

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 25 (1997/1998)

Številka 5

Strani 282-287

Janez Strnad:

ELEKTRIČNI TOK PO KOVINI

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/25/1350-Strnad.pdf>

© 1998 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2009 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

ELEKTRIČNI TOK PO KOVINI

Električni tok je domač pojem, nanj naletimo velikokrat tudi zunaj fizike. Kljub temu smo v zadregi, ko si je električni tok treba predstavljati. Ne moremo ga namreč direktno opazovati, če se odpravimo neprijetni ali celo boleči možnosti, da bi ga zaznavali neposredno.

Opazujemo pa lahko učinke toka: vodnik s tokom deluje na drug vodnik s tokom ali na trajen magnet; tok iz raztopine kisline, baze ali soli izloči snovi; toplotno izoliran vodnik s tokom se segreje. Vsakega od učinkov lahko uporabimo za merjenje, a najpripravnejši je magnetni učinek.

Dokler niso poznali teh učinkov, so nekateri raziskovalci električni tok poskušali zaznati neposredno. Henry Cavendish je primerjal med seboj električne tokove po občutku, ki so ga povzročili, ko jih je speljal po roki. Alessandro Volta je z jezikom preskušal učinek svojih baterij in napeljal tok skozi ušesa in skozi oči.

Za zdaj se omejimo na električni tok po kovini, in to po bakrenem vodniku, s katerim imamo največ opraviti. Ime *tok* namiguje, da si predstavljamo nekakšno tekočino. Tudi učbeniki pogosto na začetku primerjajo tok po sklenjenem električnem krogu s tokom vode po sklenjenem krogu cevi. Primerjava močno šepa, kar uvidimo že po tem, da iz vtičnice ne pricurlja niti kaplja elektrike, dokler je ne "zapremo" z vodnikoma in porabnikom. Predstavljajte si, kaj bi se primerilo, če vodovodni cevi ne bi bili zaprti s pipama. Iz zadrege se izvijemo z zamislijo o dveh električnih "snoveh", ki nosita električni naboj različnih znakov. Naboj negativne "snovi" v vsakem majhnem delu vodnika izravna naboj pozitivne "snovi". Pozitivna "snov" sama zase ali negativna "snov" sama zase sploh ne bi mogli obstajati. Zaradi odbojne električne sile med deloma naboja enakega znaka bi nastala močna eksplozija, ki bi dele naelektrene "snovi" pognala, da bi se oddaljevali drug od drugega. Najmanjši deli naboja enega znaka v bakreni kroglici s čelnim presekom 1 mm^2 bi po eksploziji odleteli s tolikšno kinetično energijo, kot da bi jih pospešila napetost več kot 10^{14} voltov. To je približno tisočkrat več, kot zmore največji pospeševalnik. Le zato, ker sta "snovi" obeh znakov "premešani", odbojne sile med deloma naboja enakega znaka ne pridejo do izraza (slika 1 na II. strani ovitka).

Tok po kovini ne povzroča gibanja snovi. Bakreni vodnik se zaradi toka v kemijskem pogledu ne spremeni. Pri poskusih so staknili bakren in aluminijast vodnik in dolgo časa poganjali po njiju tok. Pod mikroskopom se v bakru ni pokazala niti sled aluminija in v aluminiju niti sled bakra. Smiselno je privzeti, da v kovini nastane tok samo zaradi potovanja ene od obeh "snovi". Druga "snov" miruje in ne prispeva k toku, s svojim nabojem izravna učinek nasprotnega naboja gibljive "snovi".

V tem pogledu nekateri primerjajo gibljivo in mirujočo električno "snov" v kovinskem vodniku z vodo in volno v mokri volneni niti, pa tudi z moko mivko (z njo otroci gradijo gradove, medtem ko to ni mogoče niti s samo vodo niti s samo mivko).

Gibljivo "snov" je mogoče raziskati v kovinskem vodniku, ki se v vzdolžni smeri giblje enakomerno pojemajoče. V njem se gibljiva "snov" premakne proti sprednjemu delu, kot se v zavirajočem avtobusu premaknejo proti vozniku potniki, ki ne stojijo trdno. Vodnik naj se giblje v vzdolžni smeri pojemajoče s pospeškom a v nasprotni smeri gibanja. Na dele gibljive "snovi" deluje zato glede na drugo "snov" sila $F = ma$ v smeri gibanja. Deli gibljive "snovi" se gibljejo skupaj z deli druge "snovi", sicer bi prišlo do eksplozije, o kateri smo govorili. To pojasnimo z električno napetostjo, ki se pojavi zaradi premika gibljive "snovi" in ki povzroči silo nanjo v nasprotni smeri (slika 2 na II. strani ovitka).

Sili uravnovesita druga drugo, tako da velja zveza $\rho_s a = \rho_e U/l$. Pri tem je U napetost med sprednjim in zadnjim krajiščem vodnika z dolžino l , tako da je $E = U/l$ jakost električnega polja, ki deluje na naboj z gostoto $\rho_e = e/V$ gibljive "snovi" z gostoto mase $\rho_s = m_s/V$. V je prostornina vodnika. Merjenj ne izvajajo z vodnikom pri določenem pospešku, ampak izmerijo produkt napetosti U in časa njenega trajanja t , to je sunek napetosti Ut , ko se v času zaviranja t hitrost zmanjša od $v = at$ na 0. Pri tem smo privzeli, da sta pospešek in napetost ves čas konstantna. Iz zveze $\rho_s v = \rho_e Ut/l$ izhaja

$$\frac{e}{m_s} = \frac{\rho_e}{\rho_s} = \frac{vt}{Ut}.$$

Navedli smo absolutno vrednost naboja e in gostote naboja ρ_e . Ustrezna masa m_s in njena gostota ρ_s zadevata samo gibljivo električno "snov".

Že Michael Faraday in za njim Heinrich Hertz sta poleg drugih z merjenjem poskušala razkriti vztrajnost delov snovi, ki prenašajo naboj. Njuna prizadevanja niso bila uspešna. Zahtevno merjenje je opravil med letoma 1916 in 1926 ameriški fizik in fizikalni kemik Richard Chace Tolman s sodelavci.

Dolgo valjasto tuljavo je hitro zavrtel okoli njene geometrijske osi in jo zavrl. Sunek napetosti je izmeril z voltmetrom, katerega nihajni čas je bil precej večji od časa, v katerem se je tuljava ustavila. Voltmeter je preko drsnikov priključil na krajišči tuljave. Deli vsakega ovoja so se zaustavljali v tangentsni smeri in napetosti, ki so se pojavile na ovovjih, so se seštele. Pri tuljavi s skupno dolžino $l = 10$ km se je pri zaustavljanju od hitrosti $v = 50$ m/s pojavil sunek napetosti $3,3 \cdot 10^{-6}$ Vs. Zapisana enačba da $e/m_s = \rho_e/\rho_m = 50 \text{ ms}^{-1} \cdot 10^4 \text{ m}/3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Vs} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ As/kg}$.

Zaradi neenakomernega segrevanja drsnih priključkov merjenje ni bilo zelo natančno. Navedli smo povprečno vrednost za več poskusov z bakrenimi, srebrnimi in drugimi vodniki. Pri poskusih je tok stekel od zadnjega krajišča k sprednjemu, tako da je bilo zadnje krajišče pozitivno in sprednje negativno. Gibljiva električna “snov” potemtakem nosi negativni naboj, “snov”, ki ne potuje, pa pozitivnega. Po tem si smemo pozitivno “snov” v kovini predstavljati kot pozitivno “trdnino”, gibljivo “snov” pa kot negativno “tekočino”.

Raziskovanje elektrolize je pokazalo, da se skozi raztopino kisline, baze ali soli pretoči *Faradayev naboj* $e_F = 96 \cdot 10^6$ As, ko se na elektrodi izloči kilomol enovalentnega elementa. Tako lahko ugotovimo, da je masa kilomola negativne “tekočine” v bakru

$$M_s = \frac{e_F}{(e/m_s)} = \frac{96 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^{11}} \text{ kg} = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ kg}.$$

Kilomol negativne električne “tekočine” ima okoli 1600–krat manjšo maso kot najlažji element vodik in okoli $65 \cdot 1600 = 10^5$ –krat manjšo maso kot baker. Kilomolska masa atomskega vodika meri namreč približno 1 kg in kilomolska masa bakra približno 65 kg. Gostota električne “tekočine” je potemtakem 10^5 –krat manjša od gostote bakra, saj ima “tekočina” enako prostornino kot baker. Iz tega izhaja, da je gostota negativne “tekočine” enaka $\rho_s = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}/10^5 = 0,09 \text{ kg/m}^3$, ker je gostota bakra $8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Tako majhna gostota je značilna za plin. Nekatere druge lastnosti “tekočine”, na primer zelo majhna stisljivost, pa so bolj značilne za kapljevino, zato ostanimo pri “tekočini”. Gostota naboja “tekočine” je $\rho_e = \rho_s e/m_s = 0,09 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \text{ As/kg} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ As/m}^3$. Pri tem smo po prejšnjem dogovoru zapisali samo absolutno vrednost. Enako velika je gostota naboja pozitivne “trdnine”.

Z gibljivo negativno “tekočino” in pozitivno “trdnino” v kovini pojasnimo *influenco*. Izoliranemu kosu kovine, tako imenovanemu *prevodniku*, približajmo pozitivno naelektreno telo. Naboj tega telesa pritegne negativno “tekočino” na bližnjem delu prevodnika, zato je nekaj zmanjka na oddaljenem delu. Na bližnjem delu prevodnika negativni naboj “tekočine” prevlada nad pozitivnim nabojem “trdnine”, na oddaljenem delu pa pozitivni naboj “trdnine” prevlada nad negativnim nabojem “tekočine” (slika 3 na II. strani ovitka). Presežek ali primanjkljaj negativne “tekočine”, ki je sicer gibljiva, lahko obmiruje le na površju prevodnika. Samo tam sila, ki veže “tekočino” na prevodnik, uravnovesi silo pozitivnega naboja telesa v bližini. Presežek in primanjkljaj naboja se

pojavitna samo na površju prevodnika. V notranjosti prevodnika sta naboja "tekočine" in "trdnine" izravnana, kot da naelektrnega telesa ne bi bilo v bližini. Pri influenci je pozitivni naboj prevodnika, to je presežek naboja "trdnine" nad nabojem "tekočine", enak absolutni vrednosti negativnega naboja prevodnika, to je presežku naboja "tekočine" nad nabojem "trdnine". Na to opozorimo s trditvijo, da se pri influenci naboja na prevodnika ločita; s tem mislimo na presežek in primanjkljaj naboja.

Z influenco pojasnimo tudi delovanje kondenzatorja. Mislimo si ploščati kondenzator, ki ga priključimo na napetost U . Na plošči, ki je zvezana s pozitivnim priključkom, se pojavi primanjkljaj negativnega naboja "tekočine", in na plošči, ki je zvezana z negativnim priključkom, enako velik presežek negativnega naboja "tekočine" (slika 4 na II. strani ovitka). Ne da bi se spuščali v podrobnosti, omenimo, da se na ploščah s ploščino po 100 cm^2 v razmiku 1 mm pri napetosti 1000 V nabereta naboja okoli 10^{-8} As in -10^{-8} As . Če vzamemo, da sta plošči debeli po $b = 0,1 \text{ mm}$, je naboj negativne "tekočine" v vsaki od njiju $\rho_e b S = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ As/m}^3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 1,4 \cdot 10^4 \text{ As}$. Ta naboj je treba primerjati z bilijonkrat manjšim nabojem 10^{-8} As . Oceno smo naredili zato, da bi opozorili, kako majhen je presežek ali primanjkljaj naboja na kovini v primeri z nabojem negativne "tekočine" ali pozitivne "trdnine" v njej.

Leta 1734 je Francoz Charles-Francois de Cisternay du Fay razločil stekleno in smolnato električno. Prva se je nabrala na stekleni palčki, ko jo je podrgnil s krpo, in druga na smoleni. Štiri leta pozneje je njegov rojak Jean Theophile Desagulier ločil prevodnike od neprevodnikov, ki so dobili pozneje ime izolatorji. Tedaj so delali poskuse s telesi, ki so jih naelektrili z drgnjenjem. Poskusi z mirujočimi naboji in prvi poskusi s prevajanjem elektrike so sprožili razpravo, ali obstajata dve električni "snovi" – imeovali so ju *fluida* – ali ena. Po prvi možnosti bi izviral pozitivni naboj od pozitivne "snovi" in negativni od negativne "snovi", po drugi pa bi pozitivni naboj povzročal na primer primanjkljaj in negativnega presežek edine "snovi". V razpravo sta se vključila tudi Benjamin Franklin kot zagovornik teorije ene snovi ter Franz Ulrich Theodor Aepinus kot zagovornik teorije dveh snovi.

Naša slika z dvema "snovema", od katerih ena potuje in druga ne, ima poteze ene in druge zamisli. Omenimo še to, da so fluide šteli k snovem z nemerljivo majhno težo, ker niso mogli ugotoviti, da bi se teža telesa zaradi naboja kaj spremenila.

Kvadratni milimeter preseka v bakrenem vodniku prenese tok do 10 A . Predpis, da naj tok ne preseže 10 A na mm^2 preseka ali 10^7 A na m^2 preseka, velja za napeljave, ker bi se pri večjem toku in enakem preseku

vodniki preveč greli. Glede na to je mogoče ugotoviti hitrost negativne "tekočine" v bakru. Za naboj, ki se pretoči skozi presek vodnika S , velja $e = \rho_e V = \rho_e Svt$, tako da je tok na enoto preseka $I/S = (e/t)/S = \rho_e v$ in hitrost

$$v = \frac{I}{S\rho_e} = \frac{10^7 \text{ Am}^{-2}}{1,4 \cdot 10^{10} \text{ As/m}^3} = 7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Hitrost okoli $\frac{3}{4}$ milimetra na sekundo je majhna, hitrost pri manjšem toku na enoto preseka je še manjša. V vodniku se giblje negativna "tekočina" s to hitrostjo od negativnega priključka proti pozitivnemu, to je v nasprotni smeri od dogovorjene smeri toka.

Kaj bi opazili, če bi se s to hitrostjo gibali vstric z negativno "tekočino"? Pozitivna "trdnina" bi se gibala z enako veliko hitrostjo v nasprotni smeri. Naboj nasprotnega znaka z enako gostoto ρ_e v nasprotni smeri bi dal enak tok. Tudi za opazovalca, ki se giblje ob vodniku s kako drugo hitrostjo, tok ni odvisen od velikosti te hitrosti, ker prispevata k toku negativna "tekočina" in pozitivna "trdnina", ki potujeta v nasprotnih smereh. Potemtakem pozitivna "trdnina" ne izravna samo naboja negativne "tekočine", ampak za opazovalca, ki se giblje glede na vodnik, tudi prispeva k toku.

Doslej smo mislili le na enosmerni tok. V omrežju pa uporabljamo izmenični tok s frekvenco $\nu = 50 \text{ s}^{-1}$. Izmenični tok z amplitudo I_0 ima enak učinek kot enosmerni tok $I_{ef} = I_0/\sqrt{2}$. Toku $I_{ef} = 10 \text{ A}$ pri vodniku s presekom 1 mm^2 ustreza potemtakem amplituda hitrosti $v_0 = \sqrt{2} \cdot 0,7 = 1 \text{ mm/s}$. Za amplitudo hitrosti velja enačba $v_0 = 2\pi\nu s_0$, tako da je amplituda odmika

$$s_0 = \frac{v_0}{2\pi\nu} = 0,003 \text{ mm}.$$

Negativna "tekočina" v vodniku z izmeničnim tokom z majhno amplitudo niha sem in tja.

Odseku vodnika dovajamo električno delo, ki ga vodnik odda v obliki toplote, če ima konstantno temperaturo. Pojav ne more nastati drugače kot zaradi sodelovanja gibajoče se negativne "tekočine" z mirujočo pozitivno "trdnino". Primerjamo ga lahko s potiskanjem vode skozi luknjičasto plast žgane glinice. Pri tem glina odda toploto, enako dovedenemu delu tlaka, če je njena temperatura konstantna.

Iz zveze $Ue = Pt$ sledi za oddano toplotno moč $P = Ue/t = UI = RI^2 = \zeta(l/S)I^2 = \zeta l S (I/S)^2 = \zeta V (I/S)^2$. Uporabili smo Ohmov zakon $U = RI$ in enačbo za upor vodnika $R = \zeta l/S$. Specifični upor bakra je $\zeta = 0,017 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Vm/A}$. Pri toku 10 A skozi

vodnik s presekom 1 mm^2 vsak kubični centimeter bakrenega vodnika odda 1,7 joula v sekundi.

Model, v katerem električni tok po kovini pojasnimo z negativno “tekočino” in pozitivno “trdnino”, ki ju obravnavamo kot zvezni “snovi”, ima svoje meje. Tudi vodo, ki teče po cevi, velikokrat obravnavamo kot zvezno snov. Samo včasih se s tem opisom ne zadovoljimo in upoštevamo njeno zgradbo iz molekul. Podobno je pri toku po kovinah. Atomsko zgradbo bomo upoštevali v naslednjem koraku in razjasnili nekaj vprašanj, ki smo jih obšli.

Janez Strnad