OBSAH

Předmluva 13

I. Elektrostatika 17

1.1 Elektrický náboj 17

1.1.1 Vlastnosti elektrického náboje 17

1.1.2 Coulombův zákon 20

1.1.3 Velikost elektrického náboje 23

1.1.4 Hustota elektrického náboje 25

1.1.5 Potenciální energie soustavy nábojů 27

1.1.6 Řešené příklady 29

a) Rovnováha soustavy statických nábojů 29

b) Elektrostatická energie iontového krystalu 31

1.2 Elektrostatické pole ve vakuu 32

1.2.1 Vektor intenzity elektrostatického pole bodových nábojů 32

1.2.2 Tok intenzity elektrostatického pole bodových nábojů 33

1.2.3 Potenciál elektrostatického pole bodových nábojů 38

1.2.4 Elektrostatické pole obecně rozložených nábojů 42

1.2.5 Gaussův zákon pro obecné elektrostatické pole 46

1.2.6 Nabitá plocha v elektrostatickém poli 48

1.2.7 Poissonova a Laplaceova rovnice 50

1.2.8 Hustota energie elektrostatického pole 51

1.2.9 Řešené příklady 52

a) Nabitá přímka 53

b) Nabitá rovina 54

c) Dvojice rovnoběžných nabitých rovin 56

d) Nabitá rovinná vrstva 57

e) Nabitá kulová slupka 58

f) Nabitá koule 59

g) Nabitá nekonečná válcová plocha a válec 60

h) Pole a potenciál na ose nabité kružnice 61

i) Elektrostatické pole na ose válcové elektrody 62

j) Elektrostatické pole na ose kulového pásu 62

k) Elektrostatická energie nabité koule 63

1.3 Elektrický dipól 64

1.3.1 Vlastnosti elektrického dipólu 64

*1.3.2 Multipólový rozvoj elektrostatického pole 70

*1.3.3 Elektrická dvojvrstva 74

*1.3.4 Objemové rozložení elektrických dipólů 76

1.3.5 Řešené příklady 79

a) Síla působící mezi dvěma elektrickými dipóly 79

b) Elektrický kvadrupólový moment elipsoidu 80

c) Polarizovaný válec a rovinná vrstva 81
d) Polarizovaná koule 83
1.4 Elektrostatické pole nabitých vodičů 85
1.4.1 Vodiče a nevodiče 85
1.4.2 Chování vodičů v elektrostatickém poli 88
*1.4.3 Nepřímé ověření Coulombova zákona 91
1.4.4 Základní úloha elektrostatiky 95
1.4.5 Kapacita a kondenzátor 98
1.4.6 Energie soustavy nabitých vodičů 104
1.4.7 Řešené příklady 108
a) Bodový náboj a vodivá rovina 108
b) Kulové elektrostatické zobrazení 110
c) Vodivá koule v homogenním elektrostatickém poli 112
d) Kapacita kulového kondenzátoru 113
e) Kapacita válcového kondenzátoru 113
f) Kapacita dvoulinky 114
g) Mechanické napětí nabitých vodičů 115
h) Elektrostatické měřicí přístroje 116
1.5 Elektrostatické pole v dielektrikách 117
1.5.1 Dielektrika v elektrostatickém poli 117
1.5.2 Polarizace dielektrika 120
1.5.3 Gaussův zákon pro elektrostatické pole v dielektriku 122
1.5.4 Materiálové vztahy, elektrická susceptibilita a permitivita 124
*1.5.5 Energie elektrostatického pole v dielektriku 127
1.5.6 Řešené příklady 130
a) Volné náboje a nabité vodiče v dielektriku 130
b) Elektrické pole na rozhraní dvou dielektrik 131
c) Dielektrická koule a elipsoid v homogenním elektrostatickém poli 131
d) Pole v dutině vytvořené v homogenním dielektriku 133
Úlohy ke kapitole 1 134

2. *Silové působení mezi pohybujícími se náboji 139
2.1 Základní vztahy relativistické mechaniky 139
2.1.1 Einsteinův princip relativity 139
2.1.2 Lorentzova transformace 142
2.1.3 Relativistická dynamika 145
2.2 Pole pohybujících se nábojů 147
2.2.1 Pohybující se bodový náboj 147
2.2.2 Pole náboje pohybujícího se rovnoměrně malou rychlostí 150
2.2.3 Pole náboje pohybujícího se rovnoměrně libovolnou rychlostí 154
2.2.4 Pole náboje pohybujícího se libovolným způsobem 163
2.2.5 Řešené příklady 166
a) Pole přímého nábojového paprsku 166

b) Pole roviny vytvořené rovnoběžnými nábojovými paprsky 167
c) Síly působící mezi nábojovými paprsky 168
d) Transformace složek elektrického a magnetického pole 170

3. Stacionární pole 175
3.1 Elektrický proud 176
3.1.1 Pojem elektrického proudu, hustota proudu 176
3.1.2 Mechanismy vedení proudu 179
3.1.3 Rovnice kontinuity proudu 181
3.2 Stacionární elektrické pole a elektrický obvod 182
3.2.1 Základní vlastnosti stacionárního elektrického pole 182
3.2.2 Ohmův zákon pro homogenní vodiče 184
3.2.3 Ohmův zákon pro nehomogenní vodice 188
3.2.4 Kirchhoffova pravidla pro stacionární obvod 192
3.2.5 Práce a výkon v elektrickém obvodu, Jouleův zákon 194
3.2.6 Řešené příklady 197
a) Podobnost elektrostatického a stacionárního elektrického pole ... 197
b) Řazení odporů 199
c) Transformace hvězda trojúhelník 199
d) Výkonové přizpůsobení spotřebiče 200
3.3 Stacionární magnetické pole 201
3.3.1 Vektor magnetické indukce 202
3.3.2 Ampèrův zákon pro magnetické pole ve vakuu 204
3.3.3 Vektorový potenciál, Biotův–Savartův vzorec 207
*3.3.4 Magnetické pole v místech s nenulovou hustotou proudu, pole plošných proudů 213
3.3.5 Řešené příklady 215
a) Magnetické pole přímého vodice 216
b) Magnetická indukce na ose kruhového závitu 219
c) Magnetická indukce na ose solenoidu 219
d) Magnetická indukce toroidu 220
e) Vektorový potenciál homogenního pole a nekonečně dlouhého solenoidu 222
3.4 Magnetický dipól 223
3.4.1 Magnetický dipólový moment rovinné proudové smyčky 224
3.4.2 Potenciální energie a silové účinky magnetického pole na magnetický dipól 226
*3.4.3 Multipólový rozvoj magnetického pole 227
*3.4.4 Objemové rozložení magnetických dipólů 228
*3.4.5 Magnetická dvojvrstva 230
3.4.6 Řešené příklady 232
a) Magnetický dipólový moment nabité částice konající rovnoměrný kruhový pohyb 232

b) Magnetický dipólový moment rotující nabité koule 233
3.5 Magnetické pole v látkách 234
3.5.1 Chování látek v magnetickém poli 234
3.5.2 Magnetická polarizace (magnetizace) látek, magnetizační proudy 236
3.5.3 Ampèrův zákon v látkovém prostředí 240
3.5.4 Materiálové vztahy, magnetická susceptibilita a permeabilita 242
3.5.5 Magnetický obvod 247
3.5.6 Magnetostatické pole 250
3.5.7 Řešené příklady 252
a) Magnetické pole na rozhraní dvou prostředí 252
b) Toroidní jádro se vzduchovou mezerou 253
c) Koule v homogenním magnetickém poli 255
d) Elipsoid magnetovaný ve směru hlavní osy. 256
Úlohy ke kapitole 3 258

4. Kvazistacionární elektrické a magnetické pole 261
4.1 Elektromagnetická indukce 262
4.1.1 Zákon elektromagnetické indukce 262
4.1.2 Souvislost mezi elektromagnetickou indukcí a silovými účinky magnetického pole 265
a) Pohyb přímého vodiče v homogenním magnetickém poli 265
b) Princip elektrického stroje 266
c) Princip fluxmetru 269
4.1.3 Obecné vlastnosti kvazistacionámího pole 271
4.1.4 Vlastní a vzájemná indukčnost vodičů 275
4.1.5 Řešené příklady 277
a) Demonstrace platnosti Ampèrova zákona (měřicí transformátor) . 277
b) Vlastní indukčnost přímých vodičů 279
c) Vlastní indukčnost kruhové smyčky. 280
d) Vlastní indukčnost solenoidu. 281
e) Vlastní indukčnost toroidu 281
f) Vzájemná indukčnost dvou souosých smyček. 282
g) Vzájemná indukčnost dvojice souosých válcových cívek. 283
4.2 Kvazistacionární elektrický obvod. 284
4.2.1 Kirchhoffova pravidla pro kvazistacionární obvod 284
4.2.2 Generace střídavého harmonického napětí, střídavé obvody 289
4.2.3 Indukčně vázané obvody, transformátor. 294
4.2.4 Řešené příklady 299
a) Neustálený stav v obvodech s indukčností a kapacitou 299
b) Sériový rezonanční obvod. 301
c) Vlastní kmity indukčně vázaných oscilačních obvodů 304
4.3 Energie kvazistacionárního pole 306
4.3.1 Zákon zachování energie v kvazistacionárních soustavách. 306

*4.3.2 Obecné vyjádření energie magnetického pole 308
*4.3.3 Obecné vyjádření sil v magnetickém poli 312
4.3.4 Řešené příklady 314
a) Síly působící mezi póly elektromagnetu 314
b) Hysterezní ztráty ve feromagnetiku 315
c) Střední hodnota výkonu ve střídavém obvodu 316
d) Magnetoelektrický měřicí přístroj 317
Úlohy ke kapitole 4 322

5. Elektromagnetické pole 325
5.1 Maxwellovy rovnice 326
5.1.1 Indukované elektrické pole 327
5.1.2 Magnetické pole posuvného proudu 331
5.1.3 Úplná soustava Maxwellových rovnic 334
5.1.4 Potenciály elektromagnetického pole 338
5.2 Energie a hybnost elektromagnetického pole 341
5.2.1 Poyntingova věta 341
*5.2.2 Hybnost elektromagnetického pole 344
*5.2.3 Termodynamické vztahy v přítomnosti elektromagnetického pole . . . 347
5.3 Elektromagnetické vlny 352
5.3.1 Rovinná elektromagnetická vlna 352
5.3.2 Monochromatická rovinná vlna 356
*5.3.3 Vyzařování elektromagnetických vln 359
5.3.4 Řešené příklady 364
a) Odraz a lom elektromagnetických vln 364
b) Tlak záření 366
c) Povrchový jev (skinefekt) 367
5.4 *Lorentzovy rovnice 369
5.4.1 Mikroskopický popis elektromagnetického pole 371
5.4.2 Odvození Maxwellových rovnic z rovnic Lorentzových 373
Úlohy ke kapitole 5 375

6. Pohyb částice v elektromagnetickém poli 377
6.1 Nabitá částice v elektromagnetickém poli 378
6.1.1 Pohybová rovnice 378
*6.1.2 Energie a hybnost částice 379
6.1.3 Pohyb v časové neproměnném homogenním poli 382
a) Homogenní elektrické pole 382
b) Homogenní magnetické pole 383
c) Vzájemně kolmé elektrické a magnetické pole 385
*6.1.4 Pohyb v nehomogenním osově symetrickém magnetickém poli 387
6.2 Pohyb gyromagnetické částice v magnetickém poli 389
6.2.1 Pohybová rovnice 389

6.2.2 Larmorova precese 390
6.3 Příklady použití 392
6.3.1 Principy částicové optiky 392
6.3.2 Urychlovače nabitých částic 396
a) Elektrostatické urychlovače 397
b) Lineární (rezonanční) urychlovač 398
c) Cyklotron 398
d) Betatron 399
6.3.3 Hmotnostní spektroskopie 401
6.3.4 Magnetická rezonance 402
Úlohy ke kapitole 6 404

7. Elektrické a magnetické vlastnosti látek 407
*7.1 Elektronová struktura látek 408
7.1.1 Energie elektronů v atomech a molekulách 408
7.1.2 Energie elektronů v kondenzovaných látkách 414
7.1.3 Elektronový plyn 416
7.1.4 Elektrické a magnetické momenty atomů a molekul 419
7.2 Dielektrická a magnetická polarizace 422
7.2.1 Dielektrika 422
7.2.2 Diamagnetismus a paramagnetismus 427
7.2.3 Magneticky uspořádané látky 431
*7.2.4 Metamateriály 435
7.3 Vedení proudu v pevných látkách 435
7.3.1 Obecné charakteristiky vedení proudu v pevných látkách 435
7.3.2 Vodivost kovů 439
7.3.3 Kontaktní napětí a termoelektrické jevy v kovech 443
7.3.4 Vlastní a příměsová vodivost polovodičů, vlastnosti přechodu *p-n* . . . 448
7.3.5 Supravodivost 454
7.3.6 Elektronová emise 459
7.3.7 Nenasycený emisní proud, princip elektronky 462
7.4 Vedení proudu v kapalinách 464
7.4.1 Měrná a molární vodivost roztoků 464
7.4.2 Elektrolýza, Faradayovy zákony 467
7.4.3 Elektrochemické procesy na elektrodách – elektrodové potenciály, galvanické články 468
a) Primární články 472
b) Sekundární články 473
c) Palivové články 474
7.4.4 Polarografie 475
7.5 Vedení proudu v plynech 476
7.5.1 Nesamostatná vodivost 477
7.5.2 Doutnavý a obloukový výboj 478

7.6 Základy teorie materiálových konstant 481
7.6.1 Permitivita nepolárních látek (Clausiův–Mosottiův vztah) 481
7.6.2 Langevinova teorie diamagnetismu atomů a molekul 484
7.6.3 Susceptibilita nekovových paramagnetik, permitivita polárních látek (Langevinova teorie) 486
a) Magnetická susceptibilita paramagnetik 486
b) Permitivita polárních látek 488
7.6.4 Obecné podmínky platnosti Ohmova zákona, fyzikální podstata Hallova jevu 489
7.6.5 Drudeho teorie vodivosti kovů 491
7.6.6 Výklad vodivosti roztoků 494
7.6.7 Výklad nesamostatné vodivosti plynů, podmínky pro vznik samostatného výboje 497
Úlohy ke kapitole 7 499

8. Základy teorie elektrických obvodů 503
8.1 Základní pojmy 503
8.1.1 Klasifikace elektrických obvodů a jejich prvků 503
8.1.2 Základní vlastnosti elektrických dvojpólů a čtyřpólů 506
a) Dvojpól 506
b) Čtyřpól 508
8.2 Stejnosměrné a střídavé lineární obvody v ustáleném stavu 510
8.2.1 Ohmův zákon a Kirchhoffova pravidla v komplexní symbolice 510
8.2.2 Vlastnosti reálných dvojpólů 514
a) Náhradní schéma lineárního zdroje 516
b) Náhradní schéma kondenzátoru 518
c) Náhradní schéma cívky 519
8.2.3 Věta o superpozici 521
8.2.4 Obecné metody analýzy lineárních obvodů v ustáleném stavu 522
a) Přímá aplikace Kirchhoffových pravidel 522
b) Metoda smyčkových proudů 524
c) Metoda uzlových napětí 527
8.2.5 Thévéninova věta 529
*8.2.6 Obvody se vzájemnou indukčností 531
8.2.7 Řešené příklady 534
a) Sériové a paralelní rezonanční obvody 534
b) Wheatstonův můstek 537
c) Thomsonův dvojmost 540
d) Měření napětí a proudů v obvodech 542
8.3 Vybrané typy obecnějších obvodů 544
8.3.1 Nesinusové střídavé lineární obvody v ustáleném stavu 544
8.3.2 Neustálený stav v lineárních obvodech 548
8.3.3 Příklady řešení nelineárních obvodů 548

a) Stabilizace napětí Zenerovou diodou 550
b) Stanovení pracovního bodu tranzistoru 551
c) Náhradní schéma linearizovaného čtyřpólu 554
Úlohy ke kapitole 8 555

Dodatek 1 Přehled vektorové analýzy 559
a) Skalární a vektorové veličiny 559
b) Součiny vektorů 561
c) Transformační vlastnosti vektorů 564
d) Skalární a vektorová pole 565
e) Gradient skalárního pole 568
f) Divergence vektorového pole 570
g) Rotace vektorového pole 574
h) Operátory ($\boldsymbol{a}\nabla$) a Δ 577
i) Vektorová pole potenciální a solenoidální 579
j) Některé integrální věty vektorové analýzy 581
k) Úlohy k Dodatku 1 582

Dodatek 2 Soustavy fyzikálních jednotek 583
a) Charakteristiky soustav jednotek 583
b) Vývoj elektrických a magnetických jednotek 587
c) Přehled rovnic elektromagnetického pole v Gaussově soustavě 591
d) Převodní vztahy jednotek elektrických a magnetických veličin v Mezinárodní a Gaussově soustavě 593
e) Vybrané základní fyzikální konstanty 600

Historický přehled 603
Od Thaleta ke Gilbertovi 603
Od Gilberta ke Coulombovi 605
Od Coulomba k Ampèrovi 608
Od Ampèra k Maxwellovi 610
Od Maxwella k Einsteinovi 614
Od Einsteina k dnešku 618
Výzkum elektřiny a magnetismu v našich zemích 623

Výsledky a návody řešení úloh 625

Literatura 633

Rejstřík 635