

SPIS TREŚCI

Wykaz najważniejszych oznaczeń i symboli	7
Zestawienie najważniejszych jednostek	9
CZĘŚĆ IV. POLE ELEKTROMAGNETYCZNE	11
1. Równania pola elektromagnetycznego	11
1.1. Wielkości wektorowe	11
1.1.1. Pojęcia podstawowe	11
1.1.2. Funkcja wektorowa. Pole wektorowe	12
1.1.3. Iloczyn skalarny i wektorowy	12
1.1.4. Pochodna i całka wektora	14
1.2. Podstawowe wzory i twierdzenia analizy wektorowej	15
1.2.1. Gradient skalara	15
1.2.2. Strumień wektora. Dywergencja wektora	16
1.2.3. Całka liniowa. Rotacja wektora	19
1.2.4. Operator nabra	22
1.2.5. Twierdzenie Gaussa-Ostrogradskiego. Twierdzenie Stokesa	23
1.3. Wielkości charakteryzujące pole elektromagnetyczne	24
1.3.1. Określenia i zależności podstawowe	24
1.3.2. Pole elektryczne w dielektryku	24
1.3.3. Pole przepływowe	27
1.3.4. Pole magnetyczne	28
1.4. Równania Maxwella	29
1.5. Prawo Gaussa. Bezźródłowość pola magnetycznego	32
1.6. Prąd przesunięcia	32
1.7. Prawo zachowania ładunku	34
2. Pole elektrostatyczne	36
2.1. Równania pola elektrostatycznego	36
2.2. Potencjał i napięcie	38
2.2.1. Potencjał pola elektrostatycznego	38
2.2.2. Napięcie w polu elektrostatycznym	39
2.2.3. Potencjał ładunku przestrzennego i powierzchniowego	40
2.3. Warunki brzegowe. Prawo załamania	41
2.4. Równanie Poissona i Laplace'a	43
2.4.1. Pole trójwymiarowe	43
2.4.2. Pole dwuwymiarowe	44
2.5. Przykłady pól elektrostatycznych	45
2.5.1. Pole równomierne	45
2.5.2. Pole naładowanej kuli metalowej	46
2.5.3. Pole dipola elektrycznego	46
2.5.4. Pole ładunku liniowego	47
2.5.5. Pole naładowanego walca metalowego	48
2.5.6. Kula metalowa w polu równomiernym	49

2.6. Pojemność elektryczna. Kondensatory	52
2.6.1. Określenie pojemności	52
2.6.2. Kondensator płaski	52
2.6.3. Uwarstwiony kondensator płaski	53
2.6.4. Kondensator walcowy	55
2.6.5. Uwarstwiony kondensator walcowy	57
2.7. Pojemność linii elektrycznych	58
2.7.1. Pojemność pojedynczego przewodu nad ziemią	58
2.7.2. Pojemność linii dwuprzewodowej	60
2.8. Energia pola elektrycznego	63
3. Statyczne pole przepływowe	65
3.1. Równania statycznego pola przepływowego	65
3.1.1. Równania statycznego pola przepływowego	65
3.1.2. Potencjał statycznego pola przepływowego	65
3.1.3. Prawo Ohma w postaci wektorowej	66
3.1.4. Prawo Joule'a w postaci różniczkowej	66
3.2. Warunki brzegowe. Prawo załamania	67
3.3. Rezystancja przejścia	68
3.4. Uziomy	70
4. Pole magnetostatyczne	72
4.1. Równania pola magnetostatycznego	72
4.2. Przykłady zastosowania prawa przepływu	73
4.2.1. Natężenie pola magnetycznego na zewnątrz przewodu	73
4.2.2. Natężenie pola magnetycznego we wnętrzu przewodu	74
4.2.3. Natężenie pola magnetycznego we wnętrzu cewki toroidalnej	75
4.2.4. Natężenie pola magnetycznego we wnętrzu cewki solenoidalnej	76
4.3. Potencjały pola magnetostatycznego	77
4.3.1. Potencjał skalarny	77
4.3.2. Potencjał wektorowy	78
4.3.3. Potencjał wektorowy pierścienia kołowego	80
4.4. Prawo Biota-Savarta	82
4.4.1. Zależności podstawowe	82
4.4.2. Natężenie pola magnetycznego na osi pierścienia	85
4.4.3. Natężenie pola magnetycznego wewnątrz cewki solenoidalnej	86
4.5. Siły w polu magnetycznym	87
4.5.1. Zależności podstawowe	87
4.5.2. Siły elektrodynamiczne	89
4.6. Własności magnetyczne ciał	90
4.6.1. Ciała diamagnetyczne i paramagnetyczne	90
4.6.2. Ciała ferromagnetyczne	90
4.6.3. Przenikalność magnetyczna statyczna i dynamiczna	92
4.7. Warunki brzegowe. Prawo załamania	93
4.8. Metoda odbić zwierciadlanych	95
4.9. Ekrany magnetyczne	96
5. Obwody magnetyczne	100
5.1. Uwagi ogólne	100
5.2. Prawo Ohma dla obwodów magnetycznych	102
5.2.1. Prawo Ohma	102
5.2.2. Połączenie szeregowo i równoległe oporów magnetycznych	104
5.3. Prawa Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych	105
5.3.1. Pierwsze prawo Kirchhoffa	105
5.3.2. Drugie prawo Kirchhoffa	105

5.4. Nierozgałęzione obwody magnetyczne	107
5.4.1. Obliczanie amperozwojów przy znanym strumieniu magnetycznym	107
5.4.2. Obliczanie strumienia magnetycznego przy znanych amperozwojach	108
5.5. Rozgałęzione obwody magnetyczne	110
5.6. Magnes trwały ze szczeliną	112
6. Indukcja elektromagnetyczna	114
6.1. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej	114
6.1.1. Siła elektromotoryczna indukowana w poruszającym się przewodzie	114
6.1.2. Siła elektromotoryczna indukowana w obwodzie zamkniętym	116
6.1.3. Siła elektromotoryczna indukowana w cewce	117
6.1.4. Zasada Lenza	118
6.2. Zjawisko indukcji własnej	119
6.3. Zjawisko indukcji wzajemnej	121
6.4. Energia pola magnetycznego	124
6.5. Obliczanie indukcyjności własnej i wzajemnej	127
6.5.1. Wzór ogólny dla indukcyjności wzajemnej	127
6.5.2. Indukcyjność wewnętrzna przewodu	128
6.5.3. Indukcyjność zewnętrzna przewodu	130
6.5.4. Indukcyjność linii dwuprzewodowej	131
6.5.5. Indukcyjność własna i wzajemna pierścieni kołowych	131
6.6. Siła udźwigu elektromagnesu	133
7. Fale elektromagnetyczne	136
7.1. Potencjały elektrodynamiczne	136
7.1.1. Zależności podstawowe	136
7.1.2. Równania różniczkowe dla potencjałów elektrodynamicznych	137
7.2. Falowy charakter pola elektromagnetycznego	139
7.3. Fala płaska	141
7.4. Twierdzenie Poyntinga	142
8. Harmoniczne pole elektromagnetyczne	146
8.1. Wektory zespolone	146
8.1.1. Określenie wektora zespolonego	146
8.1.2. Norma wektora zespolonego	147
8.2. Równania pola elektromagnetycznego w postaci zespolonej	148
8.3. Twierdzenie Poyntinga w postaci zespolonej	150
8.4. Potencjał wektorowy i skalarny	151
8.5. Impedancje liniowych obwodów elektrycznych	153
8.5.1. Uwagi ogólne	153
8.5.2. Impedancja wewnętrzna przewodu	154
8.5.3. Impedancja zewnętrzna przewodu	156
8.5.4. Impedancja przewodu	157
8.5.5. Impedancja wzajemna	158
9. Harmoniczne pole elektromagnetyczne w środowisku przewodzącym	160
9.1. Równania pola elektromagnetycznego w środowisku przewodzącym	160
9.2. Zjawisko naskórkowości w przewodzie walcowym	161
9.2.1. Uwagi ogólne	161
9.2.2. Pole elektromagnetyczne we wnętrzu przewodu walcowego	161
9.2.3. Rezystancja i indukcyjność wewnętrzna	164
9.3. Walec metalowy w poprzecznym polu magnetycznym	166
9.4. Zjawisko zbliżenia	169
9.5. Przewody w żłobku maszyny elektrycznej	172
9.6. Cienka płytka w poprzecznym polu magnetycznym	176
9.7. Straty wiroprowodowe	178
9.7.1. Uwagi ogólne	178

9.7.2. Cienka płytka kołowa w poprzecznym polu magnetycznym równomiernym . . .	178
9.7.3. Cienka płyta w podłużnym polu magnetycznym . . .	180
9.7.4. Walec metalowy w podłużnym polu magnetycznym . . .	185
9.8. Straty wiropądowe wywołane przez prądy w przewodach . . .	187
9.8.1. Zależności podstawowe . . .	187
9.8.2. Ogólny wzór dla strat wiropądowych . . .	190
9.9. Obwód ziemnopowrotny . . .	192
9.9.1. Określenie obwodu ziemnopowrotnego . . .	192
9.9.2. Zależności podstawowe . . .	193
9.9.3. Impedancja zewnętrzna przewodu . . .	194
9.9.4. Impedancja pętli ziemnopowrotnej . . .	195
9.9.5. Impedancja wzajemna pętli . . .	196
9.10. Równanie całkowite dla gęstości prądu w przewodzie . . .	197
10. Promieniowanie i propagacja fal elektromagnetycznych . . .	199
10.1. Wstęp . . .	199
10.2. Wibrator elementarny . . .	199
10.2.1. Równania podstawowe . . .	199
10.2.2. Pole elektromagnetyczne w obszarze bliskim . . .	201
10.2.3. Pole elektromagnetyczne w obszarze dalekim (strefa falowa) . . .	202
10.2.4. Moc i rezystancja promieniowania . . .	204
10.3. Harmoniczna fala płaska . . .	206
10.3.1. Równania fali płaskiej w postaci zespolonej . . .	206
10.3.2. Fala płaska w idealnym dielektryku . . .	209
10.3.3. Fala płaska w środowisku przewodzącym . . .	210
10.4. Fala płaska w środowisku dwuwarstwowym . . .	211
10.4.1. Fala płaska padająca na granicę dwóch środowisk . . .	211
10.4.2. Głębokość wnikania fali elektromagnetycznej . . .	213
11. Zarys metod rozwiązywania zagadnień brzegowych . . .	215
11.1. Wstęp . . .	215
11.2. Metoda rozdzielania zmiennych . . .	216
11.2.1. Określenia i zależności podstawowe . . .	216
11.2.2. Równanie Laplace'a . . .	218
11.2.3. Równanie Poissona . . .	224
11.3. Metoda przekształceń całkowitych . . .	226
11.3.1. Uwagi ogólne . . .	226
11.3.2. Pole ładunku punktowego umieszczonego we wnętrzu rury metalowej . . .	228
11.3.3. Potencjał wektorowy dwóch przewodów równoległych . . .	231
11.3.4. Potencjał wektorowy przewodu równoległego do ściany przewodzącej . . .	233
11.4. Metody wariacyjne . . .	236
11.4.1. Określenia i zależności podstawowe . . .	236
11.4.2. Metoda Ritza . . .	238
11.4.3. Metoda Kantorowicza . . .	240
11.5. Metoda równań całkowitych . . .	242
11.5.1. Uwagi ogólne . . .	242
11.5.2. Sprowadzanie równań całkowitych do układu liniowych równań algebraicznych . . .	243
11.5.3. Rozkład ładunku na cienkiej płytce prostokątnej . . .	245
11.5.4. Rozkład prądu w przewodzie o przekroju prostokątnym . . .	246
12. Dodatek . . .	248
12.1. Podstawowe wzory algebry i analizy wektorowej . . .	248
12.2. Funkcje hiperboliczne . . .	250
12.3. Funkcje Bessela . . .	250
12.4. Tabela całek . . .	252
Literatura . . .	254