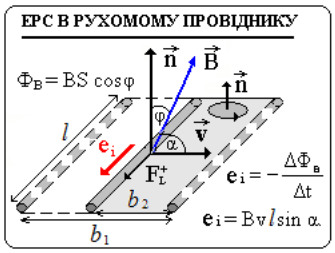
ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ

§29. Явище електромагнітної індукції. Закон електромагнітної індукції Фарадея. Правило Ленца

1º. Виникнення електрорушійної сили індукції при русі провідника в магнітному полі

Розглянемо прямий провідник довжиною *l*, який рухається зі сталою швидкістю v, в магнітному полі з індукцією напрямленою під кутом φ до нормалі площини, в якій рухається провідник (див. мал.). На носії струму (в конкретному випадку електрони) буде діяти магнітна сила Лоренца, яка переміщуватиме носії на один з кінців провідника. В результаті у провіднику виникне електричне поле, напруженість якого E характеризується різницею потенціалів кінців провідника (напругою на провіднику)



$$E = \frac{U}{l}.$$

Різниця потенціалів перестане зростати, коли сила Лоренца, що діє на електрон зарядом q_0, зрівноважиться силою, що діятиме з боку утвореного електричного поля

$$F_L = F_E,$$

$$|q_0|v\,B\sin(90^0 - \varphi) = |q_0|E.$$

Якщо замкнути кінці провідника, то виникне струм в замкненому колі, де сила Лоренца виконуватиме роль сторонньої сили, робота якої визначає електрорушійну силу (ε). Ця електрорушійна сила (ЕРС), яка виникає внаслідок руху провідника в магнітному полі, називається *індукційною* і, у даному випадку, рівна різниці потенціалів кінців розімкненого провідника

$$\varepsilon = U = B\,v\,l\sin(90^0 - \varphi) = B\,v\,l\sin\alpha.$$

Оскільки

$$v = \frac{|\Delta b|}{\Delta t},$$

де |Δb| – відстань, яку проходить провідник (див. мал.) довжиною *l* за час Δt, замітаючи площу $|\Delta S| = |\Delta b|\,l$,то

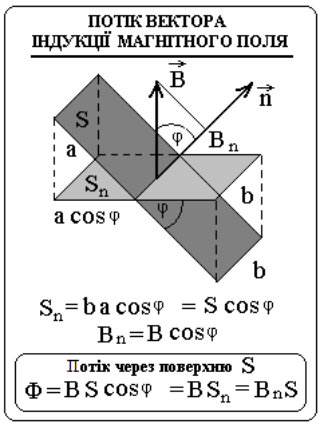
$$\varepsilon = v\,B\,l\sin(90^0 - \varphi) = B\,v\,l\cos\varphi.$$

або

$$\varepsilon = \frac{B|\Delta b|l\cos\varphi}{\Delta t} = \frac{B|\Delta S|\cos\varphi}{\Delta t}.$$

З наведених обчислень випливає зручність розгляду виразу

$\Phi_B = BS\cos\varphi$ – ***потоку вектора магнітної індукції.***



Тоді формулу ЕРС індукції можна записати через зміну потоку вектора магнітної індукції $\Delta\Phi = B\,\Delta S$, так що

$$\varepsilon = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}.$$

Одиницею потоку ВМІ в СІ є вебер (Вб). На основі введених формул, вебер можна означити як потік ВМІ однорідного поля з індукцією 1 Т через нормальну поверхню площею 1 м^2, або як потік, зменшення якого до нуля за 1 секунду, через поверхню обмежену провідником, індукує ЕРС величиною 1 В. Отже

$$1\text{Вб} = 1\ \text{Т}\cdot\text{м}^2 = 1\text{В}\cdot\text{с}.$$

Можна помітити, що у випадку, коли провідник є частиною замкненого контура, виникає питання знаку ΔS, з яким пов'язаний знак ЕРС. В такому випадку зручно вважати індукційну ЕРС алгебраїчною величиною

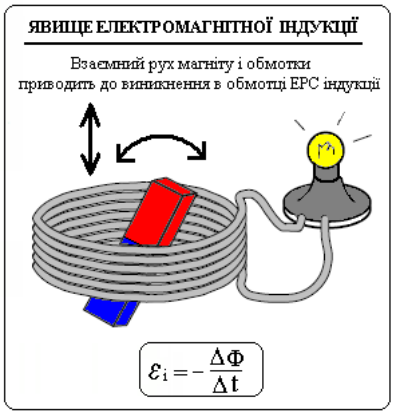
$$e_i = \pm\,\varepsilon,$$

де знак (+) ставиться, коли напрямок е.р.с. співпадає з напрямком обходу і (–), якщо – ні.

При цьому напрямок нормалі координуватиметься з напрямком обходу за правилом правого гвинта. Таким чином, у випадку, коли контур зліва: $\Delta S > 0$, $\Delta\Phi > 0$, $e_i < 0$; коли контур справа: $\Delta S < 0$, $\Delta\Phi < 0$, $e_i > 0$.

Вираз для ЕРС який відповідає всім цим випадкам, матиме вигляд

$$e_i = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$



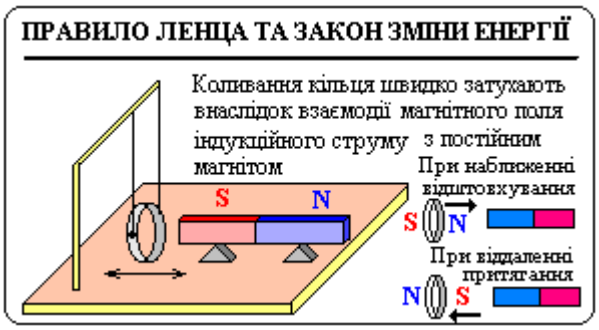
і є виразом ***закону електромагнітної індукції Фарадея*** (1831 р.), який стверджує, що *при зміні потоку вектора магнітної індукції (ВМІ) через поверхню обмежену провідником, в провіднику виникає ЕРС рівна швидкості зміни потоку зі знаком мінус.*

Явище збудження ЕРС в провіднику внаслідок зміни потоку ВМІ через поверхню обмежену провідником називається ***явищем електромагнітної індукції.***

Індукційну ЕРС та струм можна спостерігати в котушці замкненій на чутливий амперметр (гальванометр), якщо здійснювати взаємний рух магніта і котушки.

2º. Правило Ленца як наслідок закону зміни енергії

За законом зміни енергії, збудження індукційної ЕРС можливе лише за рахунок зменшення іншого виду енергії. Цю обставину враховує ***правило Ленца***, за яким *індукційна е. р. с. має напрямок, при якому магнітне поле її можливого струму здатне протидіяти зміні потоку ВМІ, яка збуджує цю ЕРС.*



Коливання суцільного кільця (див. мал.), пов'язані з віддаленням та наближенням до нерухомого постійного магніта швидко затухають. При наближенні до магніта збуджується індукційний струм такого напрямку, при якому на стороні зверненій до певного полюса постійного магніта виникає однойменний магнітний полюс, і відбувається відштовхування. При віддаленні струм змінює свій напрямок, а з ним і магнітний полюс змінюється на протилежний. Теж саме відбувається при наближенні магніта і до нерухомого суцільного кільця. Зменшення механічної енергії коливань відповідає тепловим втратам при циркуляції струму в кільці. Взаємодія не спостерігається у випадку розрізаного кільця, оскільки індукційна ЕРС не створює струму а з тим і магнітного поля.

Можна помітити, що при виборі напрямку обходу контуру координованого з нормаллю, правило Ленца відображається знаком ЕРС.

§30. Самоіндукція. Взаємоіндукція

Поверхня, обмежена провідником зі струмом, знаходиться в магнітному полі власного струму. Потік вектора магнітної індукції цього поля називається власним і є прямопропорційним до струму. Відношення ***власного потоку ВМІ*** Φ_L до сили струму в провіднику I називається ***індуктивністю*** L цього провідника

$$L = \frac{\Phi_L}{I}.$$

У відповідності до цієї формули, одиниця індуктивності СІ генрі (Гн) визначається, як індуктивність провідника, який при струмі 1А створює власний магнітний потік величиною 1 Вб

$$1\text{Гн} = \frac{1\text{Вб}}{1\text{А}}.$$

При зміні струму у провіднику, його власний магнітний потік також змінюється, що за законом електромагнітної індукції має приводити до виникнення у провіднику ***ЕРС самоіндукції.***

$$\varepsilon_L = \frac{|\Delta\Phi_L|}{\Delta t} = L\frac{|\Delta I|}{\Delta t}.$$

Обравши напрямок обходу контуру, матимемо для алгебраїчних значень струму та ЕРС

$$e_L = -\frac{\Delta\Phi_L}{\Delta t} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

З останнього зрозуміло, що *індуктивність провідника можна означити також через ЕРС індукції, що виникає в ньому при зміні струму*.

Явище виникнення ЕРС у провіднику, внаслідок зміні струму в ньому, називається ***самоіндукцією. ЕРС самоіндукції*** прямопропорційна швидкості зміни струму в провіднику і за правилом Ленца має напрямок, при якому її можливий струм здатний перешкоджати зміні основного струму. У випадку зростання основного струму, струм самоіндукції має протилежний йому напрямок, у випадку спадання – супутній.

В схемі, зображеній на малюнку, при вмиканні струму лампочка Л2 повільно розгоряється, оскільки струм самоіндукції, який виникає в котушці з осердям, напрямлений проти струму джерела і перешкоджає його зростанню. При вимиканні струму лампочка Л2 повільно згасає, оскільки струм самоіндукції підсилює струм джерела, перешкоджаючи його спаданню.

Приклад. *Індуктивність соленоїда.*

Магнітна індукція всередині соленоїда $B = \frac{\mu_0 NI}{l} = \mu_0 nI$. Власний потік ВМІ через поверхню обмежену намоткою $\Phi_L = BNS$, де S – площа охоплена одним витком. Індуктивність соленоїда $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} = \mu_0 n^2 Sl = \mu_0 n^2 V$, де V – об'єм соленоїда. Якщо соленоїд має феромагнітне осердя, $L = \mu_0 \mu n^2 V$.

Індуктивність виражена через магнітну індукцію $L = \mu_0 n^2 V = \frac{B^2}{\mu_0 \mu I^2} V$.

§31. Енергія провідника зі струмом. Енергія магнітного поля та її густина

Встановлення струму в провіднику супроводжується появою магнітного поля в околі провідника. При цьому має бути виконаною робота проти ЕРС самоіндукції, яка протидіє наростанню струму в провіднику. За законом зміни енергії ця робота рівна енергії набутої провідником і зосередженої в його магнітному полі. Вважаючи зміну струму, від нульового значення до установленого, рівномірною, та визначивши заряд, що проходить в провіднику, за середньоарифметичним значенням струму $q = \frac{I + I_0}{2}\Delta t = \frac{I}{2}\Delta t$, отримаємо

$$W = -A_L = -\varepsilon_L q = L\frac{I}{\Delta t} I\,\Delta t = \frac{LI^2}{2}.$$

Прийнявши до уваги, що магнітне поле соленоїда зосереджене в його об'ємі, підстановкою індуктивності соленоїда в останнє співвідношення отримаємо вираз для енергії магнітного поля

$$W_M = \frac{LI^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} V.$$

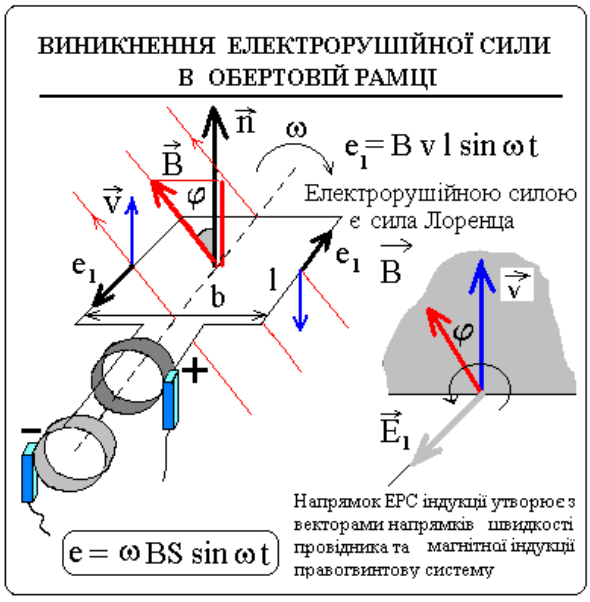
Видно, що густина енергії магнітного поля $w_M = \frac{W}{V}$ визначається його магнітною індукцією

$$w_M = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}.$$

§32. Індукційний електричний струм. Генератор електричного струму

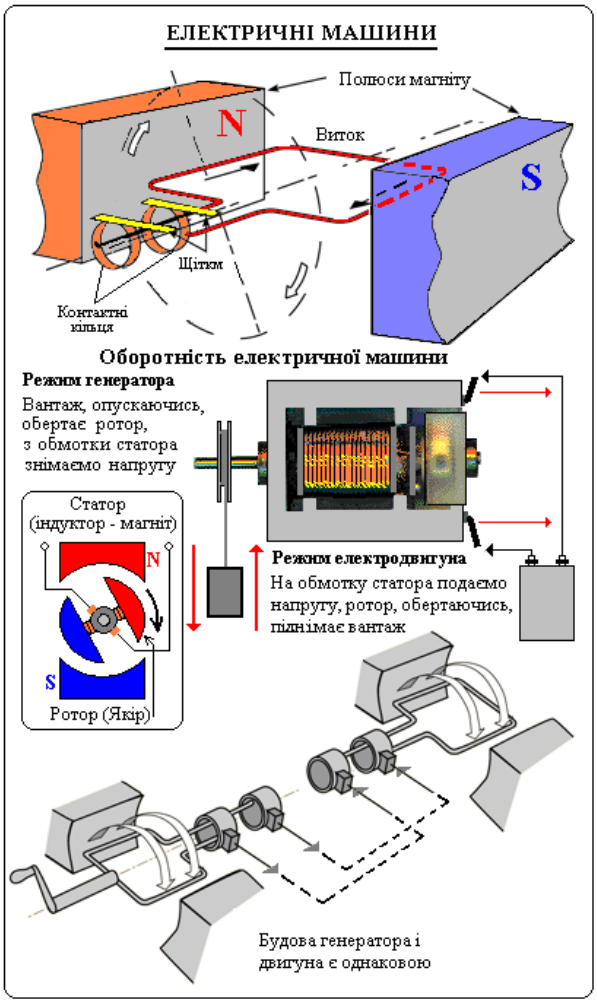
Для підтримання струму в колі потрібна ЕРС. Найбільш зручний для виробництва спосіб одержання ЕРС грунтується на застосування *явища електромагнітної індукції*. Індукційна ЕРС за законом Фарадея

$$e_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$



З аналізу формули потоку ВМІ (Ф = BS cos φ) випливає, що найпростіший, з технічного боку, метод отримання змінного потоку полягає у зміні кута φ при обертанні обмотки з N витками в магнітному полі.

Розглянемо виникнення ЕРС в плоскому витку, який обертається в магнітному полі. В найпростішому випадку виток являє собою плоску прямокутну рамку, що обертається навколо осі, яка проходить по осі симетрії рамки. В такій рамці електрорушійні сили виникають лише в бічних провідниках і мають протилежний напрям в зв'язку з протилежністю напрямків швидкості цих провідників. Саме тому вони обоє напрямлені проти годинникової стрілки, якщо дивитись з кінця вектора нормалі до площини рамки і в сумі утворюють загальну ЕРС рамки. Електрорушійна сила в торцевих провідниках рівна нулю, так як дві половини цих провідників мають протилежну швидкість і в них виникають протилежні ЕРС, які взаємно компенсуються. До такого висновку можна також прийти врахувавши те, що через площу поверхні, яку описують торцеві провідники, не змінюється потік ВМІ.



Електрорушійна сила в бічному провіднику довжиною l, який рухається зі швидкістю $v = \frac{\omega \cdot b}{2}$, де $\omega = \frac{\varphi}{t}$ – кутова швидкість (циклічна частота) обертання рамки, а $\frac{b}{2}$ (половина довжини торцевого провідника) слугує радіусом обертового руху, буде рівною

$$e = v\,B\,l\sin\varphi.$$

Електрорушійна сила в рамці складається з ЕРС двох бічних провідників.

$$e = 2vBl\sin\varphi = B\,2\omega\frac{b}{2}l\sin\varphi = \omega \cdot BS\sin\omega t\,.$$

Оскільки $BS = \Phi_m$ - є максимальним (амплітудним) значенням потоку ВМІ, то ЕРС індукції запишеться і так

$$e_i = \omega \cdot \Phi_m \sin\omega \cdot t\,,$$

або

$$e_i = E_m \sin \omega \cdot t .$$

Таким чином маємо гармонійно змінну ЕРС, яка виявляє себе у вигляді *напруги на контактних щітках, що відводять цю ЕРС від колекторних* кілець.

Якщо в магнітному полі обертається обмотка з N витків, то електрорушійні сили всіх витків сумуються і в результаті отримуємо ЕРС в N разів більшу.

Якщо ж магнітне поле створюють p пар магнітних полюсів, то частота зміни потоку ВМІ та ЕРС зросте в p разів.

$$e = p N \omega BS \sin \omega t$$

Пристрій, в якому створюється змінна ЕРС називається *генератором змінного струму.*

Гармонійно змінна електрорушійна сила (або напруга) викликає в електричному колі *гармонійно змінний струм, який являє собою вимушені електромагнітні коливання* в електропровідній мережі. Проте зв'язок змінної напруги і відповідного струму є не таким простим, як для випадку їх постійних значень. Перша відмінність полягає у можливості неодночасних (несинхронних) змін напруги і струму, які свого максимального значення можуть набувати в різні моменти часу, тобто здійснювати коливання, які матимуть зсув за фазою (несинфазні коливання). Причиною такого зсуву є індуктивність та ємність провідників.

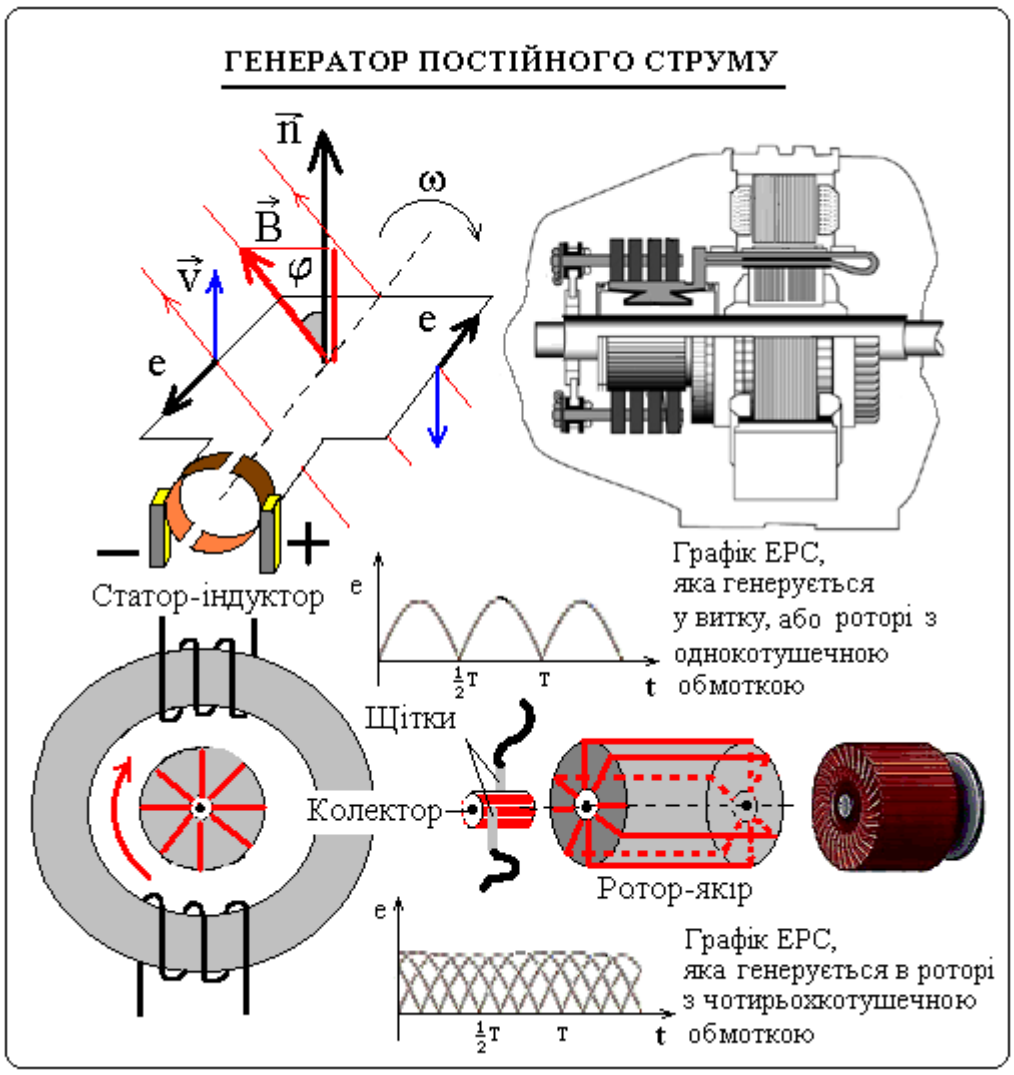
В *генераторах змінного струму* напрямок ЕРС в обмотці змінюється, і щітка, ковзаючи по своєму колекторному кільцю, знімає на протязі першої половини періоду обертання позитивний, а другої половини – негативний потенціал, в результаті чого між щітками створюється змінна напруга, яка подається споживачеві.

Наявність ковзного колекторно-щіточного контакту у випадку роботи з високою напругою стає суттєвим недоліком в зв'язку з виникненням в ньому іскріння та обгоряння. Тому високовольтні генератори відносяться до другого типу. В них якірна обмотка розташовується в пазах статора, що також створює можливість більш надійної їх ізоляції.

Проте, якщо колектор виготовити у вигляді кільця поділеного на частини (у найпростішому випадку – на дві), то таким чином можна утворити *генератор постійного струму*.

У генераторах постійного струму з однокотушковою якірною обмоткою випрямляння за допомогою колекторно-щіточного перемикання можливе завдяки тому, що щітка контактує з півкільцем, провідник якого проходить одну й ту ж дільницю траєкторії. Отримується пульсуюча ЕРС незмінного напрямку. Якщо обмотка складається з декількох котушок, то кінці кожної з них сполучаються з протилежними сегментами (пластинами) колектора. В цьому випадку кількість пульсацій за період обертання ротора збільшується, і таким чином відбувається їх згладжування.

Звичайний постійний магніт в ролі індуктора є неефективним, тому в промислових генераторах цю роль виконує електромагніт, обмотка якого живиться відводом струму самого генератора (*струмом збудження*). Для генератора такого типу характерним є



пусковий режим (самозбудження), при якому початковий струм генератора збуджується залишковим магнетизмом осердя індукторної обмотки, Початковий струм підживлює цю обмотку, що приводить до посилення її магнітного поля , це в свою чергу приводить до підсилення індукованого струму і т. д. до встановлення певного режиму роботи.