

25 E & M polje

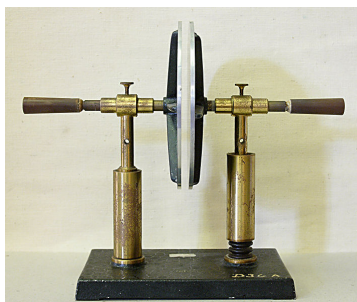
Električno polje – Jakost polja in naboji – Influenčne meritve polja – Magnetno polje – Indukcija napetosti – Indukcijske meritve polja – Jakost polja in tokovi – Električni generator – Izmenični tok – Energija polj – Nihajni krog

25.1 Električno polje

Viri električnega toka – baterije – ter merilniki za naboj, tok in napetost – tuljavni ampermetri in voltmetri – omogočajo kvantitativne raziskave električnih in magnetnih pojavov, zlasti električnih in magnetnih sil, ki smo jih kvalitativno že spoznali.

Električno polje

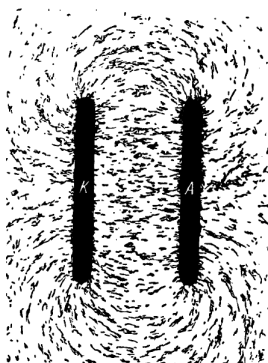
Dober pripomoček za preučevanje naelektrenja sta dve kovinski krožni plošči s ploščino po S na razmaku l , ki je mnogo manjši od njunega premera. To je *ploščati kondenzator*. Namestimo ga tako, da sta plošči navpični, in mednju obesimo slamnato iglo. Ta mirno obvisi. Nato z dotikom mnogočlenske baterije z znano napetostjo U naelektrimo plošči kondenzatorja z nasprotno enakima, a še neznanimi nabojema e in $-e$. Zaradi influence nabojev na igli se ta usmeri proti obema ploščama. Prostor med ploščama nabitega kondenzatorja se je očitno spremenil: v njem so začele delovati električne sile. Rečemo, da je nastalo *električno polje*. Električno polje, to je prostor, v katerem delujejo električne sile.



Slika 25.1 Ploščati kondenzator za demonstracijske poskuse. (School Historical Museum, Bremerhaven)

Električne silnice

Za boljšo predstavo o električnem polju nadomestimo slamnato iglo z iglicami mavca, ki jih raztrosimo po vodoravni kartonski plošči skozi kondenzator. Iglice se zaradi influence nabojev uredijo v črte. Rečemo, da so to *električne silnice*. Konci silnic so pravokotni na plošči. Povsod v kondenzatorju so silnice ravne in enakomerno goste; rečemo, da je tam polje *homogeno*. Ob robovih pa so silnice ukrivljene in neenakomerne; tam je polje *nehomogeno*. Silnice so nazorna slika električnega polja. Močno spominjajo na tokovnice pri pretakanju tekočin. Podobnost še povečamo: deklariramo, da silnice *izvirajo* iz nabojev na pozitivni plošči in da *ponikajo* v naboje na negativni plošči. S tem definiramo tudi delovanje polja na naboje v njem: pozitivni naboji čutijo silo v smeri silnic in negativni v nasprotni smeri. Kjer so silnice gostejše, je sila večja.



Slika 25.2 Električno polje med dvema nasprotno nabitima ploščama. Polje je vidno zaradi natrosenih iglic iz mavca, ki postaneje električni dipoli in se obrnejo v smer električnih silnic. (Pohl, 1969)

Električna poljska
jakost

Glavna lastnost električnega polja je, da izvaja sile na vanj potopljene naboje. Na naboj e , ki se giblje od ene plošče kondenzatorja do druge po ravni notranji silnici, deluje stalna sila F_e in mu podeli delo $F_e l = Ue$. To pomeni, da je električna sila nanj

$$F_e = eE \quad (25.1)$$

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

Količino E poimenujemo *električna poljska jakost*. To je sila na enoto testnega naboja. Njena enota je bodisi N/C ali V/m. Jakost polja v kondenzatorju je v vsaki točki enaka in je enolično določena z napetostjo in razmikom plošč.

Definicijo jakosti polja kot sile na enoto naboja razširimo na polja okrog poljubnih teles, med katerimi vlada napetost, recimo med kroglo tornega generatorja in stenami sobe. Seveda pa je v takih primerih jakost polja od točke do točke različna in tudi ne velja več zapisana odvisnost od okolišnjih napetosti. V principu lahko izmerimo jakost poljubnega polja v vsaki točki kar po definiciji: preko sile na izbrani testni naboj. V praksi pa je takšno – neposredno – merjenje večinoma neizvedljivo. Med drugim moti, da vnos testnega naboja spremeni razporeditev izvorov polja, kar je treba upoštevati.

25.2 Jakost polja in naboji

Polje v ploščatem kondenzatorju je povsem določeno z napetostjo med ploščama, alternativno pa tudi z nabojem na njima. Kakšna je povezava med obojim?

Polje med naboji

S priključenim voltmetrom ugotovimo, da se napetost med ploščama, ki ju razmaknemo, poveča. Pri tem ostaja razmerje U/l – *gradient napetosti* – nespremenjeno, a le pri majhnih premikih, dokler ostaja polje homogeno. Ko si predstavljamo dva enaka in enako nabita kondenzatorja drugega ob drugem in ju v mislih staknemo, pa uvidimo, da je tudi razmerje e/S – *ploskovna gostota naboja* – konstantno. Opisani razmerji morata biti med seboj povezani. Kako, raziščemo z meritvijo. Naboj na plošči izmerimo z balističnim ampermetrom in ugotovimo

$$\frac{e}{S} = \varepsilon_0 \frac{U}{l} \quad (25.2)$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}.$$

Dobljeni koeficient poimenujemo *električna konstanta*. Pri ploščini 1 dm^2 , razmaku 1 cm in pritisnjeni napetosti 100 V znaša naboj okrog 10^{-9} As , kar je ravno še merljivo.

Najdena povezava pomeni, da lahko električno poljsko jakost znotraj kondenzatorja izrazimo tako preko napetosti na ploščah, $E = U/l$, kot tudi z nabojem na njih, $\varepsilon_0 E = e/S$.

Kapaciteta
kondenzatorja

Opisani poskus s ploščatim kondenzatorjem kaže, da je naboj na njegovih ploščah sorazmeren z napetostjo:

$$e = CU \quad (25.3)$$

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{l}.$$

Količina C pove, koliko naboja na ploščo potisnemo z enoto napetosti. Temu ustrezno jo poimenujemo *kapaciteta*. Njeno enoto C/V okrajšamo v *farad* (F).

Če kondenzator ni ploščat, še vedno velja sorazmernost med nabojem in napetostjo: delo električne sile na testni naboj vzdolž poljubne silnice, torej napetost, je namreč zmeraj sorazmerno z nabojema, ki čepita na koncih silnice. Le kapaciteto moramo izmeriti, ker se je večinoma ne da več izračunati. Kvadratni čevlji veliki plošči na razdalji 1 mm imata kapaciteto $\sim 10^{-9}$ farada. Ko sta nabiti s tornim generatorjem na napetost 1000 V , vsebujeta 10^{-6} As naboja. Pri nekajkrat višji napetosti zrak med ploščama ne izolira več dovolj, ampak pride do preboja nabojev.

Dielektričnost snovi

Morda na kapaciteto kondenzatorja kaj vpliva prisotnost snovi med ploščama? Vtaknimo med obe plošči prilegajočo se stekleno šipo! Napetost med njima upade za faktor ε . Kondenzator, popolnoma zapolnjen z izolatorjem, recimo steklom, ima torej kapaciteto glede na "zračni" kondenzator povečano za faktor ε :

$$C_{\text{full}} = \varepsilon C. \quad (25.4)$$

Poimenujemo ga *dielektričnost* dotične snovi. Za razne vrste stekla znaša $5-10$ in za destilirano vodo 80 . Ker je tudi zrak snov, je potrebno preveriti še kapaciteto izsesanega kondenzatorja. Pokaže se, da je enaka, kot če bi bil napolnjen z zrakom. Zato lahko za referenco obdržimo kar zračni kondenzator namesto brezračnega.

Dielektričnost snovi si razlagamo tako, da se v njenih molekulah razmakneta težišči pozitivnega in negativnega naboja v smeri polja. Tiste molekule, v katerih sta težišči nabojev že ločeni, pa se zavrtijo v smer polja. Inducirani naboji se v notranjosti izolatorja izravnavajo, na površini pa ne in tam se pojavi vezani površinski

naboj. Ta "razredči" obstoječi naboj na ploščah in s tem zmanjša napetost med njima.

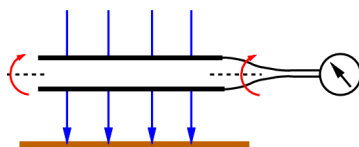
25.3 Influenčne meritve polja

V poljubnem električnem polju je vsak dovolj majhen del homogen. Za tak del si mislimo, da ga ustvarja ustrezno nabit lokalni ploščati kondenzator. Kako bi določili, kakšen neki bi bil ta namišljeni kondenzator?

Influenčni
kondenzator

Na željeno mesto vtaknemo kondenzator s staknjenima ploščama; zunanje polje influencira naboje v njiju tako, da se ena naelektri pozitivno in druga negativno. Plošči razmaknemo in naboja ostaneta ločena. Influenčiranega je natanko toliko naboja, da je njegovo polje nasprotno enako zunanjemu polju; neto polje je torej nič. Sedaj le še odstranimo plošči, izmerimo naboj na njiju (z balističnim ampermetrom) in izračunamo poljsko jakost. Pri opisanem influenčnem merjenju je treba poiskati pravo usmeritev staknjenih plošč – tisto, kjer je influencirani naboj največji.

Stikanje in razmikanje plošč je nerodno. Bolj priročno je, če uporabimo kar navaden kondenzator z razmaknjenima ploščama, vendar vrtljiv okoli vzdolžne osi. Plošči naj bosta povezani preko balističnega ampermetra. Kondenzator zavrtimo za četrto obrata tako, da sta plošči najprej pravokotni in nato vzporedni zunanjemu polju. Balistični ampermeter pokaže pretočeni naboj. S tem je določena tudi električna poljska jakost.



Slika 25.3 Na (povezanih) ploščah kondenzatorja v električnem polju Zemlje se influencirajo naboji. Ko ga zavrtimo za 90 stopinj, se naboji izravnajo. Polje je sorazmerno s tokovnim sunkom.

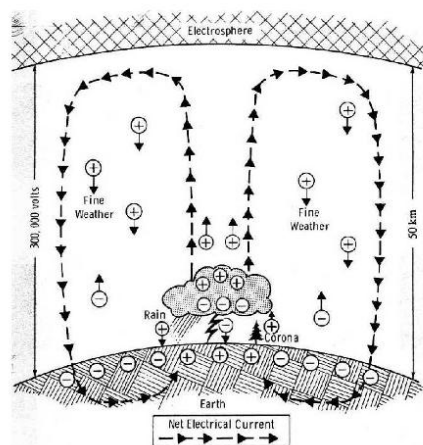
Električno polje
Zemlje

Ko z zasučnim kondenzatorjem pretipamo okolico, ugotovimo, da pravzaprav živimo sredi električnega polja. V lepem vremenu je polje usmerjeno iz višine proti tlu in njegova jakost pri tleh znaša okrog 100 V/m. Zakaj potem skozi nas ne teče tok? Zato, ker tvori naše telo skupaj z Zemljo enoten prevodnik in je napetost med vrhom glave in podplati enaka nič.

Zemeljska površina ima torej negativne naboje; kje nad njo so potem pozitivni naboji? Morda na zvezdah? Če bi bilo to res, bi morale biti električno polje v prvih višinskih kilometrih nad morjem praktično konstantno. To pa ni res, saj meritve kažejo, da do 10 km višine jakost polja že močno pade. Pozitivni nosilci morajo torej plavati po ozračju. Očitno so to raznovrstni pozitivni ioni.

Nevihtni oblak kot
generator toka

Presežek pozitivnih nabojev iz ozračja nenehno teče v tla in tamkaj nevtralizira negativne naboje. Kaj pa nadomešča izgubljene negativne naboje v tleh in pozitivne v ozračju? Nevihtni oblaki!



Slika 25.4 Električni naboji in tokovi v ozračju. Nevihtni oblak je torni generator, ki ustvarja pozitivne ione na vrhu in negativne na dnu. Nastali ioni se izravnavajo kot električni tokovi skozi ozračje. (Penn State University)

V nevihtnem oblaku se padajoče kapljice tarejo ob zrak in se negativno naelektrijo, za sabo pa puščajo pozitivne naboje. Vrh oblaka tako postaja pozitivno naelektren, dno oblaka pa negativno. Višinski pozitivni naboj se širi z vetrom v okolico in nižinski negativni z dežjem na tla. V tleh pod oblakom se tudi influencira pozitivni naboj in pogosto se zgodi, da negativni naboj udari skozi zrak iz oblaka v tla. To je blisk. Nevihtni oblak torej deluje kot torni električni generator, ki ločuje "sprijete" naboje in jih kopiči na elektrodah.

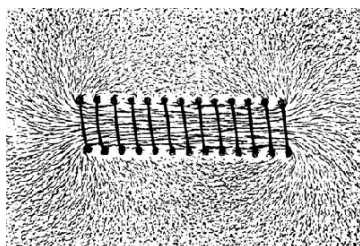
25.4 Magnetno polje

Magnetno polje

Dober pripomoček za preučevanje magnetizma je tuljava, ki je mnogo daljša od svojega premera. To je *dolga tuljava*. Namestimo jo vodoravno in vanjo vtaknemo magnetno iglo. Ta se usmeri proti severu. Nato priključimo baterijo, po tuljavi steče tok in igla se, po pričakovanju, usmeri vzdolž njene osi. Prostor v notranjosti tuljave se je očitno spremenil: v njem so začele delovati magnetne sile (poleg že obstoječih). Rečemo, da je nastalo *magnetno polje*. Magnetno polje, to je prostor, v katerem delujejo magnetne sile.

Magnetne silnice

Za boljšo predstavo o magnetnem polju nadomestimo iglo magnetnico z železovimi opilki, ki jih raztresemo po vodoravni kartonski plošči skozi tuljavo. Igllice se zaradi indukcije elementarnih magnetov v njih uredijo v črte. Rečemo, da so to *magnetne silnice*. Vzdolž osi tuljave so silnice ravne in enakomerno goste; rečemo, da je tam polje homogeno. Na vsakem koncu tuljave se silnice ne končajo, ampak se po zunanji strani vračajo na nasprotni konec. Silnice so nazorna slika magnetnega polja. Medtem ko električne silnice izvirajo in ponikajo v naboje ter imajo tam začetek in konec, so magnetne silnice sklenjene same vase ter obkrožajo tokove. Tudi njim pripišemo smer: tja, kamor kaže severni pol lokalne magnetnice. Kjer so silnice gostejše, je navor sile na magnetnico večji.



Slika 25.5 Magnetno polje tuljave, po kateri teče električni tok, ki ga poganja baterija izza ozadja. Polje je vidno zaradi opilkov iz železa, ki postanejo magnetni dipoli in se obrnejo v smer silnic. (Pohl, 1969)

Magnetna poljska
jakost

Glavna lastnost magnetnega polja je, da izvaja sile na vanj potopljene vodnike s tokom. Tuljavo postavimo navpično in vanjo, kot gugalnico, obesimo vodnik z dolžino l . To je seveda posnemanje že znanega poskusa z gugalnico med navpičnima poloma podkvastega magneta [24.8]. Ko po gugalnici spustimo tok z jakostjo I , se pričakovano odkloni. Razmislek pravi in poskus potrди, da je sila sorazmerna z jakostjo toka in z dolžino prečke:

$$F_m = BIl. \quad (25.5)$$

Sorazmernostni koeficient B je od tuljave do tuljave – ter od magneta do magneta – različen in ga poimenujemo *magnetna poljska jakost*. Pove, kako je polje močno, to je, s kako silo deluje na vodnik testne dolžine in testnega toka. Ustrezna enota je N/Am.

Merjenje z gugalnico je nerodno. Namesto nje raje uporabimo tokovno zanko ali – še bolje – ploščato tuljavo s presekom S . Postavimo jo pravokotno na magnetno polje. To je seveda posnemanje ampermetra na vrtljivo tuljavo med poloma podkvastega magneta [24.8]. Mislimo si, da ima tuljava le en ovoj v obliki pravokotnika $l \cdot b$. Vrtita ga magnetni sili na dveh nasprotnih stranicah dolžine l , vsaka z navorom $BIl \cdot b/2$, to je $BIS/2$. Na zanko deluje torej celotni navor

$$M_m = BIS. \quad (25.6)$$

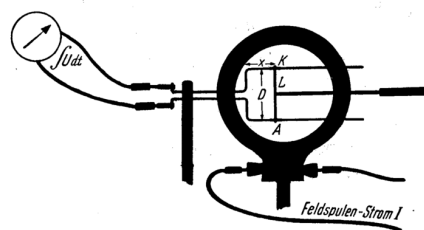
Zapisani navor velja tudi za zanko poljubne oblike, saj si jo lahko mislimo sestavljeno iz samih pravokotnih odsekov. Navor na tuljavo z N ovoji pa je seveda N -krat večji.

25.5 Indukcija napetosti

Gugalna prečka v magnetnem polju se premakne, ko skozi njo steče tok. Je morda res tudi obratno? Morda premik prečke skozi magnetno polje po njej požene tok?

Kinematična indukcija

V navpično postavljeno tuljavo potisnemo na isti višini dva vzporedna vodoravna vodnika na medsebojni razdalji l in ju priključimo na voltmeter. Na vodnika natakemo drsno prečko. Oba vodnika in prečka tvorijo zanko, skozi katero se "pretaka" magnetno polje. Recimo ji kar pretočna zanka. Ko premikamo prečko, voltmeter res pokaže napetost!



Slika 25.6 Kinematična indukcija. V zanki, ki se ji spreminja presek, skozi katerega teče nespremenljivo magnetno polje, se inducira napetost. (Pohl, 1969)

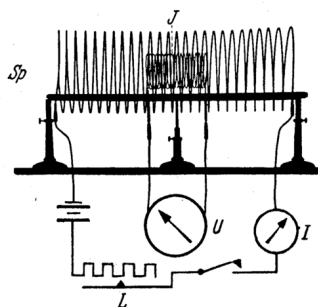
V mislih premikajmo prečko enakomerno s hitrostjo v . Po pretočni zanki vlada inducirana napetost U_i , ki poganja tok I . Sila F , s katero premikamo prečko, je nasprotno enaka magnetni sili $F_m = BIl$, s katero nanjo deluje magnetno polje. Moč, ki jo prečka prejema od roke, je Fv , in moč, ki jo oddaja toku, je $U_i I$. Energija sistema se ohranja, zato sta moči enaki in velja $U_i = Blv$. Produkt lv je pravzaprav sprememba ploščine pretočne zanke v časovni enoti, zato

$$U_i = B_{\perp} \frac{dS}{dt}. \quad (25.7)$$

Inducirana gonilna napetost po zanki je sorazmerna s hitrostjo spreminjanja preseka zanke, ki ga prebadajo magnetne silnice. To je *kinematična indukcija* napetosti. Z njo je določena tudi enota za jakost magnetnega polja, Vs/m^2 , kar je seveda isto kot dosedanja enota N/Am . Na kratko ji bomo rekli tudi *tesla*, T.

Dinamična indukcija

Morda bi se v zanki inducirala gonilna napetost tudi takrat, ko bi bila zanka pri miru, a bi se spremenila jakost magnetnega polja, ki jo prebada?



Slika 25.7 Dinamična indukcija. V togi in nepremični zanki, skozi katero teče spremenljivo magnetno polje, se inducira napetost. (Pohl, 1969)

Naredimo poskus: v veliko tuljavo vstavimo manjšo; ko izključimo tok v veliki tuljavi, se njeno polje iz poznane vrednosti zmanjša na nič in na priključkih male tuljave se pojavi sunek napetosti. Tega izmerimo z balističnim voltmetrom. Podobno je, ko veliko tuljavo vključimo. Indukcijski zakon sedaj zapišemo za eno zanko kot

$$U_i = S \frac{dB_{\perp}}{dt}. \quad (25.8)$$

To je *dinamična indukcija*. Razlagamo si jo tako, da se spremenljivo magnetno polje obda z električnim poljem. Okrog

spreminajočega se snopa magnetnih silnic se pojavi krožni ovoj električnih silnic. Merilna zanka je zgolj pripomoček, ki to pokaže.

Obe vrsti indukcije lahko združimo v *indukcijski zakon* (FARADAY)

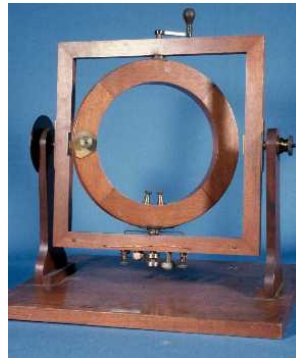
$$U_i = \frac{d}{dt} (B_{\perp} S). \quad (25.9)$$

S tem smo definirali količino $\Phi_m = B_{\perp} S$, ki jo poimenujemo *magnetni pretok*. Indukcijski zakon torej pravi: inducirana napetost po zanki, mirujoči ali gibljivi, je enaka časovni spremembi magnetnega pretoka skozi njo.

25.6 Indukcijske meritve polja

Indukcijska zanka

Z indukcijskim zakonom lahko določamo magnetno poljsko jakost iz meritev inducirane napetosti namesto iz meritev sil. V preiskovano polje vstavimo kratko tuljavo s presekom S in številom navojev N ; tuljava mora biti pravokotna na silnice. Potem jo hitro potegnemo ven iz polja ali – bolje – zasukamo za 90 stopinj, ter merimo sunek napetosti med njenima priključkoma. Inducirana napetost je v vsakem trenutku enaka vsoti napetosti po posameznih zankah oziroma navojih. Iz izmerjenega sunka napetosti pa izračunamo jakost polja.



Slika 25.8 Meritev magnetnega polja z indukcijo. Prikazana je tuljava za merjenje zemeljskega magnetizma. Z vodoravno postavljeno tuljavo in zasukom za 180 stopinj merimo dvakratnik navpične komponente polja in obratno. (Wesleyan University)

Jakost magnetov

Z zasučno tuljavo izmerimo ob polu močnega podkvastega magneta jakost 10^{-2} Vs/m^2 .

Na površini Zemlje, v Ljubljani, izmerimo polje 10^{-5} Vs/m^2 . Na obeh magnetnih polih je polje še nekajkrat močnejše.

25.7 Jakost polja in tokovi

Polje med tokovi

V tuljavi, ki je mnogo daljša od premera, ki ima N ovojcev na enoto dolžine l in po kateri teče tok I , je polje homogeno; meritev z indukcijsko tuljavo pokaže

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (25.10)$$

$$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}.$$

Sorazmernostno konstanto poimenujemo *magnetna konstanta*.

Njena vrednost je odvisna od elektrolizne definicije toka.

"Normalna" tuljava s 100 ovoji na 1 decimeter, po kateri teče tok 1 A, ima v notranjosti polje okrog 10^{-3} Vs/m². To je desetkrat manj od podkvastega magneta in stokrat več od Zemlje kot magneta.

Induktivnost tuljave

Sprememba toka po tuljavi povzroči spremembo njenega magnetnega polja, ta pa inducira napetost v lastnih ovojih. Napetost je taka, da nasprotuje spremembi toka. Indukcijski zakon pove $U_i = N \cdot S d(\mu_0 NI/l)/dt$, torej

$$U_i = L \frac{dI}{dt} \quad (25.11)$$

$$L = \mu_0 N^2 \frac{S}{l}.$$

Koeficient L poimenujemo *induktivnost* tuljave. Njeno enoto Vs/A okrajšamo v *henry* (H). Enačba velja tudi za drugačne tuljave, le njihove induktivnosti večinoma ne moremo izračunati, ampak jo je treba izmeriti. Čevelj dolga in dva palca široka tuljava z enim navojem na milimeter ima induktivnost $\sim 10^{-3}$ henryja.

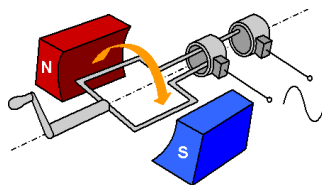
Permeabilnost snovi

Če tuljavo zapolnimo s kakšno snovjo, se ji induktivnost poveča za faktor μ . Rečemo, da je to *permeabilnost* snovi. Večina snovi ima permeabilnost neznatno večjo ali manjšo od 1. Redka izjema je železo, kjer dosega vrednosti do 10^3 . Predstavljamo si, da se v železu atomarni tokovni magneti usmerijo vzdolž magnetnega polja in ga s tem okrepijo. Permeabilnost železa je tudi sicer nekaj posebnega: odvisna je od tega, koliko in v kateri smeri je bilo pred meritvijo železo namagneteno.

25.8 Električni generator

Izmenični dinamo

Kinematično indukcijo izkoristimo kot priročen vir elektrike. Najpreprostejši je naslednji način. Med poloma stalnega magneta – v homogenem polju z jakostjo B – enakomerno vrtimo, na primer z naftnim motorjem, tuljavo s presekom S in številom navojev N . Po njej se inducira gonilna napetost U_i . Konca tuljave sta spojena z dvema obročema na vrtilni osi. Obročev se dotikata dve drsni krtači, ki služita kot izhodna priključka.



Slika 25.9 Shema dinamo

stroja za izmenično napetost. Stroj temelji na kinematični indukciji. (Museu das Comunicacoes de Macau, Macau)

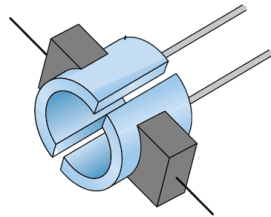
To je *dinamo*. Inducirana napetost je enaka vsoti napetosti po posameznih navojih. Če se tuljava vrti s krožno frekvenco ω , nudi polju spremenljiv presek $S \cos \omega t$ (čas začnemo šteti, ko je presek tuljave pravokoten na polje), zato niha napetost na njej kot

$$\begin{aligned} U_i &= U_0 \sin \omega t \\ U_0 &= NBS\omega. \end{aligned} \quad (25.12)$$

Rečemo, da je to *izmenična napetost*. Njen graf je sinusoida. Velikost in frekvenca izmenične napetosti je odvisna od uporabljanega generatorja.

Enosmerni
dinamostroj

Lepo bi bilo imeti še generator za enakomerno napetost. Morda lahko preoblikujemo izmeničnega? Da: dva drsna obroča nadomestimo z dvema polobročema, postavljenima drug proti drugemu.



Slika 25.10 Odvzemna priključka – komutator – ki izmenični dinamostroj prilagodi za enosmerno napetost. (Anon)

Napetost na odzemnih ščetkah se z vrtenjem tuljave spreminja kot $U = U_0 |\sin \omega t|$. To je že enosmerna, a še vedno spremenljiva napetost. Opazno jo zgladimo tako, da namesto ene tuljave in dvodelnega kolektorskega obroča natakemo na os dve pravokotni tuljavi, povezani s štiridelnim kolektrskim obročem. Še več tuljav zgladi napetost prav do $U = U_0$.

Transformator

Izmenični tok ima pred istosmernim veliko prednost: ko teče skozi tuljavo, ustvarja v njej in okrog nje spreminjajoč se magnetni pretok. Če tega prestrežemo z drugo tuljavo, se v njej inducira izmenična napetost in – če je sklenjena – po njej steče izmenični tok. V praksi natakemo tuljavi na skupno železno jedro, ki pretok ojača. To jedro je sestavljeno iz tankih, na eni strani izoliranih lamel, da preprečimo indukcijo močnih tokov v njem.



Slika 25.11 Transformator – pretvornik napetosti. Temelji na dinamični indukciji. Prikazan je prvi transformator za "laboratorijske" poskuse, ki ga je sestavil M. Faraday. (Science Museum, London)

Razmerje med napetostima na prvi (primarni) in nesklenjeni drugi (sekundarni) tuljavi znaša:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (25.13)$$

To je *transformator*. Z njim pretvarjamo visoke napetosti v nizke in obratno. Ko sekundarno tuljavo obremenimo, pa je razmerje obeh tokov in napetosti določeno z ohranitvijo energije:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (25.14)$$

Dinamostroj s priključenim transformatorjem, ki ima več sekundarnih odcepov, ali celo drsni odcep, je priročen vir izmeničnih napetosti.

25.9 Izmenični tok

Kakšen tok pa teče skozi porabnik, če ga priključimo na vir izmenične napetosti?

Skozi upornik Izmenična napetost na uporniku poganja skozenj tok zdaj sem, zdaj tja. Tok je v vsakem trenutku sorazmeren z napetostjo, $U = RI$. Naj bo napetost $U = U_0 \sin \omega t$, potem $I = I_0 \sin \omega t$ in $U_0 = RI_0$. Tok torej niha sočasno z napetostjo. Trošena moč je v vsakem trenutku enaka $P = UI$, torej $P = P_0 \sin^2 \omega t$ in $P_0 = U_0 I_0$. Tudi moč niha sočasno s tokom in napetostjo. Povprečna moč, definirana kot $P_{\text{ave}} \cdot T = \int_0^T P dt$, znaša $P_{\text{ave}} = U_0 I_0 / 2$. Če definiramo efektivno napetost in efektivni tok

$$\begin{aligned} U_{\text{ef}} &= U_0 / \sqrt{2} \\ I_{\text{ef}} &= I_0 / \sqrt{2}, \end{aligned} \quad (25.15)$$

lahko zapišemo

$$\begin{aligned} P_{\text{ave}} &= U_{\text{ef}} I_{\text{ef}} \\ U_{\text{ef}} &= R I_{\text{ef}}. \end{aligned} \quad (25.16)$$

Skozi kondenzator Izmenična napetost na kondenzatorju kopiči naboj zdaj na eni, zdaj na drugi plošči, vmes pa se gradi in izginja električno polje. Naboj je v vsakem trenutku sorazmeren z napetostjo, $e = CU$. Naj bo napetost $U = U_0 \sin \omega t$, potem $e = CU_0 \sin \omega t$. Odvod naboja po času je tok, torej $I = I_0 \cos \omega t$ in $I_0 = U_0 C \omega$. Tok torej niha, vendar ne sočasno z napetostjo, ampak jo prehiteva za četrto nihaja: ko je tok maksimalen in začne pojemati, je napetost nič in začneja rasti. Efektivna napetost in efektivni tok pa sta povezana takole:

$$U_{\text{ef}} = \frac{1}{C \omega} I_{\text{ef}}. \quad (25.17)$$

Kondenzator torej kaže *kapacitivni upor* $R_C = 1/C\omega$. Trošena moč je zaradi zamika med tokom in napetostjo enaka nič.

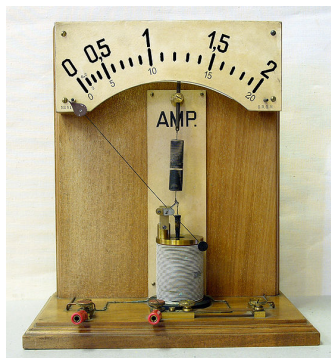
Skozi tuljavo Izmenična napetost na tuljavi potiska tok skozi njeno eno, zdaj v drugo smer, vmes pa se gradi in izginja magnetno polje. Če je upor tuljave majhen, je napetost na njej enaka inducirani napetosti; odvod toka je potem v vsakem trenutku sorazmeren z napetostjo, $U = L di/dt$. Naj bo tok $I = I_0 \sin \omega t$, potem $U = U_0 \cos \omega t$ in $U_0 = I_0 L \omega$. Tok torej niha, vendar zaostaja za napetostjo za četrto nihaja. Efektivna napetost in tok sta povezana takole:

$$U_{\text{ef}} = L\omega I_{\text{ef}}. \quad (25.18)$$

Tuljava torej kaže *induktivni upor* $R_L = L\omega$. Trošena moč na njej je zaradi zamika med tokom in napetostjo enaka nič.

Merjenje toka

Merilnik z vrtljivo tuljavo ne more slediti hitrim spremembam izmeničnega toka. Nadomestimo ga z instrumentom na mehko železo: v njem teče izmenični tok po tuljavi in privlači kos mehkega železa, ki je povezan s kazalcem.



Slika 25.12 Ampermeter na mehko železo. Merilna skala ni linearna. Uporaben je tako za enosmerni kot za izmenični tok. (School Historical Museum, Bremerhaven)

Uporaben je tudi merilnik na grelno žico: tok jo segreva, žica se razteza in premika kazalec. Oba merilnika kažeta efektivno jakost oziroma napetost toka. Umerimo ju z enosmernim tokom.

25.10 Energija polj

Električna

Ko z virom napetosti polnimo kondenzator, je za premik naboja iz ene plošče na drugo potrebno delo. Naj bo na kondenzatorju že naboj e in napetost U . Za premik dodatnega naboja de je potem potrebno delo $A = Ude = (e/C)de$. Premik celotnega naboja na končno napetost pa zahteva delo $\int (e/C)de = e^2/2C$, kar je enako $CU^2/2$. To delo opravi zunanji vir in se naloži v novozgrajeno električno polje. Električno polje v poljubnem kondenzatorju ima torej *električno energijo*

$$W = \frac{1}{2} CU^2. \quad (25.19)$$

Magnetna

Podobno je pri tuljavi. Naj skozi jo že teče tok I pri napetosti U . Da se tok poveča za dI , je potrebna moč $P = IU = ILdI/dt$. Zagon celotnega toka pa zahteva delo $\int Pdt = \int LI dI = LI^2/2$. To delo opravi zunanji vir in se naloži v novozgrajeno magnetno polje. Magnetno polje poljubne tuljave ima torej *magnetno energijo*

$$W = \frac{1}{2} LI^2. \quad (25.20)$$

Gostota energije

Energija polja v kakršnemkoli kondenzatorju je enolično določeno z njegovo obliko in razsežnostjo ter z napetostjo med ploščama. Najpreprostejši je ploščati kondenzator. Polje v njem je homogeno, zunaj njega pa povsod enako nič. Če energija res tiči v polju, mora biti odvisna od poljske jakosti in prostornine polja.

Upoštevamo enačbi za kapaciteto in za električno poljsko jakost, delimo s prostornino in dobimo:

$$w = \frac{W}{V} \quad (25.21)$$

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2. \quad (25.22)$$

Količino w poimenujemo *gostota energije*. V homogenem polju ploščatega kondenzatorja je povsod enaka. Pričakujemo, da isti izraz velja tudi za nehomogeno polje. V njem je pač gostota energije od točke do točke različna.

Podobno velja za magnetno polje. Upoštevamo enačbi za induktivnost in magnetno poljsko jakost v dolgi tuljavi, pa dobimo:

$$w = \frac{1}{2\mu_0} B^2. \quad (25.23)$$

25.11 Nihajni krog

Tudi nabiti kondenzator je vir toka: če ga kratko staknemo, steče po povezavi višek naboja z ene plošče na drugo. Kaj če v povezavo vključimo tuljavo?

Nihanje toka Takoj ko sklenemo stikalo, začne teči električni naboj z ene plošče kondenzatorja na drugo. Sprva je napetost na kondenzatorju velika, zato je tok močan, potem pa pojenjuje. V tuljavi sproti gradi magnetno polje. Ker tok pojema, se magnetni pretok v tuljavi spreminja in v navojih tuljave inducira napetost, ki spremembi toka nasprotuje. Tako tuljava zadržuje tok, dokler plošči ne postaneta nevtralni, potem pa ga vzpodbujata, dokler se ne naelektrita nasprotno kot na začetku. Nato se zgodba ponovi v nasprotni smeri. Tok niha sem in tja in z njim se gradita in razpadata električno in magnetno polje. Dobili smo *nihajni krog*.

Nihajni čas Kakšen je nihajni čas? Napetost na kondenzatorju je nasprotno enaka napetosti na tuljavi; prvo dobimo iz enačbe za kapacitivnost in drugo iz enačbe za induktivnost: $q/C = -LdI/dt$. Odvajamo obe strani po času in dobimo $d^2I/dt^2 + (1/LC)I = 0$. To je znana enačba za harmonično nihanje [19.4], iz katere razberemo krožno frekvenco

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}. \quad (25.24)$$

Če je v krogu upor, kar je vedno, je nihanje dušeno. Nihanje je tako hitro, da mu kazalčni merilniki ne morejo slediti. "Čeveljski" kondenzator 1 nF in "čeveljska" tuljava 1 mH, na primer, ustvarjata nihanje s frekvenco 1 MHz!

Ko bi le uspeli nihaje toka v električnem nihajnem krogu na nek način povezati s kakšnim števničnim ali prikazovalnim mehanizmom! Potem bi dobili novo, "električno" vrsto ure. Zaradi hitrega nihanja bi bila gotovo primerna za merjenje zelo kratkih časov. Kot vidimo, nam načrtov in nalog za prihodnost res ne bo kmalu zmanjkalo. □