



Andrej Tirpák

Elektromagnetizmus

ELEKTROMAGNETIZMUS

Doc. RNDr. Andrej TIRPÁK, CSc.

Katedra rádiofyziiky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Bratislava

2. opravená verzia

Bratislava 2004

Kniha bola odmenená prémiou Literárneho fondu SR za rok 1999

This textbook is a comprehensive introduction to the study of electromagnetic phenomena at the undergraduate level. The book is suitable to students of physics and electrical engineering at the universities, technological institutes, partly to students in non-technical branches of universities like the biology, medicine, agriculture, etc. It can also be useful to the postgraduate students, scientists and to all interested in modern approaches to the electromagnetic theory.

Besides the classical parts of electromagnetism like the electrostatics, magnetostatics and electrodynamics the book deals with such modern subjects of electromagnetism like the superconductivity, Josephson effect, quantum Hall-effect, electron-spin resonance (ESR), nuclear magnetic resonance (NMR) as a modern tool of medical diagnostics. Various older and recent methods of the measurements of the velocity of the light are described. Special attention is paid to the magnetism of matter, modern magnetic materials and their applications. In the chapter dealing with electromagnetic waves the transfer of electromagnetic signals by transmission lines is described in some detail.

The textbook involves the fundamentals of vector algebra and some differential operations on scalar and vector fields. Detailed explanation of concept of gradient, divergence and curl are also given. The essential mathematical prerequisites for the subjects discussed in this book are integral calculus, linear real and complex algebra. Some acquaintance with differential equations would be helpful, but not strictly essential.

The textbook includes 326 selected and solved problems.

Recenzenti: Prof. RNDr. Viktor Bezák, DrSc.
Prof. Ing. Matej Rákoš, DrSc.

Prvé knižné vydanie 1999

ISBN 80-88780-26-8

Obálku navrhol Doc. RNDr. Andrej Tirpák, CSc. a RNDr. František Kundracik, CSc.

© 1999 Doc. RNDr. Andrej Tirpák, Csc.
Rukopis neprešiel jazykovou úpravou

Všetkým mojim študentom, minulým aj súčasným,
ktorí dávali mojej práci zmysel a robili z nej potešenie

Učebnica "Elektromagnetizmus" vznikla z dvoch príčin. Prvou je neustály nedostatok univerzitných učebníc základného kurzu fyziky, druhou príčinou je môj snád' nie neskromný názor, že v priebehu viac ako dvadsať rokov prednášky z elektromagnetizmu som nadobudol istý pohľad na didaktické problémy predmetu. Tento pohľad považujem za pôvodný, a na jeho základe predkladám pojednanie o elektromagnetizme snád' trochu netradičné. Názov "Elektromagnetizmus" uprednostňujem pred doteraz používaným názvom "Elektrina a magnetizmus" ktorý je zastaralý a neodráža dnešné chápanie elektromagnetických javov v svojej vnútornej nedeliteľnej jednote. Členenie textu je takmer klasické, teda také, ktoré sa rokmi z hľadiska návaznosti výkladu, a tým aj zrozumiteľnosti dokonale osvedčilo. Rozsah je limitovaný množstvom informácií, ktoré učiteľ dokáže analyzovať a študent absorbovať v rámci základného kurzu fyziky prednášaného na matematicko-fyzikálnych, prírodovedeckých a technických fakultách našich univerzít. Do textu z toho dôvodu neboli zahrnuté napr. elektrické meracie prístroje a meracie metódy (s výnimkou merania magnetických polí), technológia výroby elektrotechnických a elektronických súčiastok a pod. S nimi sa študent oboznámi v praktických cvičeniach. Teórie elektrickej vodivosti tuhých látok, kvapalín a plynov sú dnes samostatné vedné oblasti. Moderná obvodová elektronika sa stala disciplínou silne poznačenou technologickými problémami výroby integrovaných obvodov a jej výklad na niekoľkých stranách by bol nemožný. Na druhej strane, do textu boli zahrnuté niektoré moderné fyzikálne javy, ktoré posunuli naše poznanie sveta dopredu a zásadne ovplyvnili technický rozvoj. Takými javmi sú napr. jadrová magnetická rezonancia, supravodivosť, kvantový Hallov jav, Josephsonov jav a iné. Učebnica obsahuje 326 riešených úloh.

Jazyk učebnice nie je strohým rigidným jazykom vedeckých traktátov a odborných publikácií, ale skôr jazykom fyzika v laboratóriu, na seminároch alebo prednáškach. Chcem tým demonštrovať, že fyzika je humánna a pekná vedecká disciplína, a domnievam sa, že aj čitateľom-študentom bude tento jazyk viac vyhovovať. Či sa mi to podarilo – to nech už posúdia používatelia učebnice! Aj pri voľnejších jazykových prístupoch som sa však snažil o maximálnu presnosť formulácií pri využití tých matematických prostriedkov, ktorými možno tvoriť základnú učebnicu elektromagnetizmu.

Učebnica by nebola vznikla bez podpory a pomoci mojich spolupracovníkov a priateľov. RNDr. Peter Kohaut celý text počas jeho vzniku priebežne čítal, upozorňoval ma na jeho odborné a jazykové nedostatky a pomohol mi pri kreslení obrázkov. Patrí mu za to moja najsrdečnejšia vďaka. Ďakujem i kolegom z Katedry rádiofyziky MFF UK doc. RNDr. Andrejovi Jaroševičovi, CSc., RNDr. Františkovi Kundracikovi, CSc., a kolegovi doc. RNDr. Teodorovi Obertovi, CSc. z Katedry chemickej fyziky ChTF STU za ich ochotu k diskusiám. Osobitné poďakovanie patrí recenzentom Prof. Ing. Matejovi Rákošovi, DrSc. a Prof. RNDr. Viktorovi Bezákovi, DrSc., ktorých pripomienky k textu pomohli podstatne zvýšiť kvalitu mojej práce.

V elektronickej verzii tejto učebnice sú predovšetkým odstránené zistené chyby, spresnené niektoré formulácie, upresnené fyzikálne konštanty podľa najnovších údajov, rozšírený zoznam použitých symbolov veličín a ich jednotky v SI-sústave. Ďakujem všetkým kolegom, ale predovšetkým doc. RNDr. Františkovi Kundracikovi, PhD. a Mgr. Mikulášovi Praščákovi za pomoc pri objavovaní chýb v nádeji, že ich počet bude postupne konvergovať k nule.

Máj 2004



Obsah

Zoznam symbolov veličín a ich jednotky v SI-sústave	10
Tabuľka fyzikálnych konštánt	11
Úvod	13
1 Elektrické náboje	15
1.1 Základné vlastnosti elektrických nábojov	15
1.2 Mikroskopické nosiče elektrických nábojov	16
1.3 Pojem bodového náboja a hustoty náboja v klasickej elektrodynamike	19
2. Elektrostatika nábojov vo vákuu	21
2.1 Silové pôsobenie nábojov. Coulombov zákon	21
2.2 Elektrické pole. Intenzita elektrického poľa	25
2.3 Intenzita elektrického poľa nábojov spojito rozložených na čiarach, plochách a v objeme	33
2.4 Gaussov zákon. Tok vektora plochou	42
2.5 Výpočet intenzít elektrických polí s využitím Gaussovho zákona	48
2.6 Divergencia elektrického poľa. Gaussova veta	56
2.7 Divergencia vektorového poľa v pravouhlých súradniciach	60
2.8 Elektrický potenciál	62
2.8.1 Práca v elektrostatickom poli	62
2.8.2 Výpočet potenciálových funkcií rôznych nábojových rozložení	66
2.8.3 Gradient skalárnej funkcie.	
Vzťah medzi intenzitou a potenciálom elektrostatického poľa	76
2.9 Pole elektrostatického dipólu a vyšších multipólov	80
2.9.1 Bodový elektrostatický dipól	80
2.9.2 Energia dipólu v elektrostatickom poli	85
2.9.3 Silové účinky elektrostatického poľa na dipól	86
2.10 Multipólový rozklad potenciálu	87
2.11 Potenciál a pole elektrickej dvojvrstvy	89
2.12 Rotácia vektorovej funkcie. Diferenciálne operátory polí	93
2.12.1 Rotácia elektrostatického poľa. Stokesova veta	93
2.12.2 Rotácia vektorovej funkcie v pravouhlých súradniciach	97
2.12.3 Diferenciálne operátory vektorových polí. Poissonova a Laplaceova rovnica	100
Úlohy 1 – 37	104
3 Elektrostatické pole za prítomnosti vodičov	109
3.1 Nabitý vodič a jeho elektrostatické pole	109
3.2 Nenabitý vodič v elektrostatickom poli	113
3.3 Experimentálny dôkaz platnosti zákona prevrátených kvadrátov v elektrostati	117
3.4 Výpočet elektrostatických polí nábojov na vodičoch	118
3.5 Kapacita vodičov a kondenzátorov	122
3.6 Elektrické obvody s kondenzátormi	128
3.7 Energia elektrostatického poľa. Energia nabitého kondenzátora	135
3.7.1 Energia sústavy bodových nábojov	135
3.7.2 Energia elektrostatického poľa	136
3.7.3 Elektrická energia nabitého kondenzátora	137
Úlohy 38 – 64	139

4. Elektrostatické pole v dielektriku	144
4.1 Polarizácia dielektrika. Vektor polarizácie	144
4.2 Gaussov zákon v dielektriku	149
4.2.1 Vektor D	151
4.3 Permittivita a elektrická susceptibilita dielektrika	152
4.4 Dielektrické materiály	155
4.5 Elektrické pole na rozhraní dvoch prostredí. Hraničné podmienky	157
4.6 Energia elektrického poľa v dielektriku	159
4.7 Kondenzátor s dielektrikom.	
Premeny energie v kondenzátore a sily pôsobiace na dielektrikum	161
4.8 Mikrofyzikálna podstata polarizácie dielektrika	167
4.8.1 Elektrónová polarizácia	167
4.8.2 Nepolárne plyny a kvapaliny. Clausiusov-Mossottioho vzťah	170
4.8.3 Polárne látky. Orientačná polarizácia	172
Úlohy 65 – 96	177
5 Elektrický prúd	183
5.1 Pohyb elektrických nábojov. Elektrický prúd	183
5.1.1 Vlastnosti elektrických prúdov. Klasifikácia prúdov	183
5.1.2 Zákon zachovania elektrického náboja. Rovnica spojitosti elektrického prúdu	188
5.1.3 Prvý Kirchhoffov zákon (Kirchhoffov zákon pre prúdy)	189
5.2 Ohmov zákon	190
5.2.1. Základy teórie vodivosti kovov a polovodičov	195
5.3 Elektromotorické napätie zdroja	198
5.4 Jednoduchý elektrický obvod	199
5.5 Prenos energie v elektrickom obvode. Joulov zákon	203
5.6 Elektrická sieť	207
5.6.1 Ohmov zákon pre časť uzavretého obvodu	207
5.6.2 Druhý Kirchhoffov zákon (Kirchhoffov zákon pre napätia)	209
5.7 Princípy analýzy elektrických sietí	211
5.7.1 Wheatstonov most	211
5.7.2 Metóda obvodových prúdov	213
5.7.3 Metóda uzlových potenciálov	214
5.7.4 Dve vety z teórie elektrických sietí	216
5.8 Elektrický prúd v RC obvode. Prechodový jav v RC obvode	219
Úlohy 97 – 151	226
6 Magnetizmus elektrických prúdov	236
6.1 Magnetické pole elektrického prúdu	239
6.1.1 Magnetické silové pôsobenie dvoch bodových nábojov vo vákuu	239
6.1.2 Magnetické pole prúdu elektrických nábojov	245
6.1.3 Biotov-Savartov-Laplaceov zákon	246
6.1.4 Magnetická indukcia v okolí nekonečne dlhého priameho prúdovodiča	247
6.1.5 Divergencia magnetického poľa. Nežriedlosť magnetického poľa ako jedna z jeho základných vlastností	249
6.1.6 Ampérov zákon. Rotácia magnetického poľa. Vírovosť magnetického poľa ako jedna z jeho základných vlastností	253
6.1.7 Vektorový potenciál	255
6.1.8 Vektorový potenciál priameho nekonečného prúdovodiča	257
6.1.9 Výpočet niektorých dôležitých magnetických polí	260
6.2 Intenzita magnetického poľa	272
6.3 Maxwellov posuvný prúd	274
6.4 Silové účinky magnetických polí na prúdové obvody	277
6.4.1 Prúdová slučka v magnetickom poli	278

6.4.2	Vzájomné silové pôsobenie elektrických prúdov. Definícia jednotky ampér (A)	281
6.5	Lorentzove transformácie elektromagnetických polí	283
	Úlohy 152 – 193	294
7	Elektromagnetická indukcia	303
7.1	Experimentálne základy elektromagnetickej indukcie	303
7.2	Lenzov zákon	306
7.3	Teoretické princípy elektromagnetickej indukcie	307
7.4	Základné aplikácie zákona elektromagnetickej indukcie	310
7.5	Samoindukcia a vzájomná indukcia. Indukčnosť a vzájomná indukčnosť	314
7.5.1	Výpočet indukčností a vzájomných indukčností	321
7.6	Vplyv sekundárneho prúdu na pomery v primárnom obvode	326
7.7	Energetické úvahy v obvode <i>RL</i> . Energia magnetického poľa	328
7.7.1	Hustota energie magnetického poľa	331
7.8	Elektrický prúd v obvode <i>RL</i> . Prechodový jav v obvode <i>RL</i>	332
7.9	Prechodový jav v obvode <i>RLC</i> . Voľné kmity v obvode <i>RLC</i>	335
7.9.1	Kvalita kmitavého obvodu	343
	Úlohy 194 – 223	346
8	Magnetizmus látok	352
8.1	Magnetické vlastnosti atómov	353
8.2	Makroskopická teória magnetizmu látok	358
8.2.1	Vektor magnetizácie	358
8.2.2	Ampérov zákon pre látkové prostredia	360
8.2.3	Vektor H	362
8.2.4	Magnetické pole na rozhraní dvoch prostredí. Hraničné podmienky	366
8.3	Mikroskopická teória diamagnetizmu a paramagnetizmu	369
8.3.1	Diamagnetizmus	369
8.3.2	Paramagnetizmus	373
8.4	Fenomenologická teória feromagnetizmu	377
8.4.1	Hysterézná slučka	380
8.4.2	Magnetostrikcia a magnetoelastický jav	385
8.4.3	Klasifikácia a výroba feromagnetických materiálov	386
8.4.4	Permanentné magnety	389
8.4.5	Elektromagnety	391
8.4.6	Magnetické obvody	395
8.4.7	Experimentálne snímanie magnetizačných kriviek a hysteréznej slučky	397
8.4.7.1	Balistická metóda	397
8.4.7.2	Dynamické snímanie hysteréznej slučky	399
8.5	Meranie magnetických polí	399
8.5.1	Indukčné metódy	399
8.5.2	Hallovo jav	400
8.5.3	Kvantový Hallov jav	403
8.5.4	Jadrová magnetická rezonancia a elektrónová paramagnetická rezonancia	403
8.6	Supravodivosť	409
8.6.1	Josephsonov jav	415
8.7	Maxwellove rovnice a klasická elektrodynamika	417
	Úlohy 224 – 230	419
9	Striedavé elektrické prúdy	422
9.1	Charakteristiky striedavých elektrických priebehov	422
9.2	Harmonické napätia a prúdy	425

9.2.1 Harmonické napätia na prvkoch <i>RLC</i> obvodu	425
9.2.2 Harmonický prúd v obvode <i>RLC</i>	427
9.2.3 Harmonický prúd v obvodoch <i>RC</i> a <i>RL</i>	429
9.3 Výkon striedavého prúdu	431
9.4 Symbolicko-komplexná metóda analýzy obvodov so striedavými prúdmi	434
9.5 Komplexný výkon	438
9.5.1 Objemové harmonické prúdy v nedokonalých dielektrikách Stratový uhol dielektrika. Objemová hustota výkonu	440
9.6 Striedavé elektrické siete. Pojem admitancie a susceptancie	443
9.6.1 Kirchhoffove zákony pre elektrické siete s harmonickými prúdmi	445
9.7 Vynútené kmity v <i>RLC</i> obvodoch. Sériová a paralelná rezonancia	447
9.7.1 Sériový rezonančný obvod	447
9.7.2 Paralelný rezonančný obvod	453
9.7.3 Napájanie rezonančných obvodov a ich použitie	458
9.8 Frekvenčné filtre	459
9.8.1 Dolnofrekvenčný <i>R-C</i> priepust	461
9.8.2 Hornofrekvenčný <i>R-C</i> priepust	464
9.8.3 Pásmový <i>R-C</i> priepust (Wienov delič)	465
9.8.4 Induktívne viazané obvody ako pásmový filter	467
Úlohy 231 – 276	474
10 Pohyb nabitých častíc v elektrických a magnetických poliach	486
10.1 Voľná nabitá častica v elektrickom poli	486
10.2 Pohyb nabitých častíc v statických magnetických poliach	490
10.3 Pohyb častíc pod súčasným účinkom elektrických a magnetických polí	494
10.3.1 Urýchľovanie nabitých častíc. Cyklotrón	495
10.3.2 Hmotnostný spektrograf alebo separátor izotopov	499
Úlohy 277 – 292	500
11 Elektromagnetické vlny	505
11.1 Podstata elektromagnetických vln	505
11.2 Vlnové rovnice	506
11.3 Rovinná elektromagnetická vlna	510
11.4 Tok výkonu v elektromagnetickej vlne. Poyntingov vektor	516
11.5 Povrchový jav (skin-efekt)	520
11.5.1 Jednorozmerný rovinný prípad	520
11.5.2 Povrchový jav vo valcovom vodiči	524
11.6 Základy teórie dlhých vedení	528
11.6.1 Prúdové a napät'ové vlny na dvojvodičových vedeniach	528
11.6.2 Impedancia na vedení a koeficient odrazu	534
11.6.3 Bezstratové dlhé vedenia	537
11.6.4 Stojaté vlny na bezstratových vedeniach	541
11.7 Meranie rýchlosti svetla	545
Úlohy 293 – 326	551
Dodatok I: Stručný prehľad vektorovej analýzy	556
Dodatok II: Súradnicové systémy	558
Niekoľko literárnych prameňov k predmetu "Elektromagnetizmus"	565
Riešenia úloh	567
Register	704

TABUĽKY

Tabuľka fyzikálnych konštánt	11
Tabuľka 1: Dipólové momenty molekúl	81
Tabuľka 2: Niektoré identity s nabla operátorom	103
Tabuľka 3: Koeficient f pre doskový kondenzátor	125
Tabuľka 4: Typy dielektrík a ich permitivity	156
Tabuľka 5: Permitivity a elektrická pevnosť vybraných materiálov	156
Tabuľka 6: Súbor vzťahov pre elektrické veličiny kondenzátorov	166
Tabuľka 7: Rezistivity a tepelné odporové koeficienty vybraných materiálov	194
Tabuľka 8: Koeficient k pre solenoid	322
Tabuľka 9: Susceptibility vybraných materiálov	366
Tabuľka 10: Vzťahy medzi magnetickými veličinami	367
Tabuľka 11: Magneticky mäkké materiály	388
Tabuľka 12: Magneticky tvrdé materiály	388
Tabuľka 13: Koncentrácie vodivostných elektrónov pre niektoré kovy	402
Tabuľka 14: Niektoré supravodivé prvky	410
Tabuľka 15: Niektoré supravodivé zliatiny	414
Tabuľka 16: Najdôležitejšie vlastnosti komplexných čísel	436
Tabuľka 17: Permitivita a stratový uhol materiálov v striedavých poliach	442
Tabuľka 18: Terminológia striedavých prúdov	446
Tabuľka 19: Decibelová škála	463
Tabuľka 20: Spektrum elektromagnetických vln	507
Tabuľka 21: Rýchlosť svetla vo vákuu	550
Tabuľka 22: Diferenciálne operácie na skalárnych a vektorových poliach	564
Tabuľka 23: Laplaceov operátor	565

Zoznam symbolov veličín a ich jednotky v SI-sústave

(Vektorové a komplexné veličiny sú tlačené tučnou kurzívou)

Symbol	Veličina	Jednotka v SI-sústave
\mathbf{A}	vektorový potenciál	Wb/m = T.m
A	práca	J
\mathbf{B}	vektor magnetickej indukcie	T
B	susceptancia, imaginárna časť admitancie	S
bei u	Besselova (funkcia) imaginárna argumentu u	—
ber u	Besselova (funkcia) reálna argumentu u	—
C	kapacita	F
	kapacita na jednotku dĺžky	F/m
c	rýchlosť svetla vo voľnom priestore (vo vákuu)	m/s
\mathbf{D}	vektor elektrickej indukcie	C/m ² = A.s/m ²
d	dĺžka vedenia	m
\mathbf{E}	vektor intenzity elektrického poľa	V/m
\mathcal{E}	elektromotorické napätie zdroja	V
e	elementárny náboj	C = A.s
e	základ prirodzených logaritmov	—
\mathbf{F}	vektor sily	N
f	frekvencia	Hz
G	vodivosť, reálna časť admitancie	S
	vodivosť na jednotku dĺžky dvojvodičového vedenia	S/m
\mathbf{H}	vektor intenzity magnetického poľa	A/m
I	stály elektrický prúd, amplitúda prúdu	A
I_{ef}	efektívna hodnota prúdu	
I^+, Γ	amplitúda postupujúcej a odrazenej prúdovej vlny	A
i	okamžitá hodnota prúdu	A
i, j, k	jednotkové vektory pravouhlého súradnicového systému	
\mathbf{J}, \mathbf{j}	prúdová hustota, amplitúda objemovej prúdovej hustoty	A/m ²
J_s	amplitúda plošnej prúdovej hustoty	A/m
j	imaginárna jednotka	—
\mathbf{K}	koeficient šírenia vlny	m ⁻¹
L	indukčnosť	H
	indukčnosť na jednotku dĺžky dvojvodičového vedenia	H/m
l	dĺžka	m
ln	prirodzený logaritmus	—
log	dekadický logaritmus	—
\mathbf{M}	vektor magnetizácie	A/m
	moment dvojice síl	N.m
M	vzájomná indukčnosť	H
\mathcal{M}	magnetomotorické napätie	A, Az
m	magnetický moment	A.m ²
Np	neper* – jednotka útlmu	*Np nie je SI jednotkou
n	počet	—
	koncentrácia	m ⁻³
n_0	jednotkový vektor normály	—
\mathbf{P}	vektor elektrickej polarizácie	C.m ⁻²

Symbol	Veličina	Jednotka v SI-sústave
p	elektrický dipólový moment	C.m
P	elektrický výkon	W
P_{kompl}	komplexný výkon	W
p	objemová hustota výkonu	W.m ⁻³
	okamžitý výkon	W
PSV	pomer stojatej vlny	—
Q	integrálny elektrický náboj	C = A.s
	kvalita rezonančného obvodu (faktor kvality)	—
q	elektrický náboj	C = A.s
R	elektrický odpor (rezistencia), reálna časť impedancie	Ω
	odpor na jednotku dĺžky dvojvodičového vedenia	Ω/m
r	pomer stojatej vlny	—
	polomer	m
r, φ, z	cylindrické (valcové) súradnice	m, rad (°), m
r, ϑ, φ	sférické (gul'ové) súradnice	m, rad (°), rad (°)
S	Poyntingov vektor	W/m ²
S	plocha	m ²
T	perióda	s
	absolútna teplota	K
t	čas	s
$\text{tg } \delta$	činiteľ strát, tangens stratového uhla dielektrika	—
U, U_0	stále napätie, amplitúda napätia	V
U_{ef}	efektívna hodnota napätia	V
U^+, U^-	amplitúda postupujúcej a odrazenej napäťovej vlny	V
V_m	skalárny magnetický potenciál pre vektor \mathbf{B}	Wb/m = T.m
\mathbf{v}	vektor rýchlosti	m/s
v_f	fázová rýchlosť vln	m/s
v_g	grupová (skupinová) rýchlosť	m/s
W	elektromagnetická energia	J = W.s
w_{elmag}	hustota energie elektromagnetického poľa	J/m ³
X	reaktancia, imaginárna časť impedancie	Ω
x, y, z	pravouhlé (kartézske) súradnice	m
Y	komplexná admitancia	S
	komplexná admitancia na jednotku dĺžky	S/m
Y_v	charakteristická admitancia vedenia	S
y	komplexná konduktivita	S/m
Z	komplexná impedancia	Ω
	komplexná impedancia na jednotku dĺžky	Ω/m
Z_v, Z_0	charakteristické (vlnové) impedancie TEM-vln	Ω
Z_0	charakteristická impedancia neohraničeného bezstratového dielektrika	Ω
Z_{00}	charakteristická impedancia voľného priestoru	Ω
z_{min}	vzdialenosť (kladná alebo záporná) uvažovanej roviny od minima stojatej vlny	m
α	koeficient útlmu (tlmenia)	m ⁻¹ , dB/m
β	fázový koeficient (fázová konštanta)	rad/m, °/m
β_0	fázový koeficient (fázová konštanta) v neohraničenom dielektriku	rad/m, °/m
γ	koeficient šírenia	m ⁻¹ , dB/m

Symbol	Veličina	Jednotka v SI-sústave
γ	konduktivita	S/m
	magnetomechanický (gyromagnetický) pomer	Hz/T = C/kg
δ	hĺbka vniku (skinová hĺbka)	m
	stratový uhol dielektrika	rad, °
ϵ_0	elektrická konštanta	F/m
ϵ	permitivita	F/m
ϵ^*	komplexná permitivita	F/m
ϵ_r	relatívna permitivita	—
η	účinnosť	—
ϑ	uhol	rad, °
	teplota v Celsiovej stupnici	°C
κ	elektrická susceptibilita	—
λ	vlnová dĺžka	m
λ_{kr}	kritická (medzná) vlnová dĺžka	m
λ_v	dĺžka vlny vo vlnovode	m
λ_0	dĺžka vlny vo voľnom priestore (vo vákuu)	m
μ	magnetický moment	A.m ²
μ	permeabilita	H/m
μ_0	magnetická konštanta (permeabilita voľného priestoru)	H/m
μ_r	relatívna permeabilita	—
π	kruhovú konštanta, Ludolfovo číslo	—
ρ	koefficient odrazu	—
ρ_U, ρ_I	koefficient odrazu napät'ovej alebo prúdovej vlny	—
ρ	rezistivita	$\Omega.m$
	objemová hustota náboja	$C/m^3 = A.s/m^3$
σ	konduktivita	S/m
	plošná hustota náboja	$C/m^2 = A.s/m^2$
τ	časová konštanta	s
	objem	m ³
Φ	magnetický indukčný tok	Wb
φ	uhol, fázový uhol	rad, °
φ_m	skalárny magnetický potenciál pre vektor \mathbf{H}	A
χ	magnetická susceptibilita	—, m ³ /kg, m ³ /kmol
Ψ	tok vektora \mathbf{E} alebo \mathbf{D}	V.m, C
Ω	priestorový uhol	rad
ω	uhlová frekvencia	rad/s

Tabuľka fyzikálnych konštánt¹

Veličina	Hodnota v SI sústave
Rýchlosť svetla vo voľnom priestore (vo vákuu) c	299 792 458 m.s ⁻¹ (presne)
Magnetická konštanta (permeabilita vákuu) μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H.m ⁻¹ (z definície)
Elektrická konštanta (permitivita vákuu) $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8,854\ 187\ 817 \cdot 10^{-12}$ F.m ⁻¹
Charakteristická impedancia voľného priestoru $Z_{00} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = \mu_0 c$	376,73 Ω
Elementárny náboj e	$1,602\ 176\ 462 \cdot 10^{-19}$ C (A.s)
Elektrónvolt eV	$1,602\ 176\ 462 \cdot 10^{-19}$ J
Pokojová hmotnosť elektrónu m_e	$9,109\ 381\ 88 \cdot 10^{-31}$ kg
Pokojová hmotnosť protónu m_p	$1,672\ 621\ 58 \cdot 10^{-27}$ kg
Pokojová energia elektrónu $m_e c^2$	$8,187\ 104 \cdot 10^{-14}$ J = $0,511 \cdot 10^6$ eV
Pokojová energia protónu $m_p c^2$	$1,503\ 277 \cdot 10^{-10}$ J = $0,938 \cdot 10^9$ eV
Planckova konštanta $h = 2\pi\hbar$	$6,626\ 068\ 76 \cdot 10^{-34}$ J.s
Bohrov polomer $a_0 = \hbar^2/(\pi\mu_0 c^2 e^2 m_e)$	$5,291\ 768\ 909 \cdot 10^{-11}$ m
Bohrov magnetón $\mu_B = e\hbar/(2m_e)$	$9,274\ 008\ 992 \cdot 10^{-24}$ A.m ² (J.T ⁻¹)
Jadrový magnetón $\mu_J = e\hbar/(2m_p)$	$5,050\ 783\ 182 \cdot 10^{-27}$ A.m ² (J.T ⁻¹)
Kvantum elektrickej vodivosti $\mathcal{G}_0 = 2e^2/h$	$7,748\ 091\ 694 \cdot 10^{-5}$ S
von Klitzingova konštanta $\mathcal{R}_0 = h/e^2$	$2,581\ 280\ 758 \cdot 10^4$ Ω
Kvantum indukčného toku $\Phi_0 = h/(2e)$	$2,067\ 833\ 637 \cdot 10^{-15}$ Wb
Josephsonova konštanta $K_J = 2e/h$	$4,835\ 978\ 979 \cdot 10^{14}$ Hz.V ⁻¹
Gravitačná konštanta κ	$6,673 \cdot 10^{-11}$ m ³ .kg ⁻¹ .s ⁻²
Avogadrova konštanta N_A	$6,022\ 141\ 99 \cdot 10^{26}$ kmol ⁻¹
Faradayova konštanta F	$9,648\ 534\ 15 \cdot 10^7$ C.kmol ⁻¹
Boltzmannova konštanta k	$1,380\ 650\ 3 \cdot 10^{-23}$ J.K ⁻¹

¹ Konštanty boli aktualizované podľa CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants (1998) – www.physics.nist.gov/constants



James Clerk MAXWELL
(1831 Edinburgh – 1879 Cambridge)

Úvod

"Pravda je to, čo obstojí v skúške skúsenosti"
Albert Einstein: Ako vidím svet

Predmet "Elektromagnetizmus" sa zaoberá štúdiom súboru javov, ktoré vznikajú ako dôsledok špecifického silového pôsobenia medzi tým, čo sme sa rozhodli nazvať elektrické náboje. Silové pôsobenie elektrických nábojov má dve stránky – elektrické a magnetické. Vzhľadom na neodmysliteľnú spätosť elektrických a magnetických javov a ich spoločnú podstatu je vhodnejšie tento súbor javov nazývať **elektromagnetizmus**, ako oddelene – elektrina a magnetizmus.

V kontexte fyziky zaujíma elektromagnetizmus výrazne popredné postavenie, jednak pre svoje obrovské praktické dôsledky, ale tiež preto, že predstavuje jednu z dôležitých stránok poznania sveta, v ktorom žijeme. Moderná, technicky vyspelá spoločnosť tvorí a využíva technické prostriedky, ktorých podstata spočíva v zákonoch elektromagnetizmu. Predovšetkým je to elektrická energetika. Dnes najrozšírejšia a najčistejšia forma energie je elektrická energia, aj keď spôsoby jej produkcie nie sú vždy ekologicky najčistejšie. Na princípoch elektromagnetizmu je založená činnosť takých médií, ako je telefón, rádio, televízia, záznam obrazu a zvuku a ich drôtový alebo bezdrôtový, prakticky okamžitý prenos na ľubovoľné miesto na zemeguli alebo do blízkeho kozmického priestoru. Pozemná, námorná a vesmírna navigácia sú nemysliteľné bez existencie elektromagnetizmu. V dvadsiatom storočí bolo vymyslené, skonštruované a do nepredstaviteľnej dokonalosti dovedené zariadenie, ktoré spôsobilo revolúciu vo vede, v technike a v ekonomike – elektronický počítač. Mobilné telefóny a internet poskytujú nebývalé možnosti poskytovania a získavania informácií, čo sa týka rýchlosti aj objemu. Možno len konštatovať, že pokrok civilizácie spoločnosti je determinovaný mierou využitia javov elektromagnetického pôvodu. Možno len konštatovať, že pokrok civilizácie spoločnosti je determinovaný mierou využitia javov elektromagnetického pôvodu.

Elektrické silové pôsobenia majú však principiálnejší význam, pretože na nich je založená existencia nášho materiálneho sveta. Vieme, že látky sa skladajú z atómov, a z molekúl. Naskytá sa otázka, čo drží atómy pohromade tak, že látka je v konečnom dôsledku tuhá alebo kvapalná? Chemici hovoria, že atómy v látke sú viazané chemickými väzbami. Áno, ale tieto väzby sú elektrického pôvodu. Medzi atómami látky pôsobia aj príťažlivé gravitačné sily (**gravitačné interakcie**), tie sú však v porovnaní s elektrickými silami (**elektromagnetické interakcie**) veľmi slabé, a tak ich pri interakcii častíc možno v prvom priblížení zanedbať. Gravitačné interakcie sú zodpovedné za sily v makrosfere, sú určujúce pre vznik a existenciu hviezdnych systémov a galaxií.

A nakoniec, aj na našej biologickej existencii sú podpísané zákony elektromagnetizmu. Nervové vlákna sú cestami, po ktorých sa šíria elektrické signály od receptorov do

mozgu, kde sa vyhodnocujú a sú podnetom pre našu biologickú a psychickú aktivitu. V istom zmysle je ľudská bytosť ten najdômyselnejší a najveľkolepejší elektronický mechanizmus pozostávajúci z dokonalého informačného a počítačového systému, ktorý sa sotva niekedy podarí umelo realizovať.

Veda o elektromagnetizme sa začala rozvíjať asi pred 250-timi rokmi a dnes možno povedať, že je najucelenejšou a najlepšie prepracovanou oblasťou fyziky. Bola budovaná fenomenologicky bez toho, aby jej tvorcovia poznali atomárnu štruktúru látok. Dnes sme fascinovaní skutočnosťou, že táto teória je konzistentná s modernými oblasťami fyziky, ako je kvantová mechanika, kvantová teória tuhých látok, a hlavne teória relativity, po zrodení ktorej začiatkom dvadsiateho storočia nebolo potrebné na stavbe elektromagnetizmu nič zásadného opravovať.

Na budovaní teórie elektromagnetizmu sa podieľalo mnoho vynikajúcich učencov. Spomenieme len niekoľkých, ktorých mená sú nezmazateľne spojené so základnými zákonmi elektromagnetizmu: Charles Augustin de COULOMB (1736 – 1806) – objavil a matematicky formuloval zákon o silovom pôsobení elektrických nábojov; André Marie AMPÈRE (1775 – 1836) – vykonal rozsiahle štúdie o silových účinkoch elektrického prúdu; Hans Christian OERSTED (1777 – 1851) – objavil silové pôsobenia elektrického prúdu na magnetku, čím sa potvrdila jednota elektrických a magnetických javov; Michael FARADAY (1791 – 1867) – objavil slávny zákon o elektromagnetickej indukcii; Karl Friedrich GAUSS (1777 – 1855) – vykonal a publikoval priekopnícke práce o vlastnostiach potenciálových polí (Gaussov zákon); Georg Simon OHM (1789 – 1854) – objavil vzťah medzi prúdom a napätím v lineárnych vodičoch; James Clerk MAXWELL (1831 – 1879) – vytvoril unifikovanú teória elektromagnetizmu aj s ohľadom na optické javy, formuloval štyri základné zákony elektromagnetizmu – Maxwellove rovnice; Hendrik Antoon LORENTZ (1853 – 1928) – prispel podstatnou mierou k objasneniu Maxwellovej teórie, k teórii elektrónu a k teórii relativity; Gustav Robert KIRCHHOFF (1824 – 1887) – formuloval zákony o elektrických sieťach popri principiálnejších zákonoch žiarenia čierneho telesa; Heinrich HERTZ (1857 – 1894) – experimentálne dokázal existenciu elektromagnetických vln; Albert EINSTEIN (1879 – 1955) – vypracoval špeciálnu a všeobecnú teóriu relativity.