

kolkých tzv. *izotopov*, t. j. látok s totožnými chemickými vlastnosťami (a preto patriacich na to isté miesto v periodickej sústave prvkov), avšak s nerovnakými hmotnosťami svojich atómov.

Metódu porovnávania hmôt iónov podľa ich úchyliet v elektrickom a magnetickom poli zdokonalil Aston. Astonovo zariadenie je schematicky znázornené na *obr. 5.30*. Ióny urýchlené elektrickým poľom prechádzajú v Astonovom zariadení najprv cez homogénne elektrické pole a až potom cez homogénne magnetické pole, pričom druhé pole vychýľuje ióny v smere práve opačnom než prvé. Touto úpravou sa docieľuje, že ióny s rovnakým merným nábojom aj pri nerovnej začiatočnej rýchlosti dopadajú na to isté miesto vhodne umiestnenej fotografickej dosky. Pretože vzhľad fotografického záznamu vytváraného Astonovým zariadením pripomína čiarové spektrum vytvorené optickým spektrografom, zachytené na fotografickú dosku, Aston nazval svoje zariadenie *hmotovým spektrografom*.

6. ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCIA

6.1. Indukovaná elektromotorická sila. Ako už vieme, na bodový náboj q , ktorý sa v magnetickom poli (alebo vzhľadom na magnetické pole) s indukciou \mathbf{B} pohybuje rýchlosťou v , účinkuje sila $\mathbf{f} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$.

Prizerajúc na tento vzorec, predstavme si tuhé teleso (súradnicový systém), ktoré sa vzhľadom na dané s časom sa nemeniace magnetické pole nejakým spôsobom pohybuje. Vzhľadom na toto teleso nech je bodový elektrický náboj q v relatívnom pokoji. Pretože náboj q sa vzhľadom na magnetické pole pohybuje v tom prípade určitou rýchlosťou \mathbf{v} , podlieha sile $\mathbf{f} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$. Táto sila po prepočítaní na jednotku náboja je

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

Podľa tohto výsledku, ktorý pre teóriu elektrických a magnetických polí má základný význam, priestor tuhého telesa, ktoré sa pohybuje v magnetickom poli (alebo vzhľadom na magnetické pole), vo všeobecnosti je nielen silovým poľom magnetickým, ale aj elektrickým, lebo v ňom účinkuje sila aj na elektrický náboj, ktorý sa v tomto priestore nepohybuje.

Vektor \mathbf{E}_i , intenzita takto vznikajúceho elektrického poľa, nazýva sa *intenzita indukovaného elektrického poľa*.

Dráhový integrál intenzity indukovaného elektrického poľa pozdĺž v sebe uzavretej dráhy, napríklad pozdĺž v sebe uzavretého vodiča elektrického prúdu

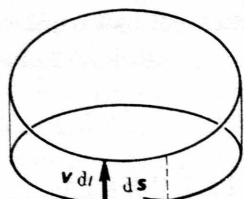
$$\text{ems}_i = \oint \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{s} \quad (2)$$

nazýva sa v tomto okruhu *indukovanou elektromotorickou silou*.

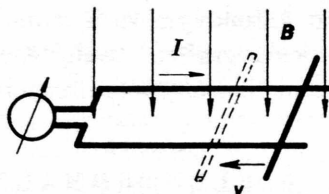
Za účelom ďalšej úpravy tohto vzorca majme na mysli v sebe uzavretý vodič elektrického prúdu, ktorý sa nejakým spôsobom pohybuje v čase sa nemeniacom magnetickom poli, pričom sa prípadne aj deformuje. Podľa vzorcov (1) a (2) elektromotorická sila indukovaná v takomto vodiči jeho pohybom je

$$\text{ems}_t = \oint \mathbf{E}_t \cdot d\mathbf{s} = \oint (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{s} = \oint (d\mathbf{s} \times \mathbf{v}) \cdot \mathbf{B} = \frac{1}{dt} \oint (d\mathbf{s} \times \mathbf{v} dt) \cdot \mathbf{B}$$

Podľa obr. 6.1 výraz $\oint (d\mathbf{s} \times \mathbf{v} dt) \cdot \mathbf{B}$ má význam magnetického indukčného toku vychádzajúceho z plochy vytvorenej pohybujúcim sa uzavretým vodičom za čas dt . Nech je Φ magnetický indukčný tok v čase t , prechádzajúci plochou



Obr. 6.1.



Obr. 6.2.

ohraničenou pohybujúcim sa vodičom, počítaný na tú stranu plochy, z ktorej strany sa obiehajú vodiča pri počítaní indukovanej elektromotorickej sily javí v zmysle proti pohybu hodinových ručičiek, $\Phi + d\Phi$ tento tok v čase $t + dt$. Keďže je všeobecne $\text{div } \mathbf{B} = 0$, je správna rovnica

$$-\Phi + \oint (d\mathbf{s} \times \mathbf{v} dt) \cdot \mathbf{B} + \Phi + d\Phi = 0$$

alebo

$$\oint (d\mathbf{s} \times \mathbf{v} dt) \cdot \mathbf{B} = -d\Phi$$

teda

$$\text{ems}_t = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Pri pohybe v sebe uzavretého vodiča v magnetickom poli (tiež pri pohybe zdroja magnetického poľa, napríklad permanentného magnetu vzhľadom na vodič) indukuje sa v ňom elektromotorická sila (budeme ju označovať už jednoducho e_t)

$$e_t = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

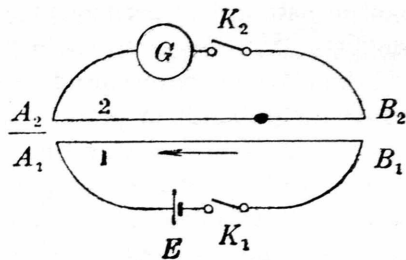
Vzorec (3) vyjadruje *Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie*. Pri jeho používaní, v súhlase s jeho odvodením, magnetický indukčný tok treba počítat na tú stranu plochy vodičom ohraničenej, z ktorej sa obiehajú vodiča pri počítaní indukovanej elektromotorickej sily e_t javí v zmysle proti pohybu hodinových ručičiek.

Základná jednotka magnetického indukčného toku v sústave SI nazýva sa weber.

Pri pohybe v sebe uzavretého vodiča v magnetickom poli vo vodiči vznikajúca indukovaná elektromotorická sila vyvoláva v ňom tzv. *indukovaný elektrický prúd*. Smer tohto prúdu v jednoduchých prípadoch, napríklad keď len časť okruhu sa pohybuje v poli magnetickom (obr. 6.2), určuje tzv. *druhé pravidlo pravej ruky*, ktoré je kvalitatívnym vyjadrením obsahu vzorca (1): *Keď pravú ruku položíme na vodič, ktorý sa pohybuje v magnetickom poli tak, aby magnetické indukčné čiary vstupovali do dlane a palec udával smer pohybu vodiča, prsty vyjadrujú smer indukovaného prúdu vznikajúceho vo vodiči.*

Z rôznych pokusov, ktoré zväčša vykonal už Faraday, vyplýva že vzorec (3) správne vyjadruje elektromotorickú silu vznikajúcu nielen pri relatívnom pohybe vodiča a s časom sa nemeniaceho magnetického poľa, ale aj vo všetkých iných prípadoch, keď sa z akejkoľvek príčiny mení magnetický indukčný tok idúci cez plochu vodičom ohraničenú. Jav sa nazýva úplne všeobecne *elektromagnetickou indukciou* a vzorec (3) *Faradayovým zákonom elektromagnetickej indukcie*.

Najvýznamnejšie Faradayove pokusy (1831) možno vykonať pomocou zariadenia znázorneného na obr. 6.3, v ktorom vzájomne rovnobežné vodiivé spojenia A_1B_1 a A_2B_2 je výhodné nahradiť napríklad dvoma valcovitými

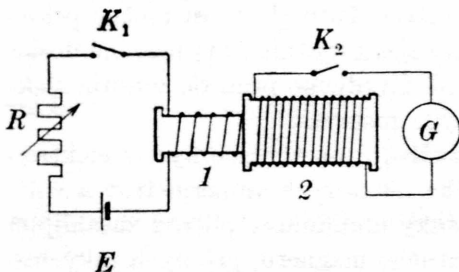


Obr. 6.3.

cievkami na spoločnej osi, ako je to znázornené na obr. 6.4. V prvom, tzv. *primárnom okruhu* okrem *primárneho vinutia 1* je zdroj ems E a kľúč K_1 , v druhom, *sekundárnom okruhu*, okrem *sekundárneho vinutia 2* je citlivý galvanometer G a kľúč K_2 .

Keď primárny okruh pomocou kľúča K_1 je trvale uzavretý, takže je v ňom dosť silný prúd I_1 , ktorý sa s časom už nemení, galvanometer G napriek tomu neindukuje nijaký prúd v sekundárnom okruhu po jeho uzavretí pomocou kľúča K_2 .

Keď však naopak sekundárny okruh je trvale uzavretý, vzniká v ňom krátkodobý prúdový náraz po každom uzavretí a otvorení primárneho okruhu



Obr. 6.4.

pomocou kľúča K_1 : po uzavretí primárneho okruhu vzniká v sekundárnom okruhu prúd I_2 , ktorý vzhľadom na prúd I_1 v primárnom okruhu má opačný smer; po prerušení primárneho okruhu vzniká v sekundárnom okruhu prúd I_2 s prúdom I_1 v primárnom okruhu súhlasného smeru. Podobný účinok ako zatváranie a prerušovanie primárneho okruhu má na sekundárny okruh aj zväčšovanie a zmenšovanie prúdu v primárnom okruhu pomocou reostatu R (obr. 6.4) alebo približovanie a vzdalovanie primárnej cievky od sekundárnej, pričom primárnu cievku s prúdom, keďže v okolí permanentného magnetu tyčového tvaru je podobné magnetické pole ako v okolí solenoidu s prúdom, možno nahradiť aj permanentným magnetom. Tieto poznatky možno zhrnúť do vety: Pri zapojení, zosilnení alebo priblížení primárneho prúdu vzniká v sekundárnom vinutí prúd opačného smeru; pri prerušení, zoslabení alebo vzdialení primárneho prúdu vzniká v sekundárnom vinutí prúd súhlasného smeru s prúdom v primárnom vinutí.

Kvalitatívny obsah všetkých týchto poznatkov o prúdoch vznikajúcich elektromagnetickou indukciou vyjadruje *Lenzovo pravidlo* (1834): *Indukovaný prúd má vždy taký smer, že pôsobí proti zmene, ktorou bol vyvolaný*. Napríklad približovanie primárneho prúdu (alebo magnetu) vyvoláva v sekundárnom okruhu prúd opačného smeru, ktorý odpudzuje primárny prúd (magnet) a teda sa snaží znemožniť jeho približovanie. Alebo pri zosilňovaní magnetického poľa v sekundárnej cievke vzniká v nej prúd, ktorý budí v okolí magnetické pole opačného smeru, čo je na prekážku zosilňovania magnetického poľa pomocou vonkajších zdrojov.

Indukované prúdy vznikajú tiež v masívnych vodičoch, keď sa v nich akýmkoľvek spôsobom mení magnetické pole. Nazývajú sa *Foucaultovými* alebo aj *virivými prúdmi*. Podľa Lenzovho pravidla Foucaultove prúdy sú tiež vždy také, že pôsobia proti zmene, ktorá ich vyvolala. Túto vlastnosť možno pekne demonštrovať pomocou kyvadla, ktorého závažie tvorí masívna medená doska kývajúca medzi pólmi elektromagnetu. Keď zavedieme prúd do vinutia elektromagnetu, kývanie kyvadla sa veľmi rýchle zastaví.

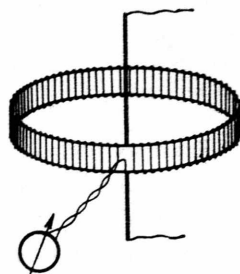
Virivé prúdy sa rozličným spôsobom používajú na tlmenie kyvov elektrických meracích prístrojov. Napríklad ručička niektorých ampérmetrov a voltmetrov na svojom opačnom konci nesie tenký alumíniový pliešok zasahujúci do medzery medzi pólmi malého permanentného magnetu, pri iných takýchto prístrojoch je merná cievočka navinutá na vhodne dimenzovanom hliníkovom rámečku. Takto možno dosiahnuť, aby chod pohyblivej časti prístroja bol práve aperiodický.

Virivé prúdy vznikajú aj v železných jadrách transformátorov. Preto sa tieto jadrá zhotovujú z tenkých, navzájom elektricky izolovaných železných plechov tak, aby ich roviny pretínali smer indukovaných prúdov a boli súčasne

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