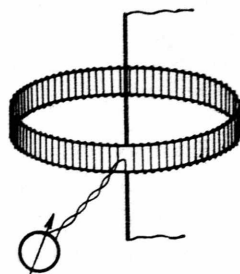


rovnobežné s indukčnými čiarami magnetického poľa v nich sa vytvárajúceho. Z podobných príčin sa zo železných plechov zhotovujú statory a rotory niektorých elektrických motorov, generátorov a dynám.

Príklad 1. Vysvetlíme funkciu tzv. *Rogowského pásika* slúžiaceho na meranie magnetomotorickej sily $F = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}$, pôsobiacej pozdĺž uzavretej čiary. Rogowského pásik v najjednoduchšom zhotovení je vodivá špirála rovnomerne navinutá na ohybný remeň alebo akékoľvek nevodivé hrubšie lanko. Predstavme si ho napríklad v polohe znázornenej na obr. 6.5, teda v polohe, pri ktorej obopína náhodným spôsobom vodič s prúdom I . Môže byť pochopiteľne spriahnutý aj s väčším počtom závitov akéhokoľvek vodiča prúdu.

Nech je N celkový počet závitov Rogowského pásika a l jeho dĺžka. Na dĺžku ds pripadajúci počet závitov je potom $\frac{N}{l} ds = n ds$. Prechádza nimi magnetický



Obr. 6.5.

indukčný tok $d\Phi = (\mathbf{B} \cdot \mathbf{S}) n ds = (\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}) nS = (\mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}) \mu nS$, ak S značí plošný obsah prierezu pásika. Všetkými závitmi pásika prechádza teda magnetický indukčný tok $\Phi = \mu nS \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}$.

Prerušíme prúd, s ktorým je Rogowského pásik spriahnutý, a pripojíme vývody pásika k svorkám balistického galvanometra (čl. 6.5). Keď potom prúd opäť zapojíme, v závitoch Rogowského pásika vznikne indukovaná ems. o abs. hodnote $e_i = d\Phi/dt$. Jej pôsobením vznikne v pásiku a vo vinutí balistického galvanometra prúd $I = e_i/(R_p + R_g) = d\Phi/R dt$. Podľa tohoto vzťahu vinutím balistického galvanometra prejde teda elektrický náboj

$$Q = \int I dt = \frac{1}{R} \int d\Phi = \frac{\Phi}{R} = \frac{\mu nS}{R} \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s}$$

takže

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = Q \frac{R}{\mu nS} \quad (4)$$

Náboj Q je úmerný výchylke balistického galvanometra.

6.2. Koefficienty vlastnej a vzájomnej indukcie. Keď sa prúd I vo vodiči s časom mení, mení sa vo všeobecnosti aj magnetický indukčný tok Φ , idúci cez plochu vodičom ohraničenú. Preto pri každej zmene prúdu vo vodiči vzniká v ňom indukovaná ems $e_i = -\frac{d\Phi}{dt}$. Jav sa nazýva *samoindukciou*.

Keď sa osamotený vodič elektrického prúdu nachodí vo vákuu alebo v okolí

vodiča je síce magnetizovateľné hmotné prostredie, avšak prúd vo vodiči nenadobúda príliš veľké hodnoty (najmä ak v okolí vodiča sú telesá z tvrdých feromagnetických látok), vektor magnetickej indukcie v každom bode okolia vodiča, a preto aj magnetický indukčný tok idúci cez plochu vodičom ohraničenú je úmerný prúdu I vo vodiči. Konštanta úmernosti vo vzťahu

$$\Phi = LI \quad (1)$$

volá sa *koefficient samoindukcie* alebo stručnejšie len *samoindukčnosť vodiča*.

Podľa vzorca (1) vzorec pre ems vznikajúcu samoindukciou môžeme písať v tvare

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

Môže sa stať, že prúdy vo vodičoch, ktoré sa nachádzajú v blízkosti magnetizovateľných telies, nadobúdajú aj veľké hodnoty, prípadne v okolí vodičov sa nachádzajú tvrdé feromagnetické látky. V týchto prípadoch ani indukčný tok Φ nie je úmerný prúdu I , ani ems vznikajúca vo vodiči samoindukciou nie je úmerná časovej zmene prúdu $\frac{dI}{dt}$. Platnosť vzorcov (1) a (2) môžeme

však napriek tomu aj v týchto prípadoch zachovať, keď budeme tieto vzorce považovať za od seba nezávislé definície vo všeobecnosti nekonštantných samoindukčností vodiča, vzorec (1) za definíciu tzv. *statickej samoindukčnosti*, vzorec (2) za definíciu *dynamickej samoindukčnosti*.

Keď sa v blízkosti jedného v sebe uzavretého vodiča nachodí podobný vodič druhý, magnetický indukčný tok Φ_{12} , ktorý v dôsledku jestvovania prúdu I_1 vo vodiči prvom prechádza cez plochu ohraničenú druhým vodičom, pri rovnakých podmienkach ako v diskutovanom už prípade jedného vodiča je úmerný tomuto prúdu. Konštanta úmernosti L_{12} vo vzťahu

$$\Phi_{12} = L_{12}I_1 \quad (3)$$

nazýva sa *koefficientom vzájomnej indukcie* alebo stručnejšie len *vzájomnou indukčnosťou* medzi vodičom prvým a druhým. V dôsledku závislosti magnetickeho indukčného toku Φ_{12} od prúdu I_1 pri zmenách tohto prúdu indukuje sa vo vodiči druhom ems

$$e_{12} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_1}{dt} \quad (4)$$

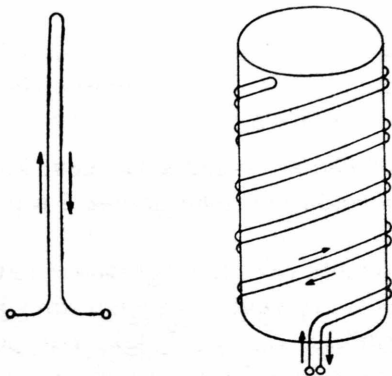
Podobne pri zmenách prúdu I_2 vo vodiči druhom indukuje sa vo vodiči prvom ems

$$e_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_2}{dt} \quad (5)$$

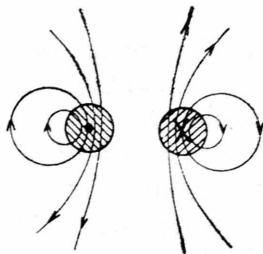
Jav sa nazýva *vzájomnou indukciou*.

Spoločná základná jednotka samoindukčnosti a vzájomnej indukčnosti v sústave SI volá sa *henry*. Podľa vzorca (2) je to napríklad samoindukčnosť v sebe uzavretého vodiča (napríklad solenoidu), v ktorom pri zmene prúdu o 1 ampér za 1 s vzniká samoindukciou ems 1 volt.

Samoindukčnosť vodiča nerovná sa nikdy nule, lebo prúd budí vo svojom okolí vždy magnetické pole. Okrem toho je vždy $L > 0$, lebo prúd v orientovanom okruhu a magnetický indukčný tok počítaný s ohľadom na orientáciu okruhu podľa pravidla pravotočivej skruty majú vždy rovnaké znamienka. Koeficient vzájomnej indukcie dvoch vodičov L_{12} môže byť však kladný aj záporný, lebo orientácie dvoch v sebe uzavretých vodičov sú od seba nezávislé. Je zrejmé, že tento koeficient bude kladný vtedy, keď kladný prúd v prvom vodiči vyvoláva kladný magnetický indukčný tok (počítaný podľa orientácie druhého vodiča) cez plochu druhého vodiča. Inými slovami: koeficient vzájomnej indukcie dvoch v sebe uzavretých vodičov elektrického prúdu je kladný, keď magnetické polia budené kladnými prúdmi v oboch vodičoch sa vzájomne podporujú.



Obr. 6.6.



Obr. 6.7.

Keď je potrebné, snažíme sa zmenšiť koeficient samoindukcie okruhu, nemôžeme však zhotoviť okruh bez akejkoľvek samoindukčnosti. Neobyčajne sa zmenší samoindukčnosť okruhu, keď k sebe priblížime tie jeho úseky, v ktorých tečie prúd v opačných smeroch. Tak sa zhotovujú tzv. *neinduktívne odpory*, potrebné pre rôzne prístroje a zariadenia. Postupuje sa tak, že sa izolovaný drôt preloží (obr. 6.6), čiže sa z neho zhotoví tzv. *bifilárne vedenie*, a ak je dosť dlhý, natočí sa na cievku. Avšak aj cievka s bifilárnym vinutím sa vyznačuje síce malou, predsa však merateľnou samoindukčnosťou, pretože vždy ostáva samoindukčný magnetický tok, idúci čiastočne aj cez vodivé vnútro izolovaného drôtu (obr. 6.7).

Keď sa naopak žiada, aby samoindukčnosť okruhu bola čo najväčšia, skrúcuje sa drôt do tvaru, pri ktorom magnetické indukčné toky budené jednotlivými úsekmi drôtu sa navzájom podporujú. Tak sa zhotovujú tzv. *indukčné cievky*, nazývané niekedy aj *tlmivkami*. Z definície koeficientu samoindukcie je bezprostredne zrejmé, že samoindukčnosť cievky sa podstatne zväčší, keď do nej vložíme jadro z feromagnetikkej látky. Rovnakým spôsobom možno zväčšiť aj koeficient vzájomnej indukcie dvoch okruhov, čo sa používa pri zhotovovaní transformátorov so železným jadrom.

Príklad 1. Vypočítame koeficient samoindukcie cievky, ktorá vznikla rovnomerným navinutím vrstvy izolovaného drôtu na toroid s pomerne malým prierezom.

Nech je polomer stredovej kružnice toroidu r , jeho prierez S , permeabilita materiálu μ a počet závitov vinutia N . Z rovnice $H \cdot 2\pi r = NI$ vyplýva, že v uvažovanom prípade intenzita magnetického poľa, ktorá je vo vnútri toroidu prakticky všade rovnaká, je

$$H = \frac{NI}{2\pi r}$$

Celkový cez všetky závitky toroidu idúci magnetický indukčný tok je preto

$$\Phi = SNB = SN\mu H = \frac{\mu SN^2}{2\pi r} I$$

takže hľadaný koeficient samoindukcie je

$$L = \frac{\mu SN^2}{2\pi r}$$

Príklad 2. Vypočítame samoindukčnosť dlhého solenoidu s vložkou, ktorej magnetická permeabilita je μ , keď dĺžka solenoidu je l , jeho prierez S a počet všetkých závitov N .

Podľa výsledkov príkladu 4 v čl. 4.4 abs. hodnota vektora magnetickej indukcie vo vnútri dostatočne dlhého solenoidu, keď ani vo vnútri solenoidu, ani v jeho okolí nie sú magnetizovateľné telesá, je približne $B = \mu_0 n I$, kde n je počet závitov pripadajúcich na jednotku dĺžky solenoidu a I prúd v nich. V našom prípade je preto $B = \mu n I$, $\Phi = SNB = \mu \frac{SN^2}{l} I$, takže samoindukčnosť solenoidu je

$$L = \mu \frac{SN^2}{l} = \mu \frac{\pi r^2 N^2}{l} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{4\pi^2 r^2 N^2}{l} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{D^2}{l}$$

kde D značí celkovú dĺžku navinutého drôtu.

V čl. 2.4 sme sa zaoberali formuláciou Kirchhoffových zákonov pre prípady, že v okruhoch siete elektrického prúdu ako zdroje prúdu sa nachádzajú len kondenzátory, galvanické články a termočlánky. Teraz však už vieme, že zdrojmi elektrického prúdu v sieti môžu byť aj indukčné cievky. Je bezprostredne zrejmé, že vloženie indukčnej cievky do okruhu siete nemá vplyv na obsah 1. Kirchhoffovho zákona. Za účelom príslušného zovšeobecnenia 2. Kirchhoffovho zákona majme na mysli najprv bezodporovú indukčnú cievku s konštantnou indukčnosťou L , na ktorej pomocou vonkajšieho zdroja prúdu udržiavame s časom sa meniace napätie u . Vektor intenzity elektrického

poľa $\mathbf{E}$ v závitoch cievky je súčtom intenzity poľa $\mathbf{E}_s$, budeného nábojmi na povrchu závitov, a intenzity indukovanej $\mathbf{E}_i$, takže $\mathbf{E} = \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_i$. Keďže podľa predpokladu ohmický odpor cievky je nulový, aj celková intenzita poľa $\mathbf{E}$ sa rovná nule, lebo ináč — podľa Ohmovho zákona $i = \kappa \mathbf{E}$ — prúd v závitoch cievky by bol nekonečne veľký. Z rovnice $\mathbf{E}_s + \mathbf{E}_i = 0$ integráciou pozdĺž vinutia cievky vyplýva

$$\int \mathbf{E}_s \cdot d\mathbf{s} + \int \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{s} = 0$$

alebo

$$u = \int \mathbf{E}_s \cdot d\mathbf{s} = - \int \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{s} = -e_i$$

Ak však indukčná cievka má nenulový ohmický odpor R_L , napätie u musí byť o súčin IR_L väčšie, takže vo všeobecnosti je

$$u_L = -e_i + IR_L = L \frac{dI}{dt} + IR_L \quad (6)$$

Majme teraz na mysli okruh, ktorému je vnútené napätie e a v ktorom sú za sebou ohmický úsek s odporom R_0 , kondenzátor s kapacitou C a indukčná cievka s indukčnosťou L a odporom R_L . Je potom splnená rovnica

$$e = IR_0 + u_C + u_L = IR_0 - e_c - e_L + IR_L = IR - e_c - e_L$$

alebo

$$I = \frac{e + e_c + e_L}{R} \quad (7)$$

pričom R je celkový ohmický odpor okruhu a e_L značí v indukčnej cievke elektromagnetickou indukciou vznikajúcu elektromotorickú silu, ktorú sme značili najprv e_i .

6.3. Energia sústavy lineárnych vodičov s ustálenými elektrickými prúdmi. Podobne ako sústava od seba izolovaných vodičov s nábojmi (pozri čl. 1.3), aj sústava v sebe uzavretých lineárnych vodičov (okruhov) s elektrickými prúdmi obsahuje určité množstvo energie, lebo pri zanikani prúdov v jednotlivých okruhoch v dôsledku ich indukčnosti vznikajú v nich indukované elektromotorické sily, ktoré sa snažia prúdy v okruhoch udržať, takže tieto môžu byť použité na konanie napríklad aj mechanickej práce. Podľa zákona o zachovaní energie táto energia — budeme ju označovať U_m , lebo je spojená s jestvovaním magnetického poľa v okolí vodičov elektrického prúdu — rovná sa práci vykonanej vonkajšími zdrojmi ems pri vzniku prúdov v sústave okruhov, zmenšenej o prípadné súčasne vzniknuté množstvá iných foriem energie.

Majme na mysli n okruhov elektrického prúdu, z ktorých každý môže byť pripojený ku svorkám vždy jedného zdroja ems. V tomto článku pre lepši