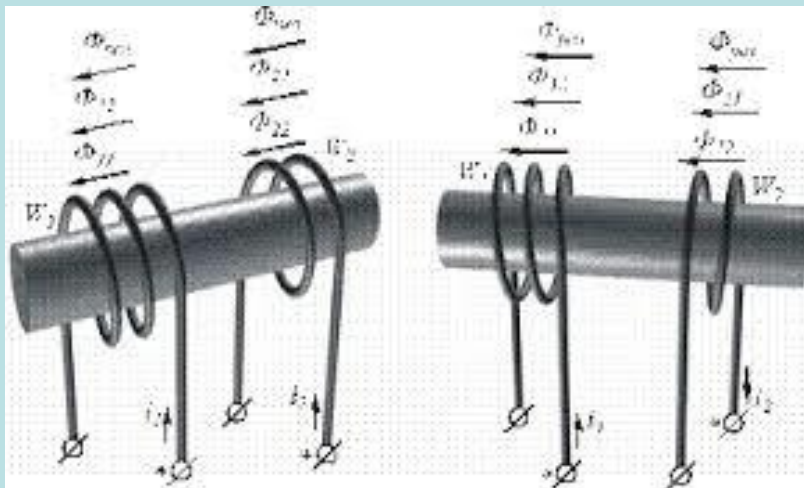


При вмиканні джерела струму через котушку індуктивності проходить наростаючий струм, тому у витках котушки виникає струм самоіндукції, направлений за правилом Ленца проти зростаючого основного струму, що й спричиняє інерційність зростання останнього. Чим більша індуктивність L і менший опір R , тим повільніше зростатиме значення сили струму I в колі, наближаючись асимптотично до значення $\frac{\mathcal{E}_0}{R}$. Струм самоіндукції, який виникає при вмиканні джерел струму в електричне коло з індуктивністю L , називають *екстраструмом замикання*.

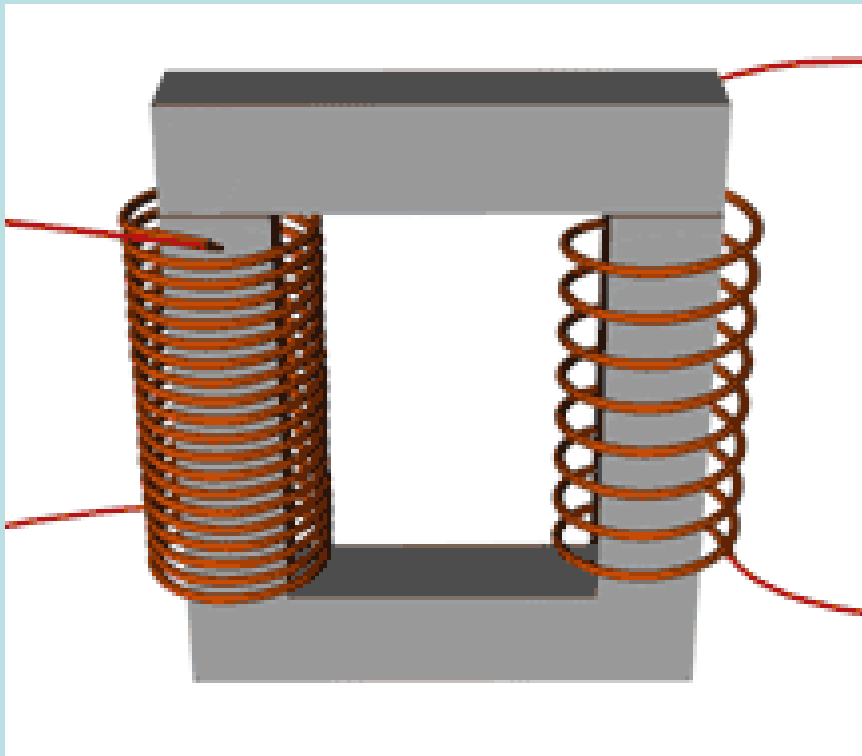


6. Взаємна індуктивність, трансформатори.

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*.



Контури зі змінними струмами, в яких виникає явище взаємоіндукції через взаємне перетинання магнітних потоків, мають *індукційний зв'язок*. Електрорушійні сили \mathcal{E}_i , що виникають при взаємоіндукції, пропорційні швидкостям змін струмів в індуктивно зв'язаних контурах:

$$\mathcal{E}_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt},$$

і навпаки

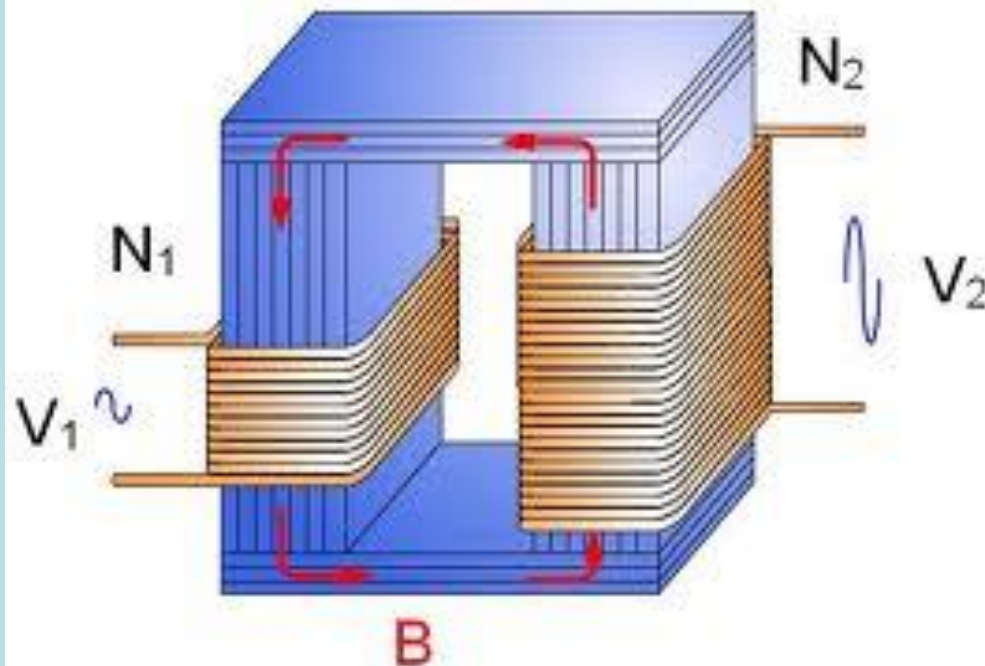
$$\mathcal{E}_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

$L_{12} = L_{21}$ і носять назву *коефіцієнтів взаємної індуктивності контурів*.

Коефіцієнти взаємоіндукції 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. Взаємна індуктивність L_{12} , як і індуктивність окремого контуру, вимірюється у $Gн$.

На практиці для збільшення значення L_{12} обидва контури насаджують на залізне осердя ($\mu \gg 1$).

Явище взаємної індукції лежить в основі роботи **трансформатора** – пристрою для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги при сталій частоті струму. Трансформатор складається з двох або більше обмоток, що мають загальне осердя з феромагнітного матеріалу.



Якщо первинна обмотка має N_1 витків, а змінна вхідна напруга U_1 , у вторинній обмотці, яка має N_2 витків, вихідна напруга U_2 , то відношення

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

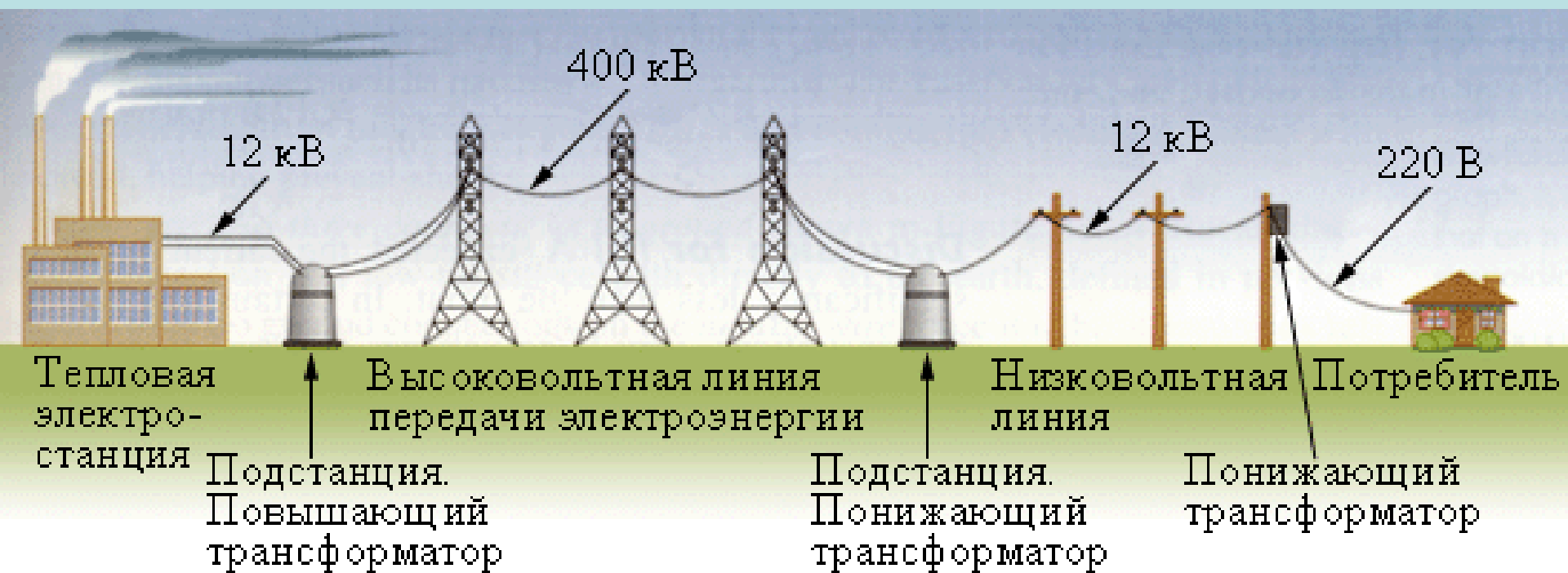
називають ***коефіцієнтом трансформації***.

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

Електричну енергію, що зазвичай виробляється електростанціями, необхідно передавати на сотні і тисячі кілометрів до загальної енергетичної системи, промислових підприємств або безпосередньо до споживачів.

При проходженні струму по проводам ліній електропередач відбуваються втрати електроенергії на їх нагрівання. Оскільки кількість теплоти, що виділяють проводи, прямо пропорційна до квадрату сили струму і опору, то для обмеження втрат електроенергії необхідно або збільшувати переріз проводів, що є дуже економічно не вигідним та технічно неможливим, або зменшити силу струму за рахунок підвищення напруги.

Для підвищення напруги на початку лінії електропередачі встановлюють підвищувальні трансформатори, а на кінці – знижувальні.



У наш час трансформатори застосовують практично в усіх промислових галузях, зокрема на підприємствах будівельної індустрії та безпосередньо у процесі будівництва. Трансформатори різняться за призначенням, розмірами, типами і видами в залежності від потреб конкретних споживачів електричного струму.

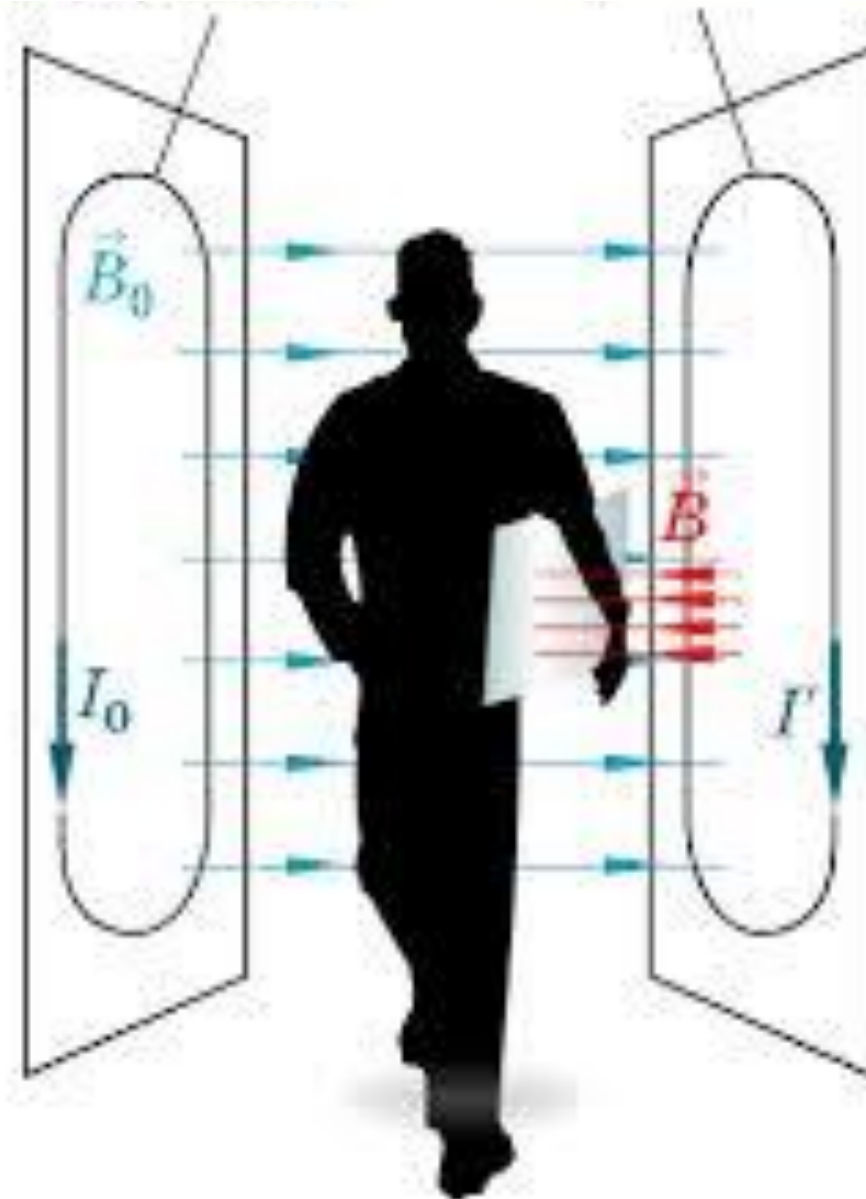




Трансформатори є основними елементами систем енергопостачання, електромашин, електрообладнання, електроустановок та їх деталей для отримання потрібної для них напруги живлення. Зокрема можна виділити трансформатори для зварювальних апаратів, апаратів для прогріву бетону, ґрунту і труб, трансформатори 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.

Первинна
катушка

Вторинна
катушка



7. Рівняння Максвелла.

Система рівнянь Максвелла є узагальненим математичним записом основних експериментальних законів електромагнітних явищ у довільному середовищі, вони встановлюють співвідношення між векторними характеристиками електромагнітного поля \vec{E} , \vec{B} , \vec{D} і \vec{H} та розподілом у просторі їх джерел: електричних зарядів і струмів.

В основі теорії Максвелла лежать чотири рівняння, які доповнюються матеріальними рівняннями.

Д.К. Максвелл

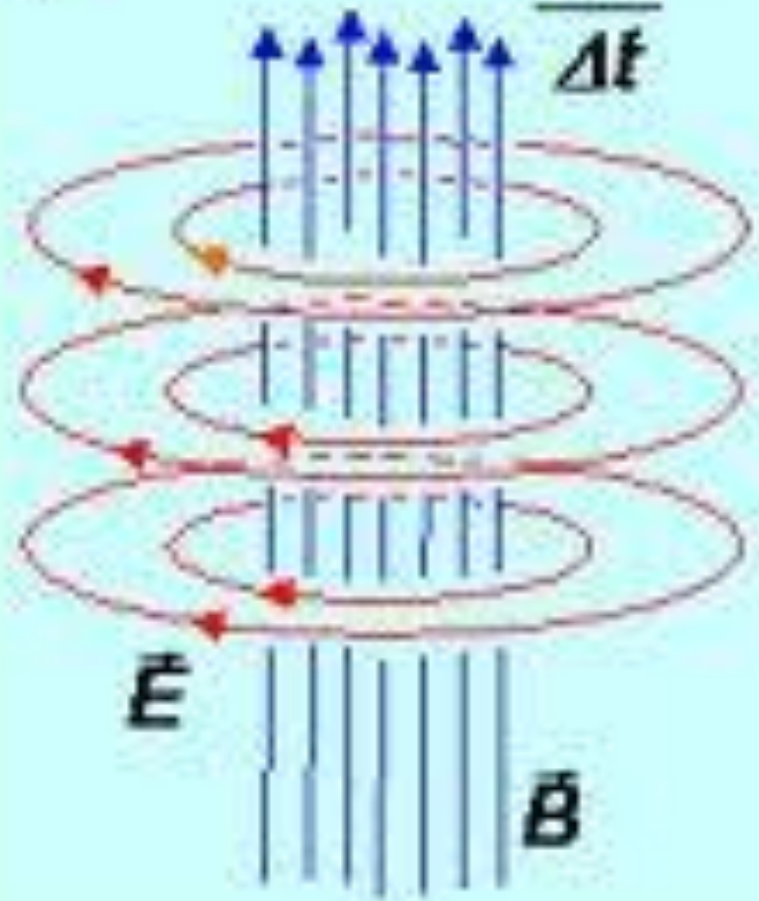


Перше рівняння Максвелла – це *узагальнення закону Біо-Савара-Лапласа* і є більш узагальненою формою закону повного струму, який відображає той експериментальний факт, що джерелами вихрового магнітного поля можуть бути струми провідності і струми зміщення:

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

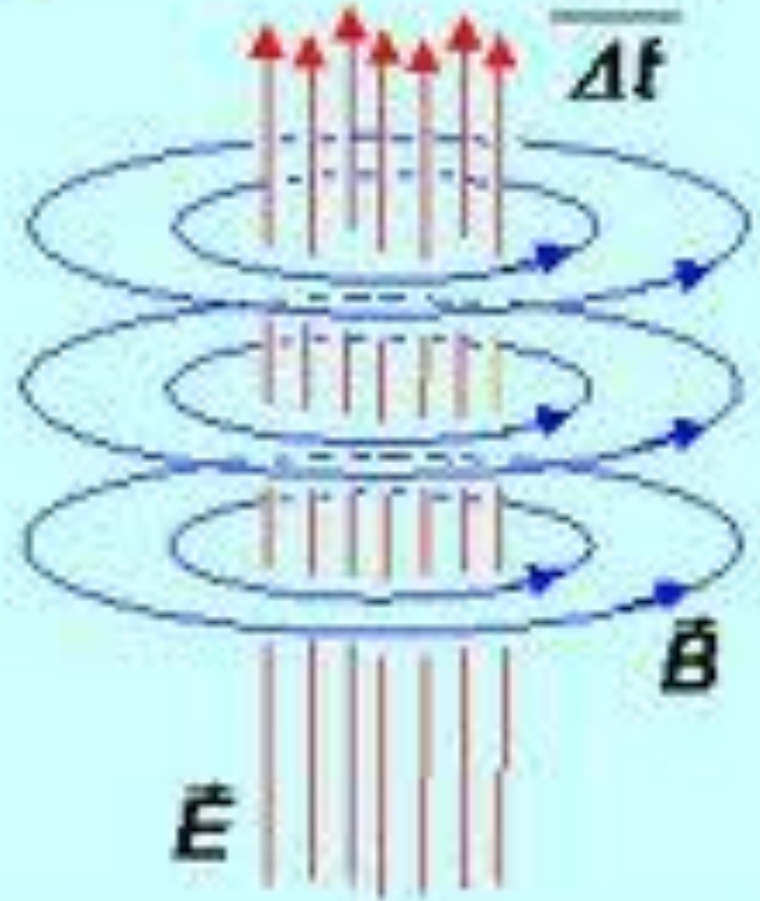
1

$$\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t}$$



2

$$\frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t}$$

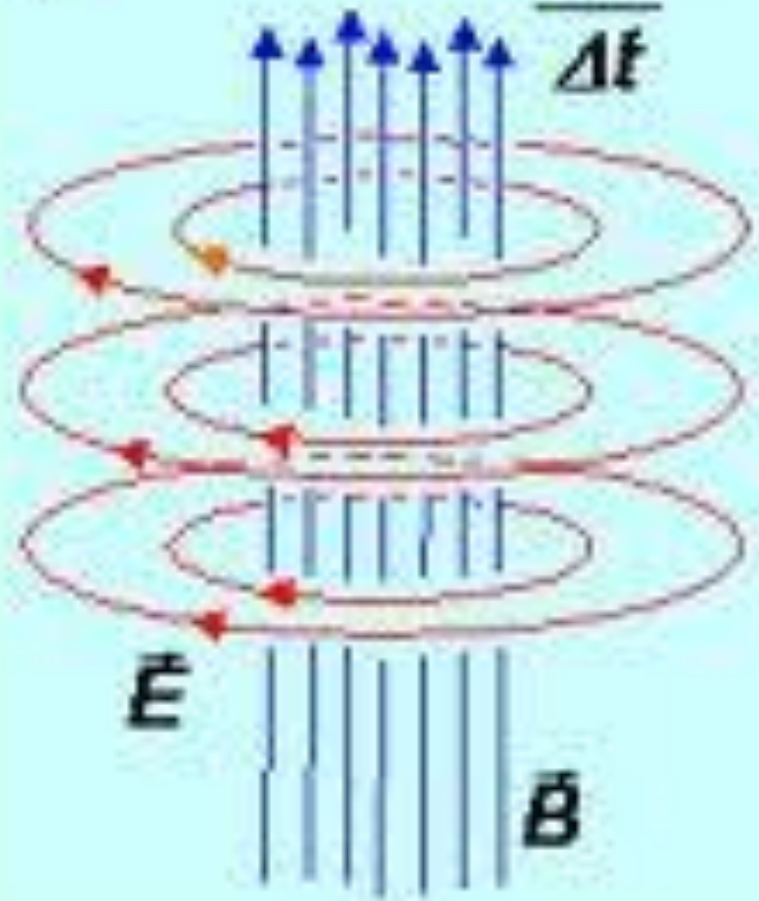


Друге рівняння Максвелла є математичним записом експериментального закону електромагнітної індукції Фарадея. Узагальнений фізичний зміст його полягає в тому, що всяка зміна в часі магнітного поля спричиняє збудження вихрового електричного поля.

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

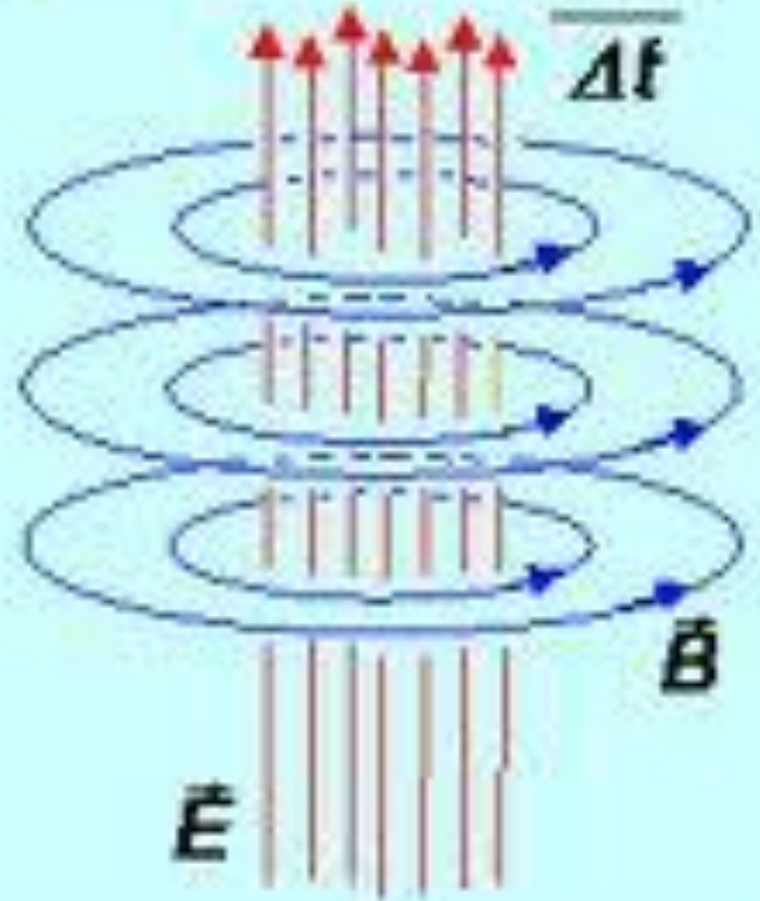
1

$$\frac{\Delta \vec{B}}{\Delta t}$$



2

$$\frac{\Delta \vec{E}}{\Delta t}$$



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

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

Четверте рівняння Максвелла є узагальненням на основі теореми 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 :

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

Матеріальні рівняння враховують властивості середовища і зв'язують між собою окремі характеристики електромагнітного поля:

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E},$$

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

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

де ε – відносна діелектрична проникність середовища,

ε_0 – електрична стала, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$,

μ – магнітна проникність середовища,

μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$,

σ – питома провідність провідника.

Лекція № 15

Електромагнітні явища

1. Потік вектора магнітної індукції.
2. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца.
3. Генератори електричного струму.
4. Явище самоіндукції, індуктивність.
5. Перехідні процеси у колі з індуктивністю.
6. Взаємна індуктивність, трансформатори.
7. Рівняння Максвелла.