

Електромагнітна індукція

Фарадей та Генрі намагалися виконати зворотне перетворення магнітного поля в електричний струм. Це вдалося, коли від сталого у часі магнітного поля перейшли до змінного: за будь-якої зміни потокозчеплення ψ (потіку, що проходить всередині контура L , рис. 4.29) у контурі виникає струм, який було названо *індукційним*. Залежно від того, збільшувалося у часі потокозчеплення (постійний магніт наближався до контура) чи зменшувалося (магніт віддалявся), струм змінював свій напрямок. Зрозуміло, що індукційний струм є наслідком дії ЕРС (4.21), яка наводиться в контурі внаслідок зміни потокозчеплення. *Напрямки потокозчеплення ψ та ЕРС індукції чи струму* мають бути такими самими, як у випадку, коли струм в контурі (чи соленоїді, рис. 4.2, б) спричиняв магнітне поле. Тобто вони пов'язані між собою правилом свердлика (параграф 4.1). На рис. 4.29, а додатний напрямок потоку магнітної індукції згори — вниз, тоді додатний напрямок ЕРС і струму — за годинниковою стрілкою.

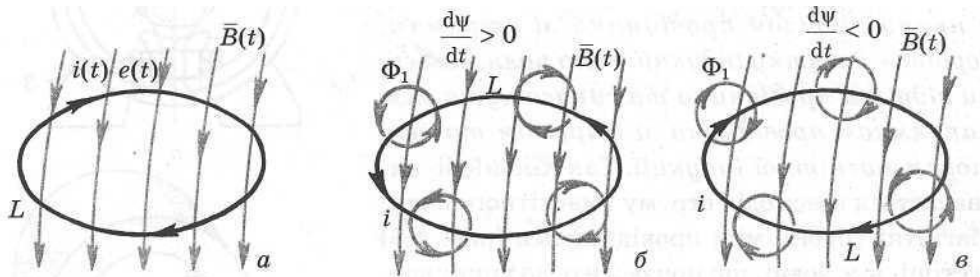


Рис. 4.29

Досліди Фарадея з магнітом показали, що при введенні магніту в котушку з короткозамкненим проводом виникає сила, що протидіє введенню, при виведенні з котушки — сила, що протидіє виведенню. При введенні магніту, коли $\Delta\Phi/\Delta t > 0$, струм індукції створює своє магнітне поле Φ_1 , що відштовхує поле магніту. Так буде, коли полюси магніту і магнітного поля Φ_1 від струму індукції однакові (рис. 4.29, б).

При виведенні магніту, коли $\Delta\Phi/\Delta t < 0$, маємо зворотню картину (рис. 4.29, в). Щоб ці умови задовольнялися, необхідно дотримуватися таких співвідношень:

$$\begin{aligned} I < 0, & \text{ коли } \Delta\Phi/\Delta t > 0, \\ I > 0, & \text{ коли } \Delta\Phi/\Delta t < 0, \\ I = 0, & \text{ коли } \Delta\Phi/\Delta t = 0. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Ленц так визначив це співвідношення між $\Delta\Phi$ та I : *Індукційний струм завжди має такий напрямок, при якому виникає протидія причинам, що його спричинили*. Це характеризує інерційну властивість явища: воно намагається зменшити швидкість зміни потокозабезпечення, додаючи чи віднімаючи від зовнішнього потоку свій потік.

Пізніше Максвеллом було введено поняття *вихрового* електричного поля, що утворюється змінним магнітним. Це явище названо *електромагнітною індукцією* (за аналогією з електростатичною для кулонівських полів).

На відміну від електростатичного, вихрове поле не потенціальне. Воно характеризується *ЕРС індукції* e_L як питомою роботою вихрового електричного поля вздовж замкненого шляху. Ця ЕРС дорівнює

$$e_L = -\Delta\Phi/\Delta t, \quad (4.31)$$

де Δt та $\Delta\Phi$ мають досить малі значення. Якщо Δt прямує до нескінченно малого значення dt , то відповідно зменшується і $\Delta\Phi$ до $d\Phi$, а їх відношення дає миттєве значення ЕРС індукції:

$$e_L = -d\psi/dt. \quad (4.32)$$

Коли соленоїд має ω витків і всі вони пронизуються одним і тим самим магнітним потоком Φ , то

$$e_L = -\omega \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (4.33)$$

де ψ — потокозчеплення.

Закон електромагнітної індукції у формулюванні Максвелла: *ЕРС електромагнітної індукції в замкненому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, що його пронизує, взятої з протилежним знаком.*

Явище електромагнітної індукції широко використовується у генераторах постійної та синусоїдної напруги (розділ 8).

Самоіндукція

Окремим випадком явища електромагнітної індукції є *самоіндукція*. Якщо котушку індуктивності (рис. 4.30), що має $w > 0$ витків, приєднаємо через перемикач (рис. 4.31) до постійної напруги U (рис. 4.32), то струм $i(t)$ в ній зростатиме, поступово наближаючись до свого усталеного значення I , яке за законом Ома дорівнюватиме:

$$I = U/R, \quad (4.34)$$

де R — активний опір проводу, з якого намотано обмотку котушки.

Поступовість зростання струму зумовлена появою ЕРС самоіндукції e_L , що наводиться в котушці індуктивності внаслідок змінного у часі магнітного потоку за вже відомим законом (4.33). Цей потік Φ створюється струмом $i(t)$ котушки. Струм $i(t)$ являє собою алгебраїчну суму I (4.34) та струму i_L самоіндукції:

$$i_L = \frac{e_L}{R}.$$

$$\Phi = \frac{iw}{R_m}, \quad (4.35)$$

Згідно з правилом Ленца, вихрове електричне поле, а також, як наслідок, ЕРС і струм самоіндукції мають такий напрямок, при якому зменшується дія причини, що призвела до виникнення цього поля. Так, коли котушку вмикають до джерела U , струм $i(t)$ зростає. Відповідно зростає магніторухійна сила $i \cdot w$, зростає магнітний потік Φ ,

де R_m — магнітний опір. Зростання магнітного потоку Φ наводить ЕРС e_L зворотного до струму I напрямку. Тоді

$$i(t) = \frac{U - e_L}{R} = I - i_L. \quad (4.36)$$

Між потоком Φ і струмом i , згідно з (4.35), існує пропорційна залежність:

$$\Phi = \frac{w}{R_m} \cdot i. \quad (4.37)$$

ЕРС самоіндукції, з урахуванням закону (4.33) та залежності (4.37), дорівнюватиме:

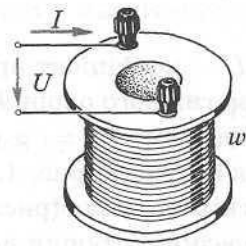


Рис. 4.30

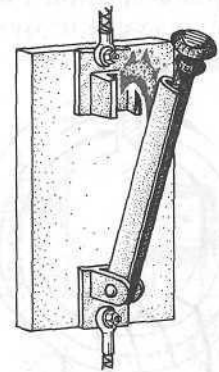


Рис. 4.31

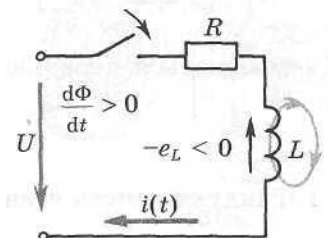


Рис. 4.32

$$e_L = -\frac{w^2}{R_M} \cdot \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (4.38)$$

де L — коефіцієнт пропорційності, що залежить від числа витків котушки та магнітного опору R_M (4.17). Для повітря $R_M = l/\mu_0 S$, для феромагнітного середовища $R_M = l/\mu_0 \mu_r S$ де μ_r становить досить велике значення (рис. 4.14). Для котушки (рис. 4.30) без феромагнітного осердя довжиною l силові лінії магнітного поля (рис. 4.2, б) стиснуті всередині її і розходяться зовні. Тобто всередині котушки переріз S_{BH} обмежений діаметром її витків, зовні $S_{ЗОВ}$ — необмежений. Магнітний опір R_u такої котушки дорівнює сумі магнітних опорів всередині і зовні котушки:

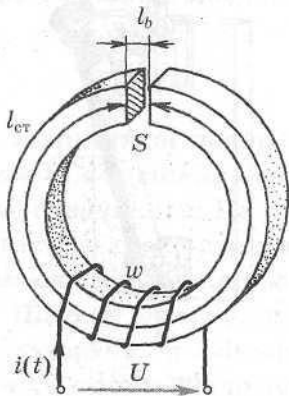


Рис. 4.33

$$R_M = \frac{l}{\mu_0 S_{BH}} + \frac{l_{ЗОВ}}{\mu_0 S_{ЗОВ}} \approx \frac{l}{\mu_0 S_{BH}}.$$

Оскільки $l/S_{BH} \gg l/S_{ЗОВ}$ індуктивність L котушки становитиме

$$L = \frac{w^2}{R_M} = \frac{w^2 \mu_0 S_{BH}}{l} = \mu_0 w_H^2 S_{BH} \cdot l, \quad (4.39)$$

де $w_H = w/l$ — нормована за довжиною l кількість витків (витки на метр).

Для котушки (рис. 4.33) з феромагнітним осердям (дросель) та невеликим (l_b) повітряним зазором практично всі силові лінії магнітного поля, що утворюється струмом $i(t)$ в обмотці котушки, замикаються через осердя. Тоді

$$R_M = \frac{l_{ст}}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{l_b}{\mu_0 S} \quad (4.40)$$

і її індуктивність становить

$$L = \frac{w^2 \mu_0 S}{l_{ст}/\mu_r + l_b}, \quad (4.41)$$

набагато більшу за індуктивність (4.39) такої самої котушки без осердя, бо тут $l_b \ll l$ і $l_{ст}/\mu_r \ll l$.

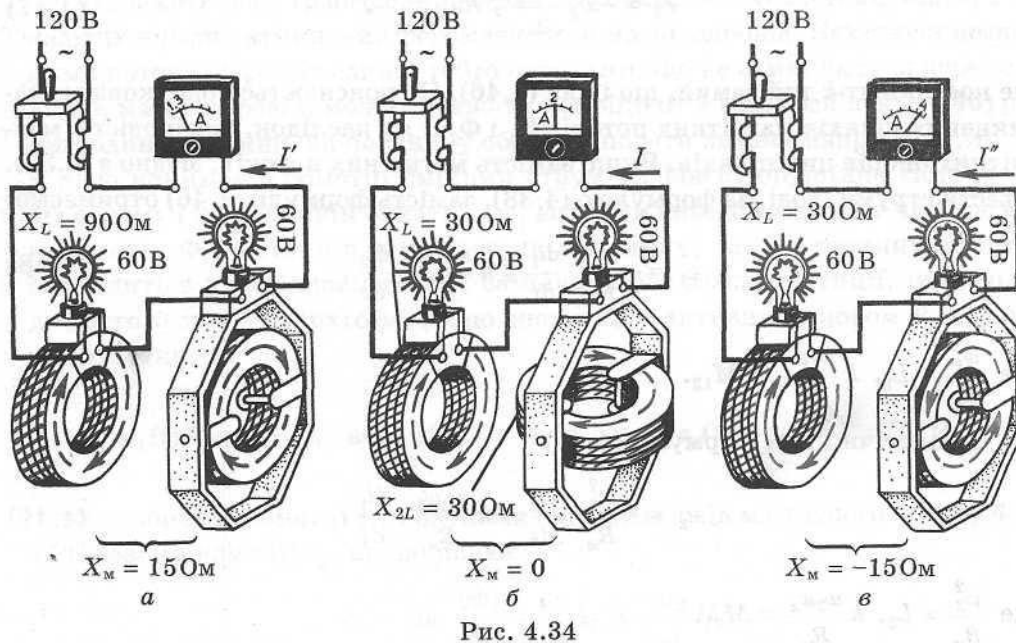
При ввімкненні котушки до електричного кола (рис. 4.32) іскра чи дуга не виникає, а при розімкненні електричного кола (рис. 4.32) маємо дугу (рис. 4.31) тим більшу, чим більша індуктивність L та струм I : за

формулою (4.38) при розмиканні кола наводиться велика ЕРС самоіндукції (тут $di = I$, а dt прямує до нуля). Вона утворює в просторі між контактами електричне поле напруженості $\varepsilon_k = e_L/dl$, де dl — досить мала відстань між контактами. Повітря під дією e_k іонізується і стає струмопровідним, виникає іскра чи дуга, яка гасне зі збільшенням часу Δt та зазору Δl між контактами. У вимикачах силових мереж (параграф 17.4) застосовуються спеціальні пристрої для гасіння потужної дуги. Це явище використо- вується у стартерах газорозрядних ламп освітлювання та бензинових двигунах для запалювання повітряно-бензинової суміші. Енергія W_M магнітного поля, що нагромаджується в магнітопроводі котушки,

$$W_M = \frac{LI^2}{2}. \quad (4.42)$$

Взаємоіндукція

Установку (рис. 4.34) з двох послідовно з'єднаних котушок індуктивності і амперметра ввімкнено на синусоїдну напругу. Залежно від взаємного розташування котушок при одній і тій самій напрузі струм буде різним: (а) — найменший, коли котушки паралельні і струми в них мають



однаковий напрямок; (б) — середній — котушки взаємоперпендикулярні; (в) — найбільший — котушки паралельні, але струм в них напрямлено в різних напрямках.

Якщо котушки рознести у просторі на відстань набагато більшу за їх діаметр, то (незалежно від їх взаєморозташування) струм буде таким, як у випадку (б). Це вказує на те, що змінне у часі магнітне поле кожної з котушок впливає, згідно з явищем електромагнітної індукції (4.33), на сусідню і явища самоіндукції (4.38) — само на себе. *Взаємоіндукція* — це явище наведення ЕРС у контурі під дією змінного магнітного поля, збудженого струмом в іншому контурі. ЕРС і струм, що виникають унаслідок цього процесу, називають ЕРС взаємоіндукції e_{12} чи e_{21} і струми i_{12} та i_{21} . Залежно від напрямку ці ЕРС збільшують чи зменшують власні ЕРС самоіндукції і, як наслідок, змінюють значення струму в колі. ЕРС першої котушки становить:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} \mp kw_1 \frac{d\Phi_2}{dt}, \quad (4.46)$$

де коефіцієнт взаємозв'язку k , $k < 1$ вказує, яка частина магнітного потоку Φ_2 , утвореного струмом другої котушки, пронизує (входить у зчеплення) w_1 витків першої. Знак «мінус» при k відповідає узгодженому з'єднанню чи розташуванню котушок, «плюс» — зустрічному. При

узгодженому з'єднанні протидія ЕРС котушок більша і струм, згідно з (4.36), менший; при зустрічному — навпаки. Аналогічно для другої котушки

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} \mp kw_2 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad (4.47)$$

де коефіцієнт k той самий, що і для (4.46). Це пояснюється однаковістю замкнених шляхів магнітних потоків Φ_x і Φ_2 і, як наслідок, однаковістю магнітних опорів цих шляхів. Якщо замість магнітних потоків, згідно з (4.35), ввести струми, тоді, за формулою (4.38), замість формули (4.46) отримаємо:

Аналогічно для формули (4.47)

$$e_1 = -\frac{w_1^2}{R_M} \cdot \frac{di_1}{dt} \mp k \frac{w_1 w_2}{R_M} \cdot \frac{di_2}{dt}, \quad (4.48)$$

$$\text{де } \frac{w_1^2}{R_M} = L_1, \quad k \frac{w_1 w_2}{R_M} = M_{12}.$$

$$e_2 = -\frac{w_2^2}{R_M} \cdot \frac{di_2}{dt} \mp k \frac{w_2 w_1}{R_M} \cdot \frac{di_1}{dt}, \quad (4.49)$$

$$\text{де } \frac{w_2^2}{R_M} = L_2, \quad k \frac{w_2 w_1}{R_M} = M_{21}.$$

Взаємодуктивність $M_{12} = M_{21} = M$. В установці (рис. 4.34) струми $i_2 = I_2 = i$. Тоді загальні ЕРС і індуктивність двох котушок становлять:

$$\begin{aligned} e &= e_1 + e_2 = -L_1 \frac{di}{dt} \mp M \frac{di}{dt} - L_2 \frac{di}{dt} \mp M \frac{di}{dt} = \\ &= -\frac{di}{dt} (L_1 + L_2 \pm 2M) = -L \frac{di}{dt}, \end{aligned}$$

або

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M. \quad (4.50)$$

Ця властивість двох індуктивно пов'язаних котушок широко використовується в техніці радіозв'язку для налагодження частоти радіопередавача через зміну індуктивності (4.50) в пристрої, що називають варіатором.

Вихрові струми

Змінний магнітний потік ЕРС виникає не тільки в провідниках обмоток, а й у самому магнітопроводі. Наприклад, якщо у суцільному магнітопроводі дроселя (рис. 4.33) з розрізом $S=d \cdot h$ магнітний потік $\Phi(t)$ змінюється за синусоїдним законом, то в контурі $2(d + h)$, розміщеному по периметру перетину магнітопроводу (рис. 4.35, а), наводиться ЕРС пропорційна амплітуді Φ_m та частоті со потоку $\Phi(t)$. Амплітуда струму в магнітопроводі, який називають вихровим, або струмом Фуко, за законом Ома для замкненого кола (3.18) пропорційна амплітуді ЕРС E_m і обернено пропорційна ρ та $2(d + h)$. Вихровий струм наводить у магнітопроводі свій магнітний потік $\Phi_v(t)$, що частково розмагнічує магнітопровід.

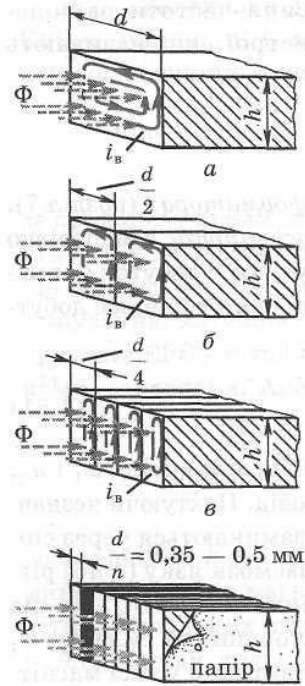


Рис. 4.35

Струм, що проходить через магнітопровід, за законом Джоуля-Ленца *нагріває магнітопровід*. Тому необхідно, не зменшуючи основного магнітного потоку Φ , зменшити вихрові струми. Це досягається заміною суцільного магнітопроводу (рис.4.35,а) набором з n тонких листів (рис. 4.35, г), які ізолювано один від одного папером, лаком або

оксидною плівкою. Якщо $n = 2$ (рис. 4.35, б), то $\Phi(t)$ для кожної частини зменшиться вдвоє, а периметр становитиме $2\left(\frac{d}{2} + h\right)$; для $n = 4$ (рис. 4.35, в) потік $\Phi(t)$ зменшиться в чотири рази, а периметр $2\left(\frac{d}{4} + h\right)$ становитиме

При заміні суцільного магнітопроводу n пластинами, які разом мають такий же розріз, струм у кожній пластині зменшиться за великих n і h майже в $n/2$ разів, бо потік для кожної пластини зменшився в n разів, а периметр і опір зменшилися лише в $2(d + h)/2(d/n + h)$ разів (приблизно в 2 рази).

Домішка кремнію у сталі до чотирьох відсотків (рис. 4.36) збільшує питомий опір матеріалу магнітопроводу приблизно в чотири рази. Для промислових частот 50, 400 Гц цього достатньо, аби зробити втрати енергії на вихрові струми малими. На високих частотах використовуються феритові осердя, які мають малий магнітний і великий електричний опори. *Втрати на вихрові струми пропорційні квадрату частоти змінного магнітного поля та квадрату магнітної індукції*. Вихрові струми в магнітопроводах електротехнічних пристроїв призводять до негативних наслідків, тому їх намагаються уникнути. З

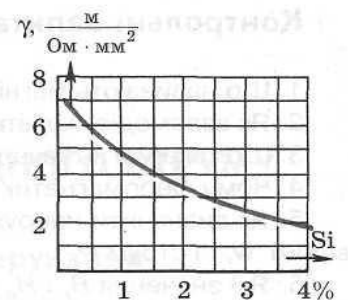


Рис. 4.36

корисною метою вихрові струми використовуються в промислових установках плавлення і гартування металів, в побутових електропечах.

Контрольні запитання

1. Що називають магнітним полем?
2. Як взаємодіє магнітне поле з зарядом, що рухається?
3. Що таке магнітна індукція, магнітний потік, потокозчеплення?
4. Чому феромагнетик збільшує зовнішнє магнітне поле?
5. Як визначити напруженість магнітного поля осердя (рис. 4.12, в), якщо відомі w , L і струм I ?
6. Які значення B_e і H_e мають магнітнотверді матеріали?
7. Сформулюйте закон повного струму для електричного кола (рис. 4.16), перший закон Кірхгофа для магнітного кола (рис. 4.25), закон Ома магнітопроводу якоря електромагніта (рис. 4.16).
8. Що створюється у сталому магніті під впливом магнітного поля?
9. Як розраховують електромагніт? Якою умовою обмежуються його розміри? Як для відомих розмірів та інших параметрів визначити магнітну силу електромагніта?
10. Що таке «сила Ампера»? Як вона використана у приладі (рис. 4.28, б)?
11. Як пов'язані між собою потокозчеплення та ЕРС індукції, струм та ЕРС самоіндукції, індуктивність котушки з магнітним опором її магнітопроводу?
12. Чому при замиканні перемикача, що з'єднує котушку із джерелом, дуга не виникає, а при розмиканні виникає? Де використовують це явище?
13. Чому в трансформаторі відношення U_1 до U_2 обернене до відношення I_1 до I_2 ?
14. Від чого залежать втрати на перемагнічування?