

# 1. Uvod v elektrodinamiko

Vse do 19. stoletja fizika ni poznala povezav med navidez različnimi električnimi pojavi, magnetnimi pojavi in svetlobo. André-Marie Ampère (1826) in Michael Faraday (1831) sta odkrila povezavi med električnimi in magnetnimi pojavi v obe smeri. James Clerk Maxwell (1861) je vse dotedanje znanje o elektriki in magnetiki združil v slovite enačbe, ki danes nosijo njegovo ime. Maxwell je iz svojih enačb napovedal tudi elektromagnetno valovanje oziroma povezavo med električnimi in magnetnimi pojavi ter svetlobo, kar je Heinrich Rudolf Hertz potrdil s poskusi leta 1889.

Z odkritjem novih pojavov so se pojavila tudi nova vprašanja. Kaj poganja električno polje? Kaj poganja magnetno polje? Po kakšni snovi potuje elektromagnetno valovanje? Delce, ki poganjajo polja in skrivnostno snov, poimenovano »eter«, po kateri potuje elektromagnetno valovanje, so iskali številni znanstveniki. Albert Abraham Michelson je v iskanju skrivnostne snovi napravil številne poskuse. Najbolj znan je njegov poskus z interferometrom iz leta 1887, ki je bil zadosti natančen, da je dokazal, da skrivnostni »eter« ne obstaja. Danes ta poskus velja kot najbolj znan »neuspeli« poskus v fiziki, ki je v resnici sprožil razvoj teorije relativnosti.

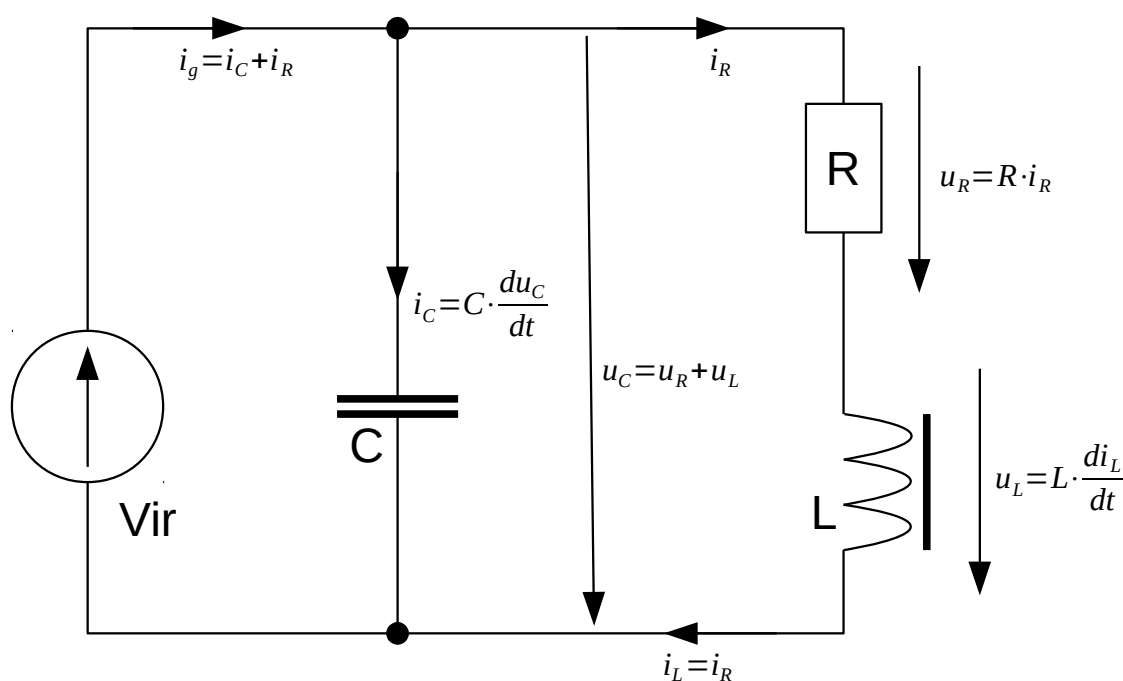
Dokončno je vse tri pojave razložil Albert Einstein v posebni teoriji relativnosti (1905). Električna sila je ena od štirih osnovnih fizikalnih sil, ki nastane med dvema elektrinama (električnima naboje) tudi v popolnoma praznem prostoru (vakuumu), je premo sorazmerna velikosti obeh nabojev in obratno sorazmerna razdalji. Relativistika z zahtevo po končni hitrosti svetlobe razloži še dva pojave. Enakomerno gibajoče elektrine ustvarjajo magnetno polje, kar nakazujejo že relativistični skrčki dolžin (Hendrik Lorentz 1892). Pospešene elektrine sevajo elektromagnetno valovanje. Podobne zakonitosti veljajo tudi za težnost, kjer mase nadomeščajo elektrine.

Inženirji elektrotehnike skušamo zahtevno relativistiko v primeru električne sile poenostaviti. Ko so pojavi počasni in razdalje majhne, so zakasnitve zaradi končne hitrosti svetlobe nepomembne. Opazimo le električne in magnetne pojave. Sevanje elektromagnetnega valovanja smemo tedaj zanemariti.

Ker je hitrost gibanja elektronov običajno zelo majhna v primerjavi s hitrostjo svetlobe, so magnetne sile zelo majhne v primerjavi z električnimi. Magnetne pojave opazimo samo zato, ker se velika večina električnega polja

premikajočih elektronov v prevodniku (gibljivi elektroni v kovini) odšteje od polja nepremičnih elektronov obratnega predznaka (kristalna mreža kovine). Magnetni pojavi so tista majhna sprememba polja enakomerno gibajočih elektronov, ki jo zahteva relativistika.

Počasni pojavi in majhne razdalje omogočajo opis poenostavljene naloge s koncentriranimi gradniki vezja: električne pojave skrčimo v kondenzator, magnetne pojave skrčimo v tuljavo itd. Izmere gradnikov in razdalje med njimi so v takšni poenostavljeni nalogi nepomembne. Končno nalogo rešujemo z načrtovanjem električnega vezja z znanimi gradniki:



Električno vezje je naloga z nič dimenzijami.

Električno vezje je v resnici naloga z nič dimenzijami, saj so izmere gradnikov in razdalje med njimi nepomembne. Povezave med napetostmi in tokovi v električnem vezju opisuje peščica preprostih enačb. Lep del elektrotehničnih nalog lahko opišemo in rešimo z električnimi vezji, kar predstavlja pomembno poenostavitev glede na izvirne Maxwellove enačbe.

Žal električna vezja niso povsod uporabna. Nekatere naloge zahtevajo za svoj opis neskončno število gradnikov. Nekaterih električnih nalog sploh ne moremo opisati z vezjem z nič dimenzijami. Na primer, kako opisati gretje

črnega mačka na zimskem Soncu, kar je v vseh pogledih prava električna naloga?

Električno vezje nam ne zadošča v dveh primerih: ko so izmere naloge velike oziroma ko so pojavi hitri, torej je frekvenca izmeničnih električnih veličin zelo visoka. Z drugimi besedami, primerjati moramo izmere naprave z valovno dolžino elektromagnetnega valovanja.

Ko so izmere naprave zelo majhne v primerjavi z valovno dolžino, zadošča opis naprave z vezjem z nič dimenzijami. Ko so izmere naprave primerljive z valovno dolžino, potrebujemo drugačen pristop in s tem se ukvarja elektrodinamika. Končno, optika nam opisuje zelo velike naprave v primerjavi z valovno dolžino, kar je spet poenostavitev splošne elektrodinamike.

Kje potrebujemo zahtevnejši opis elektrodinamike? Pri načrtovanju elektronskega mikročipa zagotovo ne. Izmere čipa so majhne, tam so velika električna polja, torej gre vse v okviru elektrostatike. Tokovi v čipu so lahko veliki, ampak površine zank so majhne, magnetni pretoki so majhni in indukcijo lahko zanemarimo. Če mikročip ne vsebuje svetlobnih gradnikov (fotodiod, svetlečih diod oziroma polprevodniških laserjev), je sevanje elektromagnetnega valovanja zanemarljivo.

Zahtevnejši opis zagotovo potrebujemo v telekomunikacijah. Razdalje so velike, saj želimo komunikacije na velike razdalje. Visoko zmogljivost zveze omogoča edino velika pasovna širina, torej visoke frekvence. Elektrodinamika postane najprej pomembna prav s telegrafsko enačbo (Oliver Heaviside 1880). Mikročipi postajajo čedalje hitrejši, da že povezave med njimi zahtevajo poznavanje elektrodinamike. Kljub nizki frekvenci komaj 50Hz so postala danes elektroenergetska omrežja tako velika, da potrebujemo elektrodinamiko celo v energetiki.

Kako opisati elektrodinamiko na čimbolj preprost, ampak uporaben način, ki daje zadovoljivo natančnost rezultatov? Naloge z eno veliko izmero, to se pravi eno-dimenzijske naloge lahko opišemo s porazdeljenimi gradniki, torej z vezji z neskončnim številom gradnikov. Kljub izhodišču iz preprostih osnov elektrotehnike in izogibanju relativistiki, rešitve nalog takoj pokažejo na ključno veličino, to je hitrost svetlobe.

Tri-dimenzijske naloge potrebujejo zahtevnejši pristop. Elektrotehnikom so Maxwellove enačbe vsekakor preprostejše za razumevanje od zahtevne relativistike. Maxwellove enačbe je treba pretvoriti v diferencialno obliko, da postane naloga zadosti majhna, torej diferencialno majhna. V diferencialno

majhni nalogi so zakasnitve diferencialno majhne, torej relativistika ne nagaja. Tu žal brez zahtevne matematike, diferencialne geometrije v različnih tri-dimenzijskih koordinatnih sistemih v prostoru ne gre.

V elektrodinamiki lahko energija potuje tudi po povsem praznem prostoru. Gostoto pretoka moči nam opisuje Poyntingov vektor. Rešitev parcialne diferencialne valovne enačbe za električno oziroma magnetno polje ni preprosta. Pojav sevanja, ki je osnova brezvrvičnih zvez, najlažje izpeljemo z uvedbo nove vmesne veličine, vektorskega potenciala.

Točna obravnava ravninskega elektromagnetnega valovanja v elektrodinamiki nam preprosto opiše odboj, lom in tuneliranje valovanja na mejah različnih snovi. Vsota več različnih ravninskih valov nam omogoča opis novih naprav, kot sta kovinski valovod oziroma votlini rezonator. Točna obravnava valovanja v izgubni snovi nam razloži kožni pojav v kovinah pri visokih frekvencah, ki spreminja porazdelitev toka po preseku kovinskega vodnika in povečuje izgube.

Ta učbenik skuša odgovoriti na izziv, kako poučevati elektrodinamiko na sodoben način, izpustiti manj pomembna področja in dodati vse tisto, kar uporablja sodobna telekomunikacijska tehnika. Kljub temu, da so izpeljave v tem učbeniku skrčene na najmanjšo možno mero, elektrodinamika še vedno zahteva dobro poznavanje matematike in osnov elektrotehnike. Kjer je le možno, je poleg poštene a zahtevne rešitve Maxwellovih enačb navedena tudi preprosta razlaga pojavov s pojmi električnih vezij.

Elektrodinamika je osnova za razumevanje delovanja gradnikov terminalne opreme, sprejemnikov in oddajnikov ter vseh prenosnih poti v telekomunikacijah, tako brezvrvičnih radijskih in svetlobnih zvez kot vrvičnih zvez po kovinskih vodnikih in steklenih svetlobnih vlaknih.

\* \* \* \* \*