

Spis rzeczy

Wstęp	11
-----------------	----

Część pierwsza. Pole elektryczne

1. Pole elektryczne — właściwości fizyczne i opis matematyczny	14
1.1. Źródła stałego pola elektrycznego — ładunki elektryczne	14
1.2. Pole elektryczne i wielkości je opisujące	16
1.2.1. Prawo Coulomba	18
1.2.2. Natężenie pola elektrycznego	18
1.2.3. Indukcja elektryczna, prawo Gaussa	21
1.2.4. Polaryzacja dielektryków, wektor polaryzacji	26
1.2.5. Wektor gęstości prądu	31
1.2.6. Potencjał elektryczny	35
1.2.7. Obrazowanie graficzne pola elektrycznego	38
1.3. Równania różniczkowe pola elektrycznego	42
1.3.1. Równanie różniczkowe pola elektrycznego w środowisku przewodzącym	44
1.3.2. Warunki brzegowe i początkowe dla równań różniczkowych cząstkowych drugiego rzędu	45
1.4. Dielektryki i przewodniki w stałym lub wolnozmiennym polu elektrycznym	47
1.4.1. Ogólna charakterystyka środowisk materialnych	47
1.4.2. Dielektryki idealne i rzeczywiste	48
1.4.3. Przewodniki doskonałe, półprzewodniki i przewodzące dielektryki	50
1.4.4. Środowiska liniowe i nieliniowe	50
1.4.5. Środowiska jednorodne i niejednorodne	51
1.4.6. Środowiska izotropowe i anizotropowe	52
1.4.7. Środowiska parametryczne	55
1.5. Pole elektryczne na granicy środowisk	56
1.5.1. Pole elektryczne na granicy dielektryków	56
1.5.2. Pole elektryczne na granicy przewodników	60
1.6. Właściwości energetyczne pola elektrycznego	63
1.6.1. Energia wzajemnego oddziaływania ładunków elektrycznych	63
1.6.2. Energia pola elektrycznego	65
1.6.3. Moc pola elektrycznego	67
1.7. Siły mechaniczne w polu elektrycznym	68
2. Ładunki elektryczne i przewodniki	72
2.1. Pole elektryczne naładowanego, jednorodnego przewodnika	72
2.1.1. Pole elektryczne naładowanej, przewodzącej kuli	75
2.1.2. Pole elektryczne cienkiej warstwy przewodzącej, naładowanej równomiernie ładunkiem o stałej gęstości	77

2.1.3. Pole elektryczne cienkiej warstwy przewodzącej, jednostronnie naładowanej	79
2.2. Pole elektryczne naładowanego niejednorodnego przewodnika	82
2.2.1. Pole elektryczne naładowanej, niejednorodnej, przewodzącej kuli	84
2.3. Elektryzacja ośrodków przewodzących	86
2.3.1. Dynamika procesu elektryzacji płaskiej, przewodzącej, dwuwarstwowej płyty w jednorodnym polu elektrycznym	92
2.3.2. Elektryzacja płaskiej, przewodzącej płyty w polu elektrycznym sinusoidalnie zmiennym w funkcji czasu	96
2.3.3. Elektryzacja izolowanych płyt przewodzących w równomiernym polu elektrycznym. Ładowanie przez elektryzację	99
2.4. Pole elektryczne i ładunki elektryzacji od ładunku punktowego umieszczonego w pobliżu przewodzących płaszczyzn	103
2.5. Pole elektryczne w otoczeniu ostrych krawędzi naładowanych przewodników — zjawisko ulotu	107
2.6. Elektryzacja kuli przewodzącej w polu ładunku punktowego	110
2.6.1. Elektryzacja kuli uziemionej	111
2.6.2. Elektryzacja odosobnionej, naładowanej kuli	113
2.6.3. Elektryzacja kuli o stałym potencjale	114
2.7. Dynamika procesu elektryzacji przewodzącej kuli w równomiernym polu elektrycznym	115
2.7.1. Kula z dielektryka w równomiernym polu elektrycznym	116
2.7.2. Kula przewodząca w równomiernym polu elektrycznym	119
2.7.3. Dynamika procesu elektryzacji przewodzącej kuli	122
2.8. Ekran elektryczny	125
2.8.1. Ekran cylindryczny w równomiernym polu elektrycznym	126
3. Ładowanie mikrocząsteczek dla potrzeb procesów elektrotechnologicznych	130
3.1. Ładowanie mikrocząsteczek	130
3.1.1. Ładowanie przez kontakt z naładowaną elektrodą	133
3.1.2. Ładowanie mikrocząsteczek w strefie ujemnego ulotu	134
3.2. Ruch naładowanych cząsteczek w polu elektrycznym	139
3.3. Ochrona obiektów przed ładunkami elektrycznymi	142
3.3.1. Zagrożenie wybuchem materiałów ziarnistych lub cieczy dielektrycznych transportowanych w izolowanych rurociągach	143
4. Kondensatory, pojemność elektryczna kondensatorów	148
4.1. Pole elektryczne i pojemność kondensatora płaskiego jednowarstwowego	150
4.1.1. Pojemność kondensatora płaskiego wielowarstwowego z dielektrykiem idealnym	153
4.1.2. Wpływ polaryzacji dielektryka na pole w kondensatorze	156
4.1.3. Kondensator płaski z dielektrykiem rzeczywistym	157
4.1.4. Kondensator płaski z wielowarstwowym dielektrykiem rzeczywistym	159
4.1.5. Uwarstwienie podłużne kondensatora płaskiego	161
4.2. Ładowanie i rozładowanie kondensatora	163
4.3. Zależność przenikalności elektrycznej od częstotliwości	167
4.4. Pojemność kondensatora cylindrycznego	168
4.4.1. Pojemność kondensatora cylindrycznego jednowarstwowego	169
4.4.2. Pojemność kondensatora cylindrycznego wielowarstwowego	171
4.4.3. Kondensator cylindryczny z dielektrykiem rzeczywistym	175
4.5. Pojemność kondensatora kulistego	176
4.6. Bilans ładunków elektrycznych na wspólnej, odosobnionej okładzinie kondensatora	177
4.7. Zasady obliczania pojemności układu przewodników	178
5. Przykłady obliczeń pola elektrycznego i pojemności wybranych układów rozmieszczenia ładunków	182
5.1. Pole elektryczne w otoczeniu dwóch cienkich naładowanych przewodów	182
5.1.1. Pole elektryczne i pojemność dwóch równoległych przewodów o jednakowych średnicach	186

5.1.2. Pole elektryczne i pojemność dwóch równoległych przewodów o różnych średnicach	188
5.1.3. Pole elektryczne i pojemność kabla o niekoncentrycznie umieszczonym przewodzie wewnętrznym	190
5.2. Odbicie zwierciadlane przewodu od przewodzącej powierzchni cylindrycznej	191
5.2.1. Pojemność kabla dwużyłowego z płaszczem przewodzącym	193
5.3. Pole elektryczne naładowanego przewodu zawieszono nad przewodzącą płytą (ziemią)	194
5.4. Pole elektryczne i pojemność dwóch przewodów zawieszonych nad ziemią	197
5.5. Odbicia zwierciadlane w środowisku dielektrycznym uwarstwionym	200
5.5.1. Wielokrotne odbicia zwierciadlane	202
5.6. Pole elektryczne dipola	204
5.7. Pole elektryczne warstwy podwójnej	206
6. Gęstość sił mechanicznych w polu elektrycznym	208
6.1. Gęstość sił objętościowych w dielektryku	208
6.1.1. Gęstość sił objętościowych w dielektryku jednorodnym	209
6.1.2. Gęstość sił objętościowych w idealnym i rzeczywistym, niejednorodnym dielektryku	211
6.1.3. Siły objętościowe w dielektryku o zmiennej gęstości	213
6.2. Tensor naprężeń powierzchniowych	215
6.2.1. Naprężenia powierzchniowe w dielektryku	218
6.2.2. Siły rozwarstwiający dielektryki	221
6.3. Siły mechaniczne na granicy przewodnika i dielektryka	223
6.3.1. Siły mechaniczne w kondensatorze	224
7. Pole prądu elektrycznego	228
7.1. Źródło energii elektrycznej, obwód elektryczny i prawa go opisujące	229
7.2. Prawo Joule'a w postaci całkowitej	235
7.3. Metody wyznaczania rezystancji (konduktancji)	236
7.4. Pole prądu elektrycznego w otoczeniu przewodu uziemiającego	238

Część druga. Pole magnetyczne stałe w funkcji czasu

8. Pole magnetyczne — wielkości je opisujące	242
8.1. Doświadczenia Ampera i prawo Biota—Savarta	242
8.2. Opis różniczkowy pola magnetycznego	246
8.2.1. Strumień magnetyczny	247
8.2.2. Natężenie pola magnetycznego, równanie Maxwella, wektor magnetyzacji	248
8.2.3. Prawo przepływu	250
8.2.4. Potencjał skalarny i wektorowy pola magnetycznego — równania różniczkowe cząstkowe drugiego rzędu	251
8.3. Warunki brzegowe na granicy nieciągłości materiałowej	256
8.4. Energia pola magnetycznego — gęstość objętościowa energii	257
8.5. Indukcyjność własna i wzajemna	258
8.5.1. Indukcyjność własna obwodu elektrycznego	260
8.5.2. Indukcyjność wzajemna	260
8.5.3. Całkowe definicje indukcyjności własnej i wzajemnej	262
8.5.4. Indukcyjności cząstkowe obwodu	267
8.6. Analogie w opisie pomiędzy polami: elektrycznym i magnetycznym	268
9. Pole magnetyczne w otoczeniu przewodów z prądem	270
9.1. Pole magnetyczne odosobnionego, prostoliniowego przewodu z prądem	270
9.2. Pole magnetyczne w otoczeniu linii dwuprzewodowej	276
9.2.1. Indukcyjność własna linii dwuprzewodowej	280
9.3. Pole magnetyczne kabla koncentrycznego	281
9.3.1. Indukcyjność własna kabla koncentrycznego	284

9.4. Pole magnetyczne w otoczeniu przewodu o skończonej długości	284
9.5. Pole magnetyczne w otoczeniu zwoju kołowego	285
9.6. Pole magnetyczne solenoidu (długiej cewki)	288
9.7. Pole magnetyczne toroidu	289
9.7.1. Indukcyjność wzajemna cewek nawiniętych na rdzeniu toroidalnym	291
9.8. Indukcyjność wzajemna dwóch równoległych przewodów o skończonej długości	292
9.8.1. Indukcyjność zewnętrzna odcinka przewodu prostoliniowego	293
9.8.2. Indukcyjność własna przewodu o kształcie prostokąta	294
9.8.3. Indukcyjność własna linii dwuprzewodowej o skończonej długości i różnych przekrojach poprzecznych przewodów	295
9.8.4. Indukcyjność wzajemna dwóch równoległych linii	296
9.8.5. Indukcyjności własne i wzajemne w linii trójfazowej	297
9.9. Pole magnetyczne w środowisku uwarstwionym	298
9.9.1. Odbicia zwierciadlane w polu magnetycznym	299
10. Pole magnetyczne w ferromagnetykach	300
10.1. Charakterystyka materiałów pod względem właściwości magnetycznych	300
10.1.1. Diamagnetyki	302
10.1.2. Paramagnetyki	302
10.2. Ferromagnetyki	303
10.2.1. Nieliniowość ferromagnetyków, krzywa magnesowania, pętla histerezy	304
10.2.2. Przenikalność magnetyczna ferromagnetyków	307
10.2.3. Materiały magnetyczne miękkie i twarde	308
10.2.4. Demagnetyzacja magnesów	310
10.2.5. Anizotropia magnetyków	313
10.2.6. Magnetostrykcja magnetyków	314
10.3. Pole magnetyczne namagnesowanych ferromagnetyków	315
10.3.1. Pole magnetyczne równomiernie namagnesowanej kuli	318
10.3.2. Kula ferromagnetyczna w równomiernym polu magnetycznym	319
10.4. Potencjał wektorowy w opisie pola w ferromagnetykach	320
10.4.1. Pole magnetyczne magnesu cylindrycznego	322
10.5. Ekran magnetyczny	324
10.5.1. Ekran cylindryczny w równomiernym polu magnetycznym	325
10.6. Straty energii na przemagnesowanie	328
10.7. Obwody magnetyczne	330
10.8. Zasady obliczania obwodów magnetycznych z magnesami trwałymi	333
11. Siły mechaniczne w polu magnetycznym	336
11.1. Gęstość sił objętościowych w magnetyku	336
11.1.1. Gęstość sił objętościowych w magnetyku jednorodnym	337
11.1.2. Gęstość sił objętościowych w magnetyku niejednorodnym	337
11.1.3. Gęstość sił mechanicznych w środowisku, w którym płyną prądy	338
11.2. Naprężenia powierzchniowe w polu magnetycznym	339
11.2.1. Siły rozwarstwiający magnetyki	340
11.3. Siły mechaniczne pomiędzy przewodami z prądem	341
11.3.1. Siła mechaniczna pomiędzy dwoma przewodami równoległymi	343
11.3.2. Siła mechaniczna pomiędzy dwoma zwojami z prądem	345
11.3.3. Obwód z prądem w równomiernym polu magnetycznym	346
11.4. Poruszające się ładunki elektryczne w polu magnetycznym	347
11.4.1. Siła mechaniczna pomiędzy dwoma poruszającymi się ładunkami punktowymi	347
11.4.2. Siła Lorentza	348
11.5. Równania ruchu naładowanej cząsteczki w polu magnetycznym	349
11.6. Zjawisko samoskurczu (pinchu)	352
11.7. Zjawisko Halla	353

11.8. Elektryzacja środowisk przewodzących w polu magnetycznym	354
11.8.1. Model matematyczny procesu elektryzacji w polu magnetycznym	354
11.8.2. Elektryzacja w stałym i równomiernym polu magnetycznym	357
11.8.3. Elektryzacja w polu magnetycznym ziemi	359

Część trzecia. Pole elektromagnetyczne

12. Pole elektryczne i magnetyczne zmienne w czasie	364
12.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej — prawo Faradaya, równania Maxwella	364
12.2. Gęstość prądu przesunięcia — całkowita gęstość prądu	367
12.3. Równania różniczkowe pola elektromagnetycznego	368
12.3.1. Równania Maxwella dla pól harmonicznych	370
12.4. Równania różniczkowe cząstkowe drugiego rzędu stosowane w opisie pola elektromagnetycznego	372
12.4.1. Równanie falowe z tłumieniem	373
12.4.2. Równanie falowe bez tłumienia	374
12.4.3. Równanie przewodnictwa	375
12.4.4. Równanie przewodnictwa w środowisku z wymuszonym przepływem prądu	375
12.4.5. Równanie Helmholtza	376
12.5. Opis pola elektromagnetycznego w niejednorodnym magnetyku	377
12.6. Dyspersja częstotliwościowa	379
12.6.1. Dyspersja częstotliwościowa dielektryków	380
12.6.2. Dyspersja częstotliwościowa magnetyków	382
12.6.3. Nieliniowy magnetyk jako środowisko dyspersyjne i niejednorodne	384
12.7. Przemiany energetyczne w polu elektromagnetycznym	384
12.7.1. Strumień mocy — wektor Poyntinga	384
12.7.2. Zastosowanie wektora Poyntinga do opisu przesyłu energii elektrycznej — rola przewodów elektrycznych i dielektryka w tym procesie	386
12.7.3. Wektor Poyntinga w polach harmonicznych	388
12.7.4. Siły mechaniczne w polu elektromagnetycznym	390
12.8. Potencjały elektrodynamiczne	391
12.8.1. Równania d'Alemberta	393
12.8.2. Potencjały opóźnione — rozwiązania ogólne równań d'Alemberta	394
12.9. Pole elektromagnetyczne na granicy nieciągłości materiałowej	395
12.10. Pole elektromagnetyczne w środowiskach ruchomych	396
13. Fale elektromagnetyczne	400
13.1. Charakterystyka fal elektromagnetycznych	400
13.2. Monochromatyczna fala płaska	402
13.2.1. Monochromatyczna fala płaska w dielektryku	406
13.2.2. Monochromatyczna fala płaska w dielektryku z dyspersją częstotliwościową	408
13.2.3. Monochromatyczna fala płaska w środowisku dobrze przewodzącym	409
13.3. Zjawisko naskórkowości elektrycznej	411
13.3.1. Zjawisko naskórkowości w odosobnionym przewodzie taśmowym	412
13.3.2. Zjawisko naskórkowości w odosobnionym przewodzie walcowym	415
13.3.3. Zjawisko zbliżenia	418
13.4. Magnetyczne zjawisko naskórkowości	419
13.5. Przenikanie fali płaskiej przez granicę nieciągłości materiałowej	421
13.5.1. Padanie fali płaskiej pod kątem prostym na powierzchnię idealnego przewodnika	423
13.6. Poprzeczne fale elektromagnetyczne	425
13.7. Linia elektryczna jako falowód	426
Dodatek	428
Wykaz literatury pomocniczej	434