

# Spis treści

Przedmowa do wydania drugiego .....	11
Konwencje i ważniejsze oznaczenia .....	13
1. Rachunek i analiza wektorowa .....	17
1.1. Wielkości skalarne i wektorowe .....	17
1.2. Układy współrzędnych .....	20
1.2.1. Układ współrzędnych kartezjańskich (prostokątnych) .....	20
1.2.2. Układ współrzędnych walcowych (cylicyrycznych) .....	21
1.2.3. Układ współrzędnych kulistych (sferycznych) .....	23
1.2.4. Układ współrzędnych biegunowych (kołowych) .....	25
1.3. Algebraiczne operacje wektorowe .....	26
1.3.1. Dodawanie i odejmowanie wektorów .....	26
1.3.2. Iloczyn skalarny wektorów .....	27
1.3.3. Iloczyn wektorowy wektorów .....	30
1.3.4. Iloczyn mieszany .....	32
1.4. Operator nabra .....	33
1.5. Operator Laplace'a (laplasjan) .....	33
1.6. Różniczkowanie pól skalarnych i wektorowych względem czasu ...	34
1.7. Różniczkowanie wektora wodzącego .....	35
1.8. Delta Diraca .....	37
1.9. Pochodna kierunkowa i gradient pola skalarnego .....	38
1.9.1. Pochodna kierunkowa .....	38
1.9.2. Gradient .....	39
1.10. Strumień i dywergencja pola wektorowego .....	42
1.10.1. Strumień pola wektorowego .....	42
1.10.2. Dywergencja .....	43
1.10.3. Twierdzenie Gaussa-Ostrogradskiego .....	46
1.11. Cyrkulacja i rotacja pola wektorowego .....	48
1.11.1. Całka liniowa i cyrkulacja pola wektorowego .....	48
1.11.2. Rotacja .....	49
1.11.3. Twierdzenie Stokesa .....	53
1.12. Potencjały .....	54
1.12.1. Potencjał skalarny .....	54
1.12.2. Potencjał wektorowy .....	57

<b>2. Pole elektrostatyczne</b> .....	<b>59</b>
2.1. Ładunki elektryczne .....	59
2.2. Prawo Coulomba .....	61
2.3. Natężenie pola elektrycznego .....	62
2.4. Potencjał i napięcie elektryczne .....	69
2.5. Dielektryki. Polaryzacja i indukcja elektryczna .....	77
2.5.1. Zjawisko polaryzacji elektrycznej.....	77
2.5.2. Wektor polaryzacji.....	78
2.5.3. Związek polaryzacji z budową materii i jej właściwościami elektrycznymi .....	80
2.5.4. Wektor indukcji elektrycznej .....	80
2.5.5. Prawo Gaussa .....	82
2.5.6. Wytrzymałość elektryczna dielektryków .....	85
2.6. Pole elektrostatyczne w przewodnikach i w ich otoczeniu .....	86
2.6.1. Pole elektryczne przewodnika w równowadze elektrycznej .....	86
2.6.2. Przewodnik w polu elektrycznym .....	89
2.7. Pole elektryczne na granicy nieciągłości materiałowej .....	95
2.8. Równania pola elektrostatycznego .....	100
2.9. Pojemność elektryczna. Kondensatory .....	103
2.10. Energia pola elektrycznego .....	106
2.10.1. Energia układu ładunków punktowych .....	107
2.10.2. Energia ciągłego rozkładu ładunków .....	109
2.10.3. Energia naładowanego kondensatora .....	109
2.10.4. Postać lokalna energii pola elektrycznego .....	111
2.11. Obliczanie pól elektrostatycznych.....	112
<b>3. Pole przepływowe</b> .....	<b>114</b>
3.1. Prąd elektryczny .....	114
3.2. Prąd przewodzenia. Prawo Ohma w postaci różniczkowej .....	117
3.3. Prąd przesunięcia.....	120
3.4. Równanie ciągłości prądu.....	122
3.5. Równania pola przepływowego.....	124
3.6. Pole przepływowe na granicy nieciągłości materiałowej.....	126
3.7. Rezystancja.....	130
3.8. Uziomy .....	133
3.9. Straty mocy. Prawo Joule'a-Lenza .....	134
3.10. Źródło napięcia stałego.....	137
3.11. Prawa Kirchhoffa.....	139
<b>4. Pole magnetostacyjne</b> .....	<b>142</b>
4.1. Prawo Biota-Savarta.....	142
4.2. Oddziaływanie pola magnetycznego na ładunki .....	149
4.2.1. Siła magnetyczna .....	149
4.2.2. Siła działająca na przewód z prądem elektrycznym.....	150

4.3.	Oddziaływanie pola magnetycznego z materią .....	152
4.3.1.	Zjawisko magnetyzacji.....	152
4.3.2.	Wektor magnetyzacji (namagnesowania) .....	153
4.3.3.	Wektor natężenia pola magnetycznego .....	155
4.3.4.	Magnetyczne właściwości materii .....	157
4.4.	Prawo przepływu .....	162
4.5.	Strumień indukcji magnetycznej .....	167
4.6.	Równania i potencjały pola magnetostaticznego .....	169
4.6.1.	Równania pola magnetostaticznego .....	169
4.6.2.	Skalarny potencjał magnetyczny .....	169
4.6.3.	Wektorowy potencjał magnetyczny .....	171
4.7.	Pole magnetyczne na granicy nieciągłości materiałowej .....	176
4.8.	Indukcyjność własna i wzajemna obwodów .....	182
4.8.1.	Współczynnik indukcyjności własnej .....	182
4.8.2.	Współczynnik indukcyjności wzajemnej .....	187
4.8.3.	Obwody sprzężone magnetycznie .....	193
4.9.	Energia pola magnetycznego .....	194
4.10.	Podsumowanie .....	199
4.10.1.	Obliczanie pola magnetostaticznego .....	199
4.10.2.	Magnetostatyka a elektrostatyka – podobieństwa i różnice .....	199
5.	Indukcja elektromagnetyczna .....	201
5.1.	Zjawisko indukcji elektromagnetycznej .....	201
5.2.	Zjawisko indukcji własnej i wzajemnej .....	208
5.3.	Wnioski z prawa Faradaya .....	211
5.3.1.	Różniczkowa postać prawa Faradaya .....	211
5.3.2.	Dywergencja indukcji pola magnetycznego .....	212
6.	Pole elektromagnetyczne .....	213
6.1.	Równania Maxwella .....	213
6.2.	Warunki brzegowe .....	218
6.3.	Moc pola elektromagnetycznego. Twierdzenie Poyntinga .....	218
6.4.	Falowy charakter pola elektromagnetycznego .....	223
6.4.1.	Równanie falowe dla pola magnetycznego .....	223
6.4.2.	Równanie falowe dla pola elektrycznego .....	224
6.4.3.	Przypadki szczególne .....	226
6.4.4.	Równanie dla prądu przewodzenia .....	226
6.5.	Potencjały elektrodynamiczne .....	227
6.5.1.	Określenie potencjałów .....	227
6.5.2.	Cechowanie potencjałów .....	228
6.5.3.	Równanie dla potencjału wektorowego .....	228
6.5.4.	Równanie dla potencjału skalarnego .....	229
6.5.5.	Równania dla potencjałów w dielektryku idealnym .....	229
6.5.6.	Potencjały opóźnione .....	230

<b>7. Harmoniczne pole elektromagnetyczne</b> .....	<b>231</b>
7.1. Zespolona wartość skuteczna .....	231
7.2. Równania Maxwella w postaci zespolonej.....	234
7.3. Zależności energetyczne.....	234
7.3.1. Gęstość mocy związanej z przepływem prądu.....	235
7.3.2. Gęstość mocy i energii pola elektrycznego.....	236
7.3.3. Gęstość mocy i energii pola magnetycznego .....	237
7.3.4. Zespolony wektor Poyntinga.....	238
7.3.5. Twierdzenie Poyntinga.....	238
7.3.6. Moc pozorna, czynna i bierna w układzie niezawierającym źródeł.....	239
7.3.7. Straty mocy w dielektryku rzeczywistym .....	240
7.3.8. Zespolona przenikalność elektryczna.....	242
7.3.9. Zespolona przenikalność magnetyczna.....	243
7.4. Równania falowe w postaci zespolonej.....	243
7.5. Zespolone potencjały elektrodynamiczne.....	245
7.6. Promieniowanie.....	246
7.6.1. Potencjał wektorowy wytwarzany przez przewodnik liniowy z prądem.....	247
7.6.2. Podstawowe założenia upraszczające .....	248
7.6.3. Dipol Hertza – promieniowanie dipolowe elektryczne .....	249
7.6.4. Promieniowanie dipolowe magnetyczne.....	254
7.6.5. Moc i rezystancja promieniowania .....	257
7.6.6. Ogólna antena liniowa.....	258
<b>8. Wolnozmiennne pole harmoniczne</b> .....	<b>261</b>
8.1. Przybliżenie quasi-statyczne.....	261
8.2. Indukcja elektromagnetyczna w przewodniku nieruchomym .....	262
8.3. Prądy wirowe w rozległej płycie .....	264
8.4. Zjawisko naskórkowości .....	269
8.4.1. Zjawisko naskórkowości w rozległej płycie .....	269
8.4.2. Zjawisko naskórkowości w przewodzie walcowym .....	273
8.5. Zjawisko zbliżenia w dwóch równoległych płytach.....	277
8.6. Modelowanie obwodowe układów polowych .....	282
8.6.1. Impedancja własna przewodu .....	282
8.6.2. Impedancja własna i wzajemna obwodów sprzężonych magnetycznie.....	285
<b>9. Płaska fala elektromagnetyczna</b> .....	<b>289</b>
9.1. Płaska fala elektromagnetyczna w dielektryku idealnym.....	289
9.2. Harmoniczna fala płaska .....	294
9.2.1. Harmoniczna fala płaska w dielektryku bezstratnym.....	298
9.2.2. Harmoniczna fala płaska w środowisku dobrze przewodzącym.....	300

9.2.3.	Polaryzacja fali.....	303
9.2.4.	Parametry falowe środowiska .....	307
9.2.5.	Równania Maxwella dla fali płaskiej .....	309
9.3.	Harmoniczna fala płaska na granicy środowisk – padanie prostopadłe .....	311
9.3.1.	Zależności ogólne.....	311
9.3.2.	Padanie prostopadłe na granicę dielektryków bezstratnych .....	313
9.3.3.	Padanie prostopadłe w układzie dielektryk bezstratny- -przewodnik.....	315
9.3.4.	Padanie prostopadłe w układzie dielektryk bezstratny- -przewodnik idealny .....	317
9.4.	Harmoniczna fala płaska na granicy środowisk – padanie ukośne....	318
9.4.1.	Wnioski z prawa Snella.....	320
9.4.2.	Polaryzacja prostopadła .....	321
9.4.3.	Polaryzacja równoległa .....	327
10.	Linie przesyłowe. Linia długa .....	331
10.1.	Zagadnienia wstępne .....	331
10.1.1.	Klasyfikacja fal elektromagnetycznych .....	331
10.1.2.	Klasyfikacja przewodnic EM.....	331
10.1.3.	Równania pola elektromagnetycznego dla fali przewodzonej .....	332
10.2.	Fale TEM w liniach przesyłowych.....	334
10.2.1.	Zależności ogólne.....	334
10.2.2.	Kabel koncentryczny jako linia przesyłowa TEM .....	336
10.3.	Linia długa.....	339
10.3.1.	Schemat zastępczy i równania linii dwuprzewodowej.....	339
10.3.2.	Linia jednorodna przy wymuszeniu sinusoidalnym.....	341
10.3.3.	Parametry jednostkowe linii długiej.....	347
10.3.4.	Parametry charakterystyczne (falowe) linii długiej.....	351
10.3.5.	Linia nieodkształcająca .....	354
10.3.6.	Impedancja wejściowa linii .....	356
10.3.7.	Szczególne stany pracy linii długiej.....	358
10.3.8.	Moc i sprawność linii .....	360
10.4.	Linia długa bezstratna.....	361
10.4.1.	Parametry i równania linii bezstratnej.....	361
10.4.2.	Prąd i napięcie .....	363
10.4.3.	Stan dopasowania falowego .....	364
10.4.4.	Stan jałowy .....	366
10.4.5.	Stan zwarcia .....	368
10.4.6.	Linia bezstratna obciążona rezystancją .....	370
10.4.7.	Linia bezstratna obciążona idealną reaktancją .....	373
10.4.8.	Bezstratna linia długa obciążona dowolną impedancją.....	375
10.4.9.	Impedancja wejściowa .....	378

10.4.10. Moc w linii bezstratnej .....	379
10.4.11. Linia bezstratna jako transformator dopasowujący .....	381
10.4.12. Wykres Smitha .....	383
<b>11. Falowody rurowe o ściankach przewodzących .....</b>	<b>387</b>
11.1. Zagadnienia wstępne .....	387
11.2. Falowód o przekroju prostokątnym .....	389
11.2.1. Fala typu H .....	392
11.2.2. Fala typu E .....	396
11.3. Falowód o przekroju kołowym .....	399
11.3.1. Fala typu H .....	400
11.3.2. Fala typu E .....	403
11.4. Ogólne właściwości falowodów o ściankach idealnie przewodzących .....	405
11.5. Falowody stratne .....	406
<b>12. Światłowody .....</b>	<b>410</b>
12.1. Falowody dielektryczne .....	410
12.2. Światłowód płaski .....	411
12.2.1. Fala typu H .....	413
12.2.2. Fala typu E .....	416
12.3. Światłowód włóknisty o przekroju kołowym .....	417
12.3.1. Mody typu H .....	419
12.3.2. Mody typu E .....	421
12.3.3. Mody mieszane .....	422
12.3.4. Światłowody o słabym przewodzeniu. Mody LP .....	426
<b>13. Rezonatory .....</b>	<b>431</b>
13.1. Rezonatory wnękowe .....	431
13.2. Kabel koncentryczny jako rezonator .....	432
13.3. Tory przesyłowe jako rezonatory .....	437
13.4. Rezonator prostopadłościenny o ściankach przewodzących .....	438
13.5. Rezonator cylindryczny o ściankach przewodzących .....	441
13.6. Ogólne zależności czasowe i przestrzenne .....	447
13.7. Dobroć rezonatora .....	450
<b>Bibliografia .....</b>	<b>455</b>
<b>Skorowidz .....</b>	<b>458</b>