



1.6.	Prawa Kirchhoffa . . . . .	41
1.6.1.	I prawo Kirchhoffa . . . . .	41
1.6.2.	II prawo Kirchhoffa . . . . .	43
1.7.	Moc i energia . . . . .	45
1.7.1.	Moc i energia elementów idealnych . . . . .	45
1.7.2.	Moc czynna prądu okresowego . . . . .	46
1.8.	Wartości skuteczne okresowych prądów i napięć . . . . .	47
<b>2.</b>	<b>Liniiowe obwody prądu stałego . . . . .</b>	<b>48</b>
2.1.	Wstęp . . . . .	48
2.2.	Zastosowanie praw Kirchhoffa do obliczania obwodów prądu stałego . . . . .	49
2.3.	Zastosowanie zasady superpozycji . . . . .	50
2.4.	Moc w obwodach elektrycznych prądu stałego . . . . .	53
2.4.1.	Bilans mocy. Sprawność . . . . .	53
2.4.2.	Dopasowanie odbiornika do źródła . . . . .	54
<b>3.</b>	<b>Równania liniowych obwodów elektrycznych . . . . .</b>	<b>55</b>
3.1.	Wstęp . . . . .	55
3.2.	Zastosowanie praw Kirchhoffa . . . . .	55
3.3.	Równania oczkowe . . . . .	57
3.3.1.	Ogólna metoda postępowania . . . . .	57
3.3.2.	Obwody zawierające źródło prądu . . . . .	59
3.3.3.	Obwody zawierające źródła sterowane . . . . .	60
3.4.	Równania węzłowe . . . . .	60
3.5.	Obwody dualne . . . . .	62
3.5.1.	Uwagi ogólne . . . . .	62
3.5.2.	Wyznaczanie obwodów dualnych . . . . .	64
3.6.	Ciągłość prądu w cewce i napięcia na kondensatorze . . . . .	66
3.7.	Stan przejściowy i stan ustalony . . . . .	67
<b>4.</b>	<b>Prądy i napięcia sinusoidalne . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1.	Wstęp . . . . .	71
4.1.1.	Podstawowe określenia . . . . .	71
4.1.2.	Kąt przesunięcia fazowego . . . . .	72
4.1.3.	Wartość skuteczna prądu sinusoidalnego . . . . .	73
4.2.	Przedstawianie wielkości sinusoidalnych za pomocą liczb zespolonych . . . . .	74
4.2.1.	Liczby zespolone . . . . .	74
4.2.2.	Wartość zespolona napięcia i prądu . . . . .	75
4.3.	Wykresy wskazowe (wektorowe) . . . . .	76
4.3.1.	Wskaźy wirujące . . . . .	76
4.3.2.	Wskaźy nieruchome . . . . .	77
4.3.3.	Podstawowe własności wykresów wskazowych . . . . .	78
4.4.	Prawa Kirchhoffa w postaci zespolonej . . . . .	80
4.4.1.	Zależności podstawowe . . . . .	80
4.4.2.	I i II prawo Kirchhoffa . . . . .	80
4.5.	Elementy idealne w obwodzie prądu sinusoidalnego . . . . .	82
4.5.1.	Opornik idealny . . . . .	82
4.5.2.	Cewka idealna . . . . .	84

4.5.3. Kondensator idealny . . . . .	87
4.5.4. Przejście od równań dla wartości chwilowych do równań w postaci zespolonej . . . . .	90
4.6. Prawo Ohma w postaci zespolonej . . . . .	91
4.6.1. Impedancja . . . . .	91
4.6.2. Admitancja . . . . .	93
4.6.3. Zależności między rezystancją i reaktancją a konduktancją i susceptancją . . . . .	95
4.7. Połączenia dwójników . . . . .	96
4.7.1. Połączenie szeregowe . . . . .	96
4.7.2. Połączenie równoległe . . . . .	97
4.7.3. Źródła napięcia i prądu . . . . .	99
4.8. Połączenie szeregowe i połączenie równoległe elementów $R, L, C$ . . . . .	100
4.8.1. Połączenie szeregowe . . . . .	100
4.8.2. Przypadki szczególne . . . . .	102
4.8.3. Połączenie równoległe . . . . .	103
4.8.4. Kondensator ze stratami . . . . .	105
4.8.5. Przykład zastosowania metody liczb zespolonych . . . . .	106
4.9. Wykres kołowy . . . . .	107
4.9.1. Krzywe wskazowe (wektorowe) . . . . .	107
4.9.2. Konstrukcja wykresu kołowego . . . . .	108
4.10. Moc w obwodach prądu sinusoidalnego . . . . .	112
4.10.1. Moc czynna . . . . .	112
4.10.2. Moc bierna i moc pozorna . . . . .	113
4.10.3. Prąd czynny i prąd bierny . . . . .	116
4.10.4. Moc zespolona . . . . .	116
4.11. Przykłady zastosowań . . . . .	119
4.11.1. Układ Hummła . . . . .	119
4.11.2. Mostek Wheatstone'a prądu sinusoidalnego . . . . .	121
4.11.3. Mostek Boucherota . . . . .	123
4.11.4. Strata i spadek napięcia . . . . .	125
4.11.5. Poprawianie współczynnika mocy . . . . .	127
<b>5. Metody analizy liniowych obwodów prądu sinusoidalnego i stałego . . . . .</b>	<b>129</b>
5.1. Wstęp . . . . .	129
5.2. Metoda praw Kirchhoffa . . . . .	130
5.3. Metoda oczkowa . . . . .	131
5.4. Twierdzenie o wzajemności . . . . .	136
5.5. Metoda węzłowa . . . . .	138
5.6. Przekształcanie układów gwiazdowych i trójkątowych . . . . .	142
5.6.1. Uwagi ogólne . . . . .	142
5.6.2. Przekształcanie układu trójkątowego na gwiazdowy . . . . .	143
5.6.3. Przekształcanie układu gwiazdowego na trójkątowy . . . . .	145
5.6.4. Obliczanie rozplywu prądów za pomocą przekształcania układów . . . . .	146
5.7. Twierdzenie Thevenina . . . . .	148
5.8. Twierdzenie Nortona . . . . .	153
<b>6. Obwody zawierające cewki magnetycznie sprzężone . . . . .</b>	<b>156</b>
6.1. Cewki magnetycznie sprzężone . . . . .	156
6.1.1. Zależności podstawowe . . . . .	156
6.1.2. Znak indukcyjności wzajemnej . . . . .	157

6.2.	Prawa Kirchhoffa dla obwodów zawierających cewki magnetycznie sprzężone . . . . .	159
6.2.1.	Prawa Kirchhoffa dla wartości chwilowych . . . . .	159
6.2.2.	Prawa Kirchhoffa w postaci zespolonej . . . . .	161
6.3.	Połączenie szeregowe i połączenie równoległe cewek magnetycznie sprzężonych . . . . .	162
6.3.1.	Połączenie szeregowe . . . . .	162
6.3.2.	Połączenie równoległe . . . . .	163
6.4.	Transformator bezrdzeniowy . . . . .	164
6.4.1.	Równania i schemat zastępczy . . . . .	164
6.4.2.	Impedancja wejściowa . . . . .	166
6.4.3.	Bilans mocy . . . . .	167
<b>7.</b>	<b>Rezonans w obwodach elektrycznych . . . . .</b>	<b>168</b>
7.1.	Wstęp . . . . .	168
7.2.	Rezonans napięć w połączeniu szeregowym elementów $R, L, C$ . . . . .	169
7.2.1.	Zależności podstawowe . . . . .	169
7.2.2.	Zjawiska energetyczne . . . . .	170
7.2.3.	Rozstrojenie bezwzględne i rozstrojenie względne . . . . .	171
7.2.4.	Szerokość pasma przepuszczania . . . . .	173
7.2.5.	Napięcia na cewce i kondensatorze . . . . .	175
7.3.	Rezonans prądów w połączeniu równoległym elementów $G, L, C$ . . . . .	177
7.3.1.	Zależności podstawowe . . . . .	177
7.3.2.	Rozstrojenie bezwzględne i rozstrojenie względne . . . . .	178
7.4.	Rezonans prądów w układach złożonych . . . . .	179
7.4.1.	Dwójnik zawierający trzy elementy . . . . .	179
7.4.2.	Dwójnik zawierający cztery elementy . . . . .	180
7.5.	Charakterystyki częstotliwościowe dwójników reaktancyjnych . . . . .	182
7.5.1.	Określenie charakterystyki częstotliwościowej . . . . .	182
7.5.2.	Charakterystyki częstotliwościowe cewki i kondensatora . . . . .	182
7.5.3.	Charakterystyki częstotliwościowe połączenia szeregowego i połączenia równoległego cewki i kondensatora . . . . .	183
7.5.4.	Podstawowe własności charakterystyk częstotliwościowych . . . . .	185
<b>8.</b>	<b>Układy trójfazowe i wielofazowe . . . . .</b>	<b>187</b>
8.1.	Określenie i podstawowe własności symetrycznych układów trójfazowych . . . . .	187
8.2.	Podstawowe zależności i pojęcia dotyczące układów trójfazowych . . . . .	189
8.2.1.	Połączenie gwiazdowe . . . . .	190
8.2.2.	Połączenie trójkątowe . . . . .	191
8.3.	Obliczanie układów trójfazowych . . . . .	192
8.4.	Symetryczne układy trójfazowe . . . . .	194
8.4.1.	Połączenie gwiazdowe . . . . .	194
8.4.2.	Połączenie trójkątowe . . . . .	197
8.5.	Moc układów trójfazowych . . . . .	201
8.5.1.	Moc czynna i moc bierna . . . . .	201
8.5.2.	Moc chwilowa symetrycznego układu trójfazowego . . . . .	203
8.6.	Pomiar mocy układów trójfazowych . . . . .	204
8.6.1.	Układy symetryczne . . . . .	204
8.6.2.	Układy niesymetryczne . . . . .	205
8.7.	Symetryczne układy wielofazowe . . . . .	207
8.7.1.	Zależności podstawowe . . . . .	207
8.7.2.	Połączenie gwiazdowe . . . . .	209

8.7.3. Połączenie wielokątowe . . . . .	210
8.8. Moc symetrycznych układów wielofazowych . . . . .	211
8.8.1. Moc czynna i moc bierna . . . . .	211
8.8.2. Moc chwilowa . . . . .	211
8.9. Niesymetryczny układ dwufazowy . . . . .	212
8.10. Składowe symetryczne . . . . .	214
<b>9. Okresowe prądy niesinusoidalne . . . . .</b>	<b>219</b>
9.1. Wstęp . . . . .	219
9.2. Szereg Fouriera . . . . .	219
9.3. Symetryczne funkcje okresowe . . . . .	222
9.3.1. Funkcje nieparzyste . . . . .	222
9.3.2. Funkcje parzyste . . . . .	223
9.3.3. Funkcje antysymetryczne . . . . .	223
9.3.4. Jednoczesne występowanie dwóch symetrii . . . . .	224
9.4. Wartość średnia i wartość skuteczna . . . . .	227
9.4.1. Wartość średnia . . . . .	227
9.4.2. Wartość skuteczna . . . . .	228
9.5. Obwody liniowe zasilane okresowymi napięciami niesinusoidalnymi . . . . .	231
9.6. Rezonans przy okresowych prądach niesinusoidalnych . . . . .	233
9.7. Wpływ indukcyjności i pojemności na wyższe harmoniczne prądu i napięcia . . . . .	235
9.8. Moc okresowych prądów niesinusoidalnych . . . . .	236
9.8.1. Wariant Budeanu . . . . .	236
9.8.2. Wariant Fryzego . . . . .	239
9.9. Współczynniki szczytu i kształtu . . . . .	241
9.9.1. Określenia . . . . .	241
9.9.2. Siła elektromotoryczna indukowana w cewce . . . . .	242
9.10. Wyższe harmoniczne w układach trójfazowych . . . . .	242
9.10.1. Zależności podstawowe . . . . .	242
9.10.2. Układy gwiazdowe . . . . .	243
9.10.3. Układy trójkątowe . . . . .	244
9.11. Szereg Fouriera w postaci zespolonej . . . . .	245
<b>10. Linia długa . . . . .</b>	<b>248</b>
10.1. Wstęp . . . . .	248
10.2. Równania telegrafistów . . . . .	249
10.3. Równania linii długiej w stanie ustalonym . . . . .	250
10.4. Parametry falowe linii długiej . . . . .	253
10.5. Zjawiska falowe w linii długiej . . . . .	254
10.5.1. Fala pierwotna i fala odbita . . . . .	254
10.5.2. Prędkość fali w linii bezstratnej . . . . .	256
10.6. Odbicie fal na końcu linii długiej . . . . .	258
10.7. Linia nieznieształcająca . . . . .	260
10.8. Linia bezstratna . . . . .	261
10.8.1. Zależności podstawowe . . . . .	261
10.8.2. Stan jałowy linii . . . . .	263
10.8.3. Stan zwarcia linii . . . . .	263
10.8.4. Linia obciążona reaktancją . . . . .	264
10.9. Impedancja wejściowa linii długiej . . . . .	264

<b>11. Stany niestabilne</b>	267
11.1. Wstęp	267
11.1.1. Wprowadzenie	267
11.1.2. Równania różniczkowe dla składowych	267
11.2. Obwody zawierające szeregowe połączenie elementów $R, L$	269
11.2.1. Wzór Helmholtza	269
11.2.2. Zwarcie gałęzi	270
11.2.3. Zmiana rezystancji	271
11.2.4. Włączenie napięcia sinusoidalnego	272
11.3. Obwody zawierające szeregowe połączenie elementów $R, C$	275
11.3.1. Wzór Helmholtza	275
11.3.2. Ładowanie kondensatora	276
11.3.3. Wyladowanie kondensatora	278
11.3.4. Włączenie napięcia sinusoidalnego	280
11.4. Stany niestabilne w szeregowym połączeniu elementów $R, L, C$	282
11.5. Szeregowe połączenie elementów $R, L, C$ zasilane napięciem stałym	286
11.5.1. Wyladowanie kondensatora	286
11.5.2. Ładowanie kondensatora	290
11.6. Szeregowe połączenie elementów $R, L, C$ zasilane napięciem sinusoidalnym	293
11.7. Stany niestabilne w obwodach rozgałęzionych	297
<b>12. Zastosowanie przekształcenia Laplace'a do analizy stanów niestabilnych</b>	301
12.1. Wstęp	301
12.2. Podstawowe wzory i twierdzenia	302
12.3. Obliczanie oryginału	306
12.3.1. Twierdzenie o rozkładzie	306
12.3.2. Wzór Heaviside'a	307
12.3.3. Pierwiastki zespolone	308
12.3.4. Pierwiastki wielokrotne	309
12.4. Impedancja operatorowa i admitancja operatorowa	310
12.4.1. Impedancja operatorowa	310
12.4.2. Admitancja operatorowa	314
12.4.3. Układ drabinkowy	314
12.5. Prawo Ohma w postaci operatorowej	316
12.6. Prawo Kirchhoffa w postaci operatorowej	320
12.6.1. I prawo Kirchhoffa	320
12.6.2. II prawo Kirchhoffa	321
12.6.3. Obwody nie zawierające cewek magnetycznie sprzężonych	321
12.6.4. Schemat zastępczy obwodu z niezerowymi warunkami początkowymi	325
12.6.5. Obwody zawierające cewki magnetycznie sprzężone	327
12.7. Twierdzenie Thevenina i twierdzenie Nortona	328
12.7.1. Twierdzenie Thevenina	328
12.7.2. Twierdzenie Nortona	333
12.8. Równania oczkowe i węzłowe w postaci operatorowej	335
12.8.1. Równania oczkowe	335
12.8.2. Równania węzłowe	337
12.9. Równania linii długiej w postaci operatorowej	339
12.9.1. Zależności podstawowe	339
12.9.2. Włączenie napięcia do linii o długości nieskończonej	341
12.9.3. Włączenie napięcia do linii o długości skończonej	341

12.9.4. Linia długa obciążona falowo . . . . .	342
12.10. Włączenie napięcia do linii bezstratnej o długości nieskończonej . . . . .	343
12.11. Włączenie napięcia do linii bezstratnej o długości skończonej . . . . .	345
<b>13. Czwórniki . . . . .</b>	<b>350</b>
13.1. Określenia podstawowe . . . . .	350
13.2. Równania czwórnika . . . . .	351
13.2.1. Równania admitancyjne . . . . .	351
13.2.2. Równania impedancyjne . . . . .	354
13.2.3. Równania łańcuchowe . . . . .	356
13.2.4. Równania mieszane (hybrydowe) . . . . .	357
13.3. Czwórniki odwracalne i czwórniki symetryczne . . . . .	359
13.3.1. Czwórniki odwracalne . . . . .	359
13.3.2. Zmiana strony zasilania . . . . .	361
13.3.3. Czwórniki symetryczne . . . . .	362
13.4. Czwórniki T, $\Pi$ , X . . . . .	363
13.4.1. Czwórnik T . . . . .	363
13.4.2. Czwórnik $\Pi$ . . . . .	365
13.4.3. Symetryczny czwórnik X . . . . .	367
13.5. Połączenie łańcuchowe . . . . .	369
13.6. Połączenie szeregowe i połączenie równoległe czwórników . . . . .	371
13.6.1. Połączenie szeregowe . . . . .	371
13.6.2. Połączenie równoległe . . . . .	374
13.6.3. Połączenie szeregowo-równoległe . . . . .	377
13.6.4. Połączenie równoległo-szeregowe . . . . .	377
13.7. Parametry czwórników symetrycznych przy prądzie sinusoidalnym . . . . .	379
13.7.1. Uwagi ogólne . . . . .	379
13.7.2. Parametry falowe czwórnika symetrycznego . . . . .	380
13.8. Równania łańcuchowe czwórnika symetrycznego zawierające funkcje hiperboliczne . . . . .	383
13.8.1. Równania podstawowe . . . . .	383
13.8.2. Połączenie łańcuchowe jednakowych czwórników symetrycznych . . . . .	384
13.9. Stan jałowy i stan zwarcia czwórnika symetrycznego . . . . .	385
<b>14. Filtry elektryczne . . . . .</b>	<b>387</b>
14.1. Określenie i klasyfikacja filtrów elektrycznych . . . . .	387
14.2. Własności podstawowe filtrów reaktancyjnych . . . . .	388
14.2.1. Zależności podstawowe . . . . .	388
14.2.2. Wyznaczanie zakresów przepuszczania i tłumienia . . . . .	389
14.3. Przykłady filtrów reaktancyjnych . . . . .	391
14.3.1. Filtr dolnoprzepustowy . . . . .	391
14.3.2. Filtr górnoprzepustowy . . . . .	393
14.3.3. Filtr pasmowy . . . . .	394
14.4. Filtr RC . . . . .	396
<b>15. Czwórniki aktywne . . . . .</b>	<b>399</b>
15.1. Wstęp . . . . .	399
15.2. Wzmacniacz operacyjny . . . . .	399
15.2.1. Pojęcia podstawowe . . . . .	399

15.2.2. Sumator . . . . .	400
15.2.3. Układ całkujący . . . . .	401
15.2.4. Układ różniczkujący . . . . .	402
15.3. Równania macierzowe i realizacja źródeł sterowanych . . . . .	402
15.4. Konwerter impedancji . . . . .	404
15.4.1. Zależności podstawowe . . . . .	404
15.4.2. Idealny konwerter ujemnie impedancyjny . . . . .	405
15.5. Inwerter impedancji . . . . .	406
15.5.1. Zależności podstawowe . . . . .	406
15.5.2. Idealny inwerter dodatnio impedancyjny. Żyrator . . . . .	407
15.5.3. Idealny inwerter ujemnie impedancyjny . . . . .	409
<b>16. Funkcje charakteryzujące obwody elektryczne . . . . .</b>	<b>411</b>
16.1. Wstęp . . . . .	411
16.2. Określenie transmitancji . . . . .	411
16.3. Transmitancje obwodu elektrycznego . . . . .	414
16.3.1. Dwójniki . . . . .	414
16.3.2. Czwórniki . . . . .	414
16.3.3. Podstawowe własności transmitancji . . . . .	416
16.4. Odpowiedź przejściowa i odpowiedź ustalona . . . . .	418
16.5. Stabilność układów liniowych . . . . .	420
16.5.1. Konieczny i dostateczny warunek stabilności . . . . .	420
16.5.2. Równanie charakterystyczne . . . . .	422
16.6. Bieguny i zera transmitancji . . . . .	424
16.7. Odpowiedź jednostkowa i odpowiedź impulsowa . . . . .	425
16.7.1. Funkcja jednostkowa i funkcja impulsowa . . . . .	425
16.7.2. Odpowiedź jednostkowa . . . . .	428
16.7.3. Odpowiedź impulsowa . . . . .	432
16.7.4. Zależność między odpowiedzią impulsową a jednostkową . . . . .	435
16.8. Wymuszenie wykładnicze . . . . .	436
16.8.1. Sygnał wykładniczy . . . . .	436
16.8.2. Odpowiedź ustalona układu na wymuszenie wykładnicze . . . . .	437
16.9. Transmitancja widmowa . . . . .	438
16.9.1. Zależności podstawowe . . . . .	438
16.9.2. Wyznaczanie transmitancji widmowej na podstawie rozkładu biegunów i zer . . . . .	440
16.10. Charakterystyki częstotliwościowe . . . . .	441
16.10.1. Zależności podstawowe . . . . .	441
16.10.2. Charakterystyka amplitudowo-fazowa . . . . .	443
16.11. Wzory całkowite dla odpowiedzi jednostkowej i impulsowej . . . . .	445
16.11.1. Odpowiedź jednostkowa . . . . .	445
16.11.2. Odpowiedź impulsowa . . . . .	448
16.12. Wzory całkowite dla odpowiedzi na wymuszenie sinusoidalne . . . . .	449
16.12.1. Zależności podstawowe . . . . .	449
16.12.2. Odpowiedź układu na wymuszenie $A \sin \omega_0 t$ . . . . .	451
16.12.3. Odpowiedź układu na wymuszenie $A \cos \omega_0 t$ . . . . .	453
<b>17. Układy wielozaciskowe . . . . .</b>	<b>455</b>
17.1. Wstęp . . . . .	455
17.2. Równania $n$ -wrotnika . . . . .	456



17.3.	Macierz nieokreślona wielobiegownika . . . . .	457
17.4.	Przekształcanie wielobiegowników . . . . .	460
17.4.1.	Uziemienie zacisku . . . . .	460
17.4.2.	Połączenie równoległe wielobiegowników . . . . .	461
17.5.	Obliczanie transmitancji i immitancji wielobiegowników . . . . .	463
<b>18.</b>	<b>Schematy blokowe. Grafy sygnałowe Masona . . . . .</b>	<b>467</b>
18.1.	Wstęp . . . . .	467
18.2.	Schematy blokowe . . . . .	467
18.2.1.	Pojęcia podstawowe . . . . .	467
18.2.2.	Połączenie łańcuchowe i połączenie równoległe . . . . .	470
18.3.	Sprzężenie zwrotne . . . . .	471
18.3.1.	Zależności podstawowe . . . . .	471
18.3.2.	Sprzężenie zwrotne dodatnie i ujemne . . . . .	474
18.4.	Przekształcanie schematów blokowych . . . . .	475
18.5.	Grafy sygnałowe Masona . . . . .	479
18.6.	Wyznaczanie grafów sygnałowych Masona . . . . .	482
18.7.	Przekształcanie grafów sygnałowych Masona . . . . .	486
18.8.	Wzór Masona na transmitancję grafu sygnałowego . . . . .	490
<b>19.</b>	<b>Zastosowanie przekształcenia dyskretnego <math>\mathcal{Z}</math> . . . . .</b>	<b>492</b>
19.1.	Wiadomości podstawowe . . . . .	492
19.2.	Określenie przekształcenia $\mathcal{Z}$ . . . . .	493
19.3.	Własności przekształcenia $\mathcal{Z}$ . . . . .	495
19.4.	Przekształcenie odwrotne . . . . .	499
19.4.1.	Metoda rozwinięcia w szereg potęgowy . . . . .	499
19.4.2.	Metoda rozkładu na ułamki proste . . . . .	501
19.5.	Równania różnicowe . . . . .	501
19.5.1.	Uwagi ogólne . . . . .	501
19.5.2.	Rozwiązywanie równań różnicowych . . . . .	502
19.6.	Transmitancja dyskretna. Dyskretna odpowiedź impulsowa . . . . .	505
19.6.1.	Określenie transmitancji dyskretnej . . . . .	505
19.6.2.	Dyskretna odpowiedź impulsowa . . . . .	505
<b>20.</b>	<b>Elementy analizy macierzowej obwodów . . . . .</b>	<b>509</b>
20.1.	Wstęp . . . . .	509
20.2.	Prawa Kirchhoffa w postaci macierzowej . . . . .	509
20.2.1.	Uwagi ogólne . . . . .	509
20.2.2.	I prawo Kirchhoffa . . . . .	510
20.2.3.	II prawo Kirchhoffa . . . . .	513
20.2.4.	Zależności między macierzami łączącymi . . . . .	515
20.2.5.	Twierdzenie Tellegena . . . . .	516
20.3.	Macierze impedancji i admittancji gałęziowych . . . . .	517
20.3.1.	Macierz impedancji gałęziowych . . . . .	517
20.3.2.	Macierz admittancji gałęziowych . . . . .	520
20.4.	Równania oczkowe i równania węzłowe . . . . .	521
20.4.1.	Równania oczkowe . . . . .	521
20.4.2.	Równania węzłowe . . . . .	523

20.5.	Równania stanu . . . . .	524
20.6.	Jednorodne równanie stanu . . . . .	526
20.6.1.	Rozwiązanie jednorodnego równania stanu . . . . .	526
20.6.2.	Wzór Sylwestera . . . . .	528
20.6.3.	Przykład jednorodnego równania stanu . . . . .	529
20.7.	Rozwiązanie niejednorodnego równania stanu . . . . .	530
20.7.1.	Rozwiązanie ogólne . . . . .	530
20.7.2.	Macierz tranzycyjna . . . . .	533
20.7.3.	Modelowanie cyfrowe równania stanu . . . . .	534
20.8.	Dyskretne równania stanu . . . . .	535
<b>21.</b>	<b>Synteza dwójników pasywnych . . . . .</b>	<b>538</b>
21.1.	Wstęp . . . . .	538
21.2.	Funkcje energetyczne . . . . .	539
21.3.	Funkcje rzeczywiste dodatnie . . . . .	543
21.3.1.	Określenie funkcji rzeczywistej dodatniej . . . . .	543
21.3.2.	Własności funkcji rzeczywistych dodatnich . . . . .	544
21.4.	Dwójniki reaktancyjne . . . . .	546
21.4.1.	Zależności podstawowe . . . . .	546
21.4.2.	Własności funkcji reaktancyjnej . . . . .	549
21.5.	Dwójniki <i>RC</i> i <i>RL</i> . . . . .	550
21.5.1.	Impedancja dwójników <i>RC</i> i admitancja dwójników <i>RL</i> . . . . .	550
21.5.2.	Impedancja dwójników <i>RL</i> i admitancja dwójników <i>RC</i> . . . . .	552
21.6.	Dwójniki <i>RLC</i> . . . . .	555
21.6.1.	Uwagi ogólne . . . . .	555
21.6.2.	Metoda kolejnego wyodrębniania biegunów i zer . . . . .	556
21.6.3.	Metoda rozkładu na ułamek łańcuchowy . . . . .	558
<b>22.</b>	<b>Zastosowanie przekształcenia Fouriera . . . . .</b>	<b>562</b>
22.1.	Przekształcenie Fouriera. Gęstość widmowa . . . . .	562
22.2.	Podstawowe wzory i twierdzenia . . . . .	564
22.3.	Przykłady obliczania gęstości widmowej . . . . .	569
22.4.	Przekształcenie odwrotne . . . . .	575
22.4.1.	Uwagi ogólne . . . . .	575
22.4.2.	Obliczanie oryginału za pomocą residuów . . . . .	575
22.4.3.	Wzór całkowy . . . . .	577
22.5.	Obliczanie odpowiedzi układów liniowych . . . . .	578
22.6.	Gęstość widmowa funkcji okresowych . . . . .	581
22.6.1.	Zależności podstawowe . . . . .	581
22.6.2.	Odpowiedź ustalona układu na okresowe wymuszenie niesinusoidalne . . . . .	583
22.7.	Przyczynowość i realizowalność fizyczna . . . . .	584
22.7.1.	Przenoszenie bez zniekształceń . . . . .	584
22.7.2.	Filtry idealne . . . . .	586
22.7.3.	Kryterium Payleja-Wienera . . . . .	587
22.8.	Dyskretne przekształcenie Fouriera . . . . .	588
<b>23.</b>	<b>Obwody niestacjonarne . . . . .</b>	<b>590</b>
23.1.	Wstęp . . . . .	590
23.2.	Równania stanu dla obwodów niestacjonarnych . . . . .	590

23.3.	Rozwiązanie niejednorodnego równania stanu . . . . .	592
23.3.1.	Zależności podstawowe . . . . .	592
23.3.2.	Własności równania jednorodnego . . . . .	593
23.4.	Rozwiązanie numeryczne . . . . .	594

## **Część II. Obwody nieliniowe . . . . .** 596

### **24. Obwody nieliniowe prądu stałego . . . . .** 596

24.1.	Wstęp . . . . .	596
24.2.	Szeregowe połączenie elementów nieliniowych . . . . .	597
24.3.	Równoległe połączenie elementów nieliniowych . . . . .	598
24.4.	Obwody zawierające jeden element nieliniowy . . . . .	600

### **25. Obwody nieliniowe prądu okresowego . . . . .** 602

25.1.	Pojęcia podstawowe . . . . .	602
25.1.1.	Charakterystyki elementów nieliniowych . . . . .	602
25.1.2.	Odształcanie wielkości sinusoidalnych . . . . .	604
25.2.	Elementy warunkowo nieliniowe . . . . .	605
25.3.	Aproksymacja charakterystyk nieliniowych . . . . .	606
25.3.1.	Aproksymacja za pomocą wielomianu . . . . .	607
25.3.2.	Aproksymacja za pomocą funkcji wykładniczej . . . . .	609
25.4.	Parametry statyczne i dynamiczne . . . . .	609
25.4.1.	Opór statyczny . . . . .	609
25.4.2.	Opór dynamiczny . . . . .	610
25.4.3.	Parametry statyczne i dynamiczne cewki i kondensatora . . . . .	613
25.5.	Cewka z rdzeniem stalowym . . . . .	614
25.5.1.	Uwagi ogólne . . . . .	614
25.5.2.	Odształcenie prądu w uzwojeniu cewki . . . . .	614
25.5.3.	Wpływ strat w rdzeniu . . . . .	618
25.5.4.	Równania i schemat zastępczy cewki z rdzeniem stalowym . . . . .	619
25.6.	Transformator z rdzeniem stalowym . . . . .	622
25.6.1.	Zależności podstawowe . . . . .	622
25.6.2.	Równania i schemat zastępczy transformatora . . . . .	626
25.7.	Ferrorezonans napięć i prądów . . . . .	629
25.7.1.	Ferrorezonans napięć . . . . .	629
25.7.2.	Ferrorezonans prądów . . . . .	632
25.7.3.	Stabilizacja napięcia . . . . .	634
25.8.	Potrojenie częstotliwości . . . . .	635
25.8.1.	Układ zawierający trzy cewki nieliniowe . . . . .	635
25.8.2.	Układ zawierający trzy transformatory . . . . .	636
25.9.	Cewka z rdzeniem stalowym zasilana prądem stałym i zmiennym . . . . .	638
25.10.	Podwojenie częstotliwości . . . . .	639
25.11.	Prostowanie prądu sinusoidalnego . . . . .	642
25.11.1.	Zależności podstawowe . . . . .	642
25.11.2.	Prostowanie półfalowe (jdnopolówkowe) . . . . .	643
25.11.3.	Prostowanie całofalowe (dwupółówkowe) . . . . .	644
25.12.	Obwody zawierające prostowniki i kondensator . . . . .	645
25.12.1.	Obwód zawierający jeden prostownik . . . . .	645
25.12.2.	Obwód zawierający dwa prostowniki . . . . .	647

25.13.	Obwody zawierające prostowniki i cewkę . . . . .	648
25.13.1.	Obwód zawierający jeden prostownik . . . . .	648
25.13.2.	Obwód zawierający dwa prostowniki . . . . .	650
25.14.	Drgania relaksacyjne . . . . .	651
<b>26.</b>	<b>Analiza obwodów nieliniowych . . . . .</b>	<b>653</b>
26.1.	Wstęp . . . . .	653
26.2.	Metoda linearyzacji jednoducinkowej . . . . .	654
26.2.1.	Uwagi ogólne . . . . .	654
26.2.2.	Obwód zasilany napięciem stałym . . . . .	654
26.2.3.	Obwód zasilany napięciem sinusoidalnym . . . . .	656
26.3.	Metoda linearyzacji wieloducinkowej . . . . .	658
26.4.	Metoda aproksymacji analitycznej . . . . .	661
26.5.	Metoda całkowania graficznego . . . . .	665
26.6.	Metoda Preismana . . . . .	666
26.7.	Płaszczyzna fazowa . . . . .	668
26.7.1.	Określenia płaszczyzny fazowej i trajektorii fazowej . . . . .	668
26.7.2.	Podstawowe własności trajektorii fazowych . . . . .	669
26.7.3.	Cykl graniczny . . . . .	671
26.8.	Metoda bilansu harmoniczných . . . . .	672
26.8.1.	Uwagi ogólne . . . . .	672
26.8.2.	Przybliżone rozwiązanie równania Duffinga . . . . .	672
26.8.3.	Zmiany skokowe amplitudy drgań . . . . .	674
26.9.	Metoda małego parametru . . . . .	676
26.9.1.	Uwagi ogólne . . . . .	676
26.9.2.	Przykład równania jednorodnego . . . . .	676
26.9.3.	Przykład równania niejednorodnego . . . . .	679
26.9.4.	Podharmoniczne . . . . .	681
26.10.	Metoda pierwszej harmonicznej . . . . .	683
26.11.	Równania stanu dla obwodów nieliniowych . . . . .	685
	<b>Tablica przekształceń Laplace'a . . . . .</b>	<b>688</b>
	<b>Literatura . . . . .</b>	<b>691</b>
	<b>Skorowidz . . . . .</b>	<b>694</b>