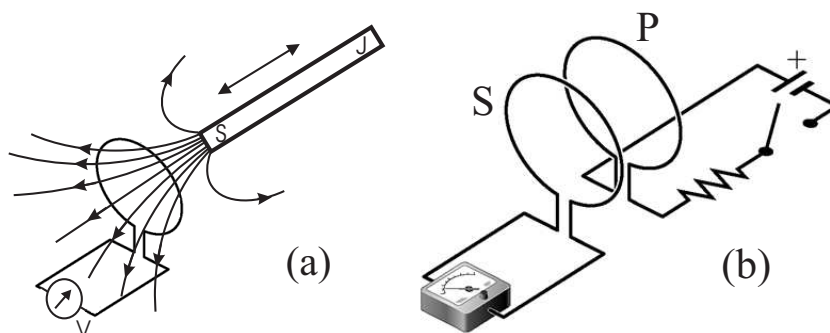


16 Elektromagnetická indukcia

Michal Faraday¹ v roku 1831 svojimi experimentmi objavil elektromagnetickú indukciu. Cieľom týchto experimentov bolo nájsť súvislosti medzi elektrickými a magnetickými javmi. Z predchádzajúcej kapitoly vieme, že elektrický prúd vytvára magnetické pole. Faraday zas ukázal, že magnetické pole môže byť zdrojom elektrického prúdu. Popíšme si podrobnejšie dva experimenty, ktoré nám budú slúžiť na výklad elektromagnetickej indukcie.



Obrázok 16.1: Vznik indukovaného elektromotorického napätia v cievke.

Zostavme jednoduchý obvod z cievky a galvanometra (obr. 16.1(a)). Keď približujeme tyčový magnet k cievke, ručička galvanometra sa vychýli na jednu stranu. Pri vzdďalovaní magnetu je výchylka opačná. Rýchlejší pohyb magnetu spôsobuje väčšiu výchylku galvanometra. Podobné výsledky dostaneme aj keď budeme pohyb vykonávať cievkou namiesto magnetu. Ak magnet a cievka sú navzájom v pokoji, výchylka galvanometra je nulová.

Iný typ experimentu, pri ktorom tiež bude vznikať napätie (elektromotorické), vytvoríme obdĺžnikovým závitom. Jedna strana závitov nech je po-

¹MICHAL FARADAY (1791 – 1867), vynikajúci anglický fyzik a experimentátor. Pre-slávil sa objavmi zákonov elektrolýzy, diamagnetizmu, pôsobenia magnetického poľa na polarizované svetlo a iné. Patrí k najvýznamnejším fyzikom 19. storočia

hyblivá no celý závit je vložený do konštantného magnetického poľa kolmo na indukčné čiary. Ak budeme pohybovať pohyblivou časťou závitú konštantnou rýchlosťou, obodom bude pretekať konštantný elektrický prúd. Veľkosť a smer pretekajúceho prúdu bude závisieť od smeru pohybu a rýchlosti, ktorou sa bude pohybovať pohyblivá časť závitú.

Nahradíme teraz magnet ďalšou cievkou pripojenou k zdroju jednosmerného napätia cez potenciometer (obr. 16.1(b)). Vznikne tak dvojica obvodov: primárny obvod s primárnou cievkou P a sekundárny obvod so sekundárnou cievkou S (podobnosť s transformátorom). Ak budeme zväčšovať napätie v primárnom obvode P pomocou potenciometra, tak v sekundárnom sa bude indukovať prúd - ručička galvanometra sa vychýli jedným smerom. Čím bude rýchlejšia zmena, tým viac sa vychýli ručička na galvanometri. Pri zmene prúdu primárnou cievkou sa mení jej magnetické pole, ktoré zasahuje do sekundárnej cievky presne ako pri pohybe magnetu.

Z vykonaných pokusov vyplýva viacero informácií. Pri vzájomnom pohybe magnetu a cievky sa indukuje v druhej cievke napätie, ktoré sa nazýva **elektromotorické napätie**. Prúd, ktorý pri tom v obvode vzniká, sa nazýva **indukovaný prúd**. Ďalej, smer indukovaného prúdu závisí od zmeny magnetického poľa (približovanie alebo vzdľavovanie magnetu). Veľkosť elektromotorického napätia závisí od rýchlosti zmeny magnetického poľa.

16.1 Magnetický indukčný tok

Podobne ako používame tok intenzity elektrického poľa, definujeme si veličinu magnetický indukčný tok v magnetickom poli. Elementárny magnetický tok je definovaný ako skalárny súčin vektora magnetickej indukcie a vektora elementu plochy $d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$. **Magnetický indukčný tok určitou plochou je integrálom elementárneho magnetického toku cez túto plochu**

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (16.1)$$

Jednotkou magnetického indukčného toku je **weber**² ($Wb = T \cdot m^2$).

Už vieme, že magnetické indukčné čiary vytvárajú uzavreté krivky, ktoré nikde nezačínajú a nikde nekončia (obr. 15.2). Takže počet čiar vstupujúcich

²WILHELM EDUARD WEBER (1804–1891) bol nemecký profesor fyziky na Univerzite v Göttingene, súčasník a spolupracovník K. F. Gaussa.

do objemu ohraničeného plochou S je rovný počtu čiar z objemu vystupujúcich, teda magnetický indukčný tok cez uzavretú plochu je nulový

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0. \quad (16.2)$$

Táto rovnica sa nazýva **Gaussov zákon magnetického poľa** a je jednou zo základných Maxwellových rovníc popisujúcich elektromagnetické pole.

16.2 Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie

Z predošlých experimentov je zrejmé, že elektromotorické napätie sa v cievke indukuje iba pri časovej zmene magnetického poľa, ktoré prechádza cievkou. Z týchto faktov vyplývajú nasledujúce informácie. Ak máme cievku s plochou S v časovo nepremennom magnetickom poli s indukciou \vec{B} , tak bude ňou prechádzať magnetický indukčný tok Φ , ktorý sa dá vypočítať pomocou vzťahu (16.1). Elektromotorické napätie sa však indukuje iba pri časovej zmene magnetického poľa, ktoré prechádza cievkou. Teda veľkosť **elektromotorického napätia sa vypočíta ako záporná časová derivácia magnetického indukčného toku prechádzajúceho cievkou**

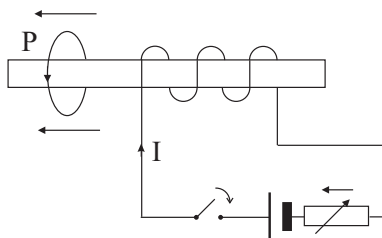
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi(t)}{dt}. \quad (16.3)$$

Zmena magnetického toku v čase môže nastať z rôznych dôvodov, a to vplyvom: a) veľkosti magnetickej indukcie $|\vec{B}|$, b) uhla medzi vektorom \vec{B} a vektorom plošného elementu $d\vec{S}$ a c) veľkosti plochy závitú.

16.3 Lenzov zákon

Z vysvetľovania elektromagnetickej indukcie vieme, že pri zväčšovaní magnetického indukčného toku plochou cievky vzniká v nej indukovaný prúd opačného smeru ako pri znižovaní indukčného toku. Na zistenie smeru indukovaného prúdu vplyvom zmeny indukčného toku si zostavme nasledujúci experiment. Cievku pripojíme k zdroju napätia cez reostat a vypínač (obr. 16.2). Do cievky vložíme dlhé jadro z mäkkej ocele na zväčšenie magnetického indukčného toku plochou prstenca P . Prstenec nech je zavesený na dvoch vláknach tak, aby sa nedotýkal jadra cievky. Keď cievkou prechádza konštantný prúd, je magnetický indukčný tok plochou prstenca konštantný. V prípade zmeny prúdu

v cievke sa mení aj jej magnetické pole, čím nastáva zmena indukčného toku v prstenci.



Obrázok 16.2: K vysvetleniu Lenzovho zákona.

Pri pokuse budeme pozorovať, že pri zväčšovaní prúdu (pri zopnutí) v cievke sa prstenc od cievky odpudzuje. V prípade poklesu prúdu sa zase prstenc k cievke priťahuje (obr. 16.2). Z kap. 15.5 (Sila medzi dvomi rovnobežnými vodičmi) vieme, že vodiče s prúdmi súhlasných smerov sa priťahujú, vodiče s prúdmi nesúhlasných smerov sa odpudzujú. Z toho vyplýva, že pri zväčšovaní prúdu v cievke sa v odpudzovanom prstenci indukuje prúd, ktorý má nesúhlasný smer a naopak, pri poklese prúdu v cievke sa v priťahovanom prstenci indukuje prúd, ktorý má súhlasný smer s prúdom v cievke.

Indukovaný prúd v prstenci má vždy taký smer, že svojím magnetickým poľom zmenšuje vnútri prstencu zmenu magnetického poľa cievky a tým aj zmenu indukčného toku plochou prstencu. Hovoríme, že indukovaný prúd pôsobí svojím magnetickým poľom proti zmene magnetického poľa, ktorá ho vyvolala. Tento všeobecne platný záver formuloval v roku 1834 E. Ch. Lenz³ a volá sa **Lenzov zákon: Smer indukovaného elektrického prúdu je taký, že magnetické pole indukovaného elektrického prúdu svojimi účinkami pôsobí proti zmene, ktorá ho vyvolala.** Tento zákon je dôsledkom základného prírodného zákona – zákona zachovania energie. Ak by tomu tak nebolo, tak po iniciovaní elektromagnetickej indukcie by proces samovoľne a neohraničene narastal.

Lenzov zákon platí nielen pre tenké vodiče, ale aj pre prúdy indukované vo veľkých (plných) vodičoch v tvare plechu, platní atď. Voláme ich aj **Foucaultove⁴ prúdy** alebo **vírivé prúdy**. Pri pohybe vodiča v magnetickom poli

³EMILIJ CHRISTANOVIČ LENZ (1804 – 1865), ruský fyzik nemeckého pôvodu.

⁴LEON JEAN BERNARD FOUCAULT (1819 – 1868) francúzsky fyzik, ktorý medzi inými dokázal svojím Foucaultovým kyvadlom, že Zem sa otáča.

vznikajú v ňom vírivé prúdy, ktoré pôsobia svojími silovými účinkami proti tomuto pohybu, t. j. brzdia pohyb vodiča v magnetickom poli. Vírivé prúdy vznikajú tiež ak sa vodič nachádza v premenlivom magnetickom poli (napr. pri prechode striedavého prúdu vodičom). Majú však aj nežiaduce tepelné účinky.

16.4 Vlastná a vzájomná indukcia

Uzavretý závit, cievka alebo obvod, ktorými preteká konštantný elektrický prúd I je zdrojom stacionárneho magnetického poľa. Ak si vyberieme nejakú plochu v blízkosti tohto obvodu, bude ním pretekať konštantný magnetický indukčný tok. V prípade časovej zmeny elektrického prúdu $I(t)$ sa mení i magnetické pole generované daným obvodom (obr. 16.1(b)), a tým aj magnetický indukčný tok $\Phi(t)$. Táto zmena indukčného toku vedie podľa Faradayovho zákona elektromagnetickej indukcie k vzniku elektromotorického napätia (16.3). Takýto jav voláme **samoindukcia**, alebo **vlastná indukcia**.

Ak závitom preteká elektrický prúd potom magnetický tok pretekaný daným závitom, cievkou, alebo uzatvoreným vodičom iného tvaru sa dá vyjadriť ako

$$\Phi = LI, \quad (16.4)$$

kde konštanta úmernosti L sa volá **vlastná indukčnosť - indukčnosť cievky** a závisí od permeability prostredia vnútri cievky, počtu závitov a ich geometrického tvaru. Jednotka indukčnosti sa volá **henry**⁵ ($H = Vs/A = Wb/A$). Indukčnosť L je popri odpore R a kapacite C ďalším základným parametrom vodičov.

Uvažujme solenoid polomeru R a dĺžky $l \gg R$, ktorý má N závitov (obr. 15.7). Ak zanedbáme okrajové efekty, môžeme magnetické pole vnútri solenoidu považovať za homogénne s magnetickou indukciou B podľa vzťahu (15.16). Celkový magnetický indukčný tok solenoidu je súčtom tokov cez všetky závit, čiže $\Phi = NBS$, kde $S = \pi R^2$. Z definičného vzťahu vlastnej indukčnosti dostaneme

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 N^2 \pi R^2}{l}. \quad (16.5)$$

Pomocou indukčnosti (16.4) a Faradayovho zákona (16.3) sa dá **indukované elektromotorické napätie v cievke** vyjadriť ako

$$\varepsilon_i = -L \frac{dI(t)}{dt}. \quad (16.6)$$

⁵JOSEPH HENRI HENRY (1797–1875), po ktorom je pomenovaná jednotka indukčnosti.

Zo vzťahu je vidieť, že veľkosť prúdu na indukované elektromotorické napätie nemá vplyv, na rozdiel od veľkosti jeho časovej zmeny.

Uvažujme teraz dva uzavreté obvody s prúdmi I_1 a I_2 . Plochou každého obvodu preteká okrem indukčného toku magnetického poľa vlastného obvodu i magnetický indukčný tok súvisiaci s tým, že tento obvod sa nachádza i v magnetickom poli druhého obvodu. Zmena prúdu v jednom vyvolá zmenu magnetického indukčného toku v oboch obvodoch. Tomuto javu hovoríme **vzájomná indukcia**. Teda, ak je obvod 2 umiestnený v magnetickom poli obvodu 1, bude ním prechádzať dodatočný magnetický indukčný tok Φ_{21} , daný vzťahom

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1, \quad (16.7)$$

kde M_{21} je konštanta úmernosti. Analogicky to platí i opačne pre dodatočný magnetický indukčný tok Φ_{12} od obvodu 2 s prúdom I_2 . Experimentálne i teoreticky sa dá ukázať, že $M_{21} = M_{12} = M$. M sa volá **koeficient vzájomnej indukčnosti** dvoch obvodov. Zmena prúdu I_1 teda indukuje napätie ε_{i2} v obvode 2, ktoré sa dá vypočítať podľa vzťahu

$$\varepsilon_{i2} = -M \frac{dI_1}{dt}. \quad (16.8)$$

Pre elektromotorické napätie ε_{i1} v obvode 1 od prúdu I_2 platí analogický vzťah.

16.5 Energia magnetického poľa

Tak ako v elektrickom poli v prípade kondenzátora (12.34) je uložená elektrická energia, tak aj v magnetickom poli sa nachádza uložená energia. Vypočítajme si teda, aká magnetická energia je uložená v cievke, pričom získaný výsledok potom zovšeobecníme na magnetické pole.

Majme elektrický RL obvod, ktorý sa skladá zo zdroja napätia U , cievky s vlastnou indukčnosťou L , odporu R a vypínača. Podľa II. Kirchhoffovho zákona pre daný RL obvod platí:

$$U = RI + L \frac{dI}{dt}. \quad (16.9)$$

Ak rovnicu (16.9) vynásobíme prúdom I , dostaneme:

$$UI = RI^2 + LI \frac{dI}{dt}, \quad (16.10)$$

pričom UI je celkový výkon zdroja dodávaný do obvodu. Práca, ktorú zdroj dodal do obvodu počas doby t prechodového deja, je

$$W = \int_0^t UI dt = \int_0^t RI^2 dt + \int_0^t LI \frac{dI}{dt} dt. \quad (16.11)$$

Prvý člen na pravej strane predstavuje Joulovo teplo (14.22). Druhý člen predstavuje výkon potrebný na vytváranie magnetického poľa v cievke. Na vytvorenie konečného magnetického poľa v cievke, t. j. poľa, ktoré zodpovedá ustálenému elektrickému prúdu I , bolo potrebné vynaložiť prácu

$$W_m = \int_0^I LI dI = \frac{1}{2}LI^2. \quad (16.12)$$

Táto práca sa podľa zákona zachovania energie rovná energii obsiahnutej v magnetickom poli solenoidu.

Majme solenoid, ktorý má dĺžku l , počet závitov N , plocha jedného závitú je S a tečie ním elektrický prúd I . Ak uvažime vzťah (16.5) pre vlastnú indukciu solenoidu, potom energia magnetického poľa solenoidu bude

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 S}{l} I^2. \quad (16.13)$$

Teraz si vyjadríme energiu magnetického poľa solenoidu pomocou vektorov magnetického poľa \vec{B} a \vec{H} . Ak si prúd I v predošlom vzťahu vyjadríme zo vzťahu (15.16, magnetické pole cievky) ako $I = Bl/\mu_0 N$, dostaneme

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Sl. \quad (16.14)$$

kde Sl je objem cievky. Tento vzťah je špeciálnym prípadom vyjadrenia energie magnetického poľa uloženého v cievke. No pomocou vyjadrenia: $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$ môžeme, podobne ako v prípade elektrostatického poľa (13.14) definovať **hustotu energie magnetického poľa** vzťahom $w_m = W_m/Sl$ a dostaneme

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H}. \quad (16.15)$$

