

## Opis

Teoria obwodów elektrycznych to samodzielna dyscyplina naukowa, której dogłębne poznanie umożliwia studiowanie wszystkich innych przedmiotów wykładanych na wydziałach elektrycznych wyższych szkół technicznych.

Oto dziesiąte wydanie podręcznika z teorii obwodów elektrycznych, w którym przedstawiono analizę obwodów elektrycznych liniowych prądu przemiennego, metody rozwiązywania obwodów wielooczkowych i wielowęzłowych, analizę układów trójfazowych, teorię czwórników i teorię obwodów o parametrach rozłożonych. Analizę obwodów liniowych w stanach nieustalonych omówiono przy zastosowaniu metody klasycznej, metody operatorowej oraz metody zmiennych stanu. Podano też podstawy teorii grafów przepływowych oraz schematów blokowych. Obwody nieliniowe przeanalizowano z punktu widzenia zjawisk występujących w tych obwodach.

Wydawnictwo poleca tę książkę studentom wydziałów elektrycznych wyższych szkół technicznych. Może być ona także przydatna dla pracowników naukowych oraz inżynierów elektryków.

## Spis treści

Przedmowa .....	13
1. Wiadomości wstępne .....	15
1.1. Wielkości i jednostki używane w elektrotechnice .....	15
1.2. Pojęcia podstawowe elektrotechniki .....	19
2. Elementy obwodów elektrycznych .....	24
2.1. Klasyfikacja elementów .....	24
2.2. Elementy pasywne .....	26
2.2.1. Rezystor .....	26
2.2.2. Cewka .....	30
2.2.3. Kondensator .....	32
2.2.4. Elementy pasywne rzeczywiste .....	34
2.3. Elementy aktywne .....	35
2.3.1. Źródła niesterowane .....	36
2.3.2. Źródła sterowane .....	37

2.3.3. Elementy aktywne niezróżdłowe . . . . .	38
3. Podstawowe prawa i właściwości obwodu elektrycznego . . .	41
3.1. Pojęcia podstawowe . . . . .	41
3.2. Właściwości obwodu elektrycznego . . . . .	42
3.2.1. Liniowość obwodu . . . . .	42
3.2.2. Stacjonarność obwodu . . . . .	42
3.2.3. Pasywność obwodu . . . . .	43
3.2.4. Obwód o parametrach skupionych i rozłożonych . . . . .	43
3.3. Prawa Kirchhoffa . . . . .	44
4. Sygnały elektryczne i ich klasyfikacja . . . . .	45
4.1. Klasyfikacja sygnałów . . . . .	45
4.2. Wielkości charakteryzujące sygnały okresowe . . . . .	48
4.3. Sygnał wykładniczy . . . . .	50
4.4. Sygnał sinusoidalny . . . . .	52
4.5. Sygnał jednostkowy i impulsowy . . . . .	53
5. Obwody liniowe prądu stałego . . . . .	56
5.1. Zastosowanie prawa Ohma i praw Kirchhoffa . . . . .	56
5.2. Przekształcanie schematów zastępczych źródeł energii . . . . .	60
5.3. Moc prądu stałego i bilans mocy . . . . .	63
5.4. Dopasowanie odbiornika do źródła i sprawność źródeł. . . . .	65
5.5. Metoda charakterystyk . . . . .	68
6. Obwody jednofazowe nierozgałęzione prądu sinusoidalnego . . . .	70
6.1. Zastosowanie metody liczb zespolonych . . . . .	70
6.2. Wykresy wektorowe . . . . .	73
6.3. Analiza dwójników zawierających elementy RLC . . . . .	74
6.3.1. Dwójnik szeregowy RLC . . . . .	74
6.3.2. Dwójnik równoległy RLC . . . . .	79

6.3.3. Dwójniki szeregowy i równoległy RL oraz RC; dwójniki idealne R, L, C . . . . .	82
6.4. Moc w obwodzie prądu sinusoidalnego . . . . .	85
6.4.1. Moc chwilowa . . . . .	85
6.4.2. Moc czynna, bierna i pozorna . . . . .	88
6.4.3. Trójkąt mocy . . . . .	90
6.4.4. Postać zespolona mocy pozornej . . . . .	91
6.4.5. Moc w rezystorze idealnym o rezystancji R . . . . .	94
6.4.6. Moc w cewce idealnej o indukcyjności L . . . . .	95
6.4.7. Moc w kondensatorze idealnym o pojemności C . . . . .	96
6.4.8. Moc w dwójniku szeregowym RLC . . . . .	97
6.5. Schematy zastępcze kondensatora rzeczywistego . . . . .	99
6.6. Schematy zastępcze cewki rzeczywistej . . . . .	103
7. Metody obliczania obwodów rozgałęzionych . . . . .	106
7.1. Pojęcia podstawowe z dziedziny topologii obwodów . . . . .	106
7.2. Macierze strukturalne . . . . .	108
7.3. Prawo Ohma i prawa Kirchhoffa w postaci macierzowej . . . . .	112
7.4. Metoda oczkowa . . . . .	118
7.5. Metoda węzłowa . . . . .	126
7.6. Twierdzenie o włączaniu dodatkowych idealnych źródeł napięcia . . . . .	136
7.7. Twierdzenie o włączaniu dodatkowych idealnych źródeł prądu . . . . .	137
7.8. Twierdzenie o wzajemności . . . . .	139
7.9. Przekształcanie i upraszczanie obwodów rozgałęzionych . . . . .	140
7.9.1. Twierdzenie o zastępczym źródle energii . . . . .	141
7.9.2. Zastępowanie n źródeł rzeczywistych połączonych równoległe jednym źródłem . . . . .	145
7.9.3. Przekształcanie trójkąta impedancji w gwiazdę impedancji i odwrotnie . . . . .	148
8. Rezonans w obwodach elektrycznych . . . . .	151
8.1. Rezonans napięć . . . . .	151

8.2. Rezonans prądów . . . . .	157
8.3. Rezonans w układach równoległo-szeregowych . . . . .	163
8.4. Charakterystyki częstotliwościowe idealnych układów rezonansowych . . . . .	167
8.5. Znaczenie praktyczne zjawiska rezonansu . . . . .	168
9. Obwody z indukcyjnością wzajemną . . . . .	170
9.1. Zjawiska fizyczne przy sprzężeniu magnetycznym elementów obwodów . . . . .	170
9.2. Zaciski jednoimienne i ich oznaczanie . . . . .	174
9.3. Połączenie szeregowe elementów sprzężonych magnetycznie . . . . .	176
9.4. Połączenie równoległe elementów sprzężonych magnetycznie . . . . .	178
9.5. Zastępowanie układu ze sprzężeniem układem bez sprzężenia . . . . .	180
9.6. Rozwiązywanie obwodów rozgałęzionych prądu sinusoidalnego zawierających elementy sprzężone magnetycznie . . . . .	184
10. Transformatory . . . . .	187
10.1. Zasada działania transformatora . . . . .	187
10.2. Transformator powietrzny . . . . .	189
10.3. Transformator z rdzeniem ferromagnetycznym . . . . .	195
10.3.1. Budowa transformatorów . . . . .	195
10.3.2. Odształcenie krzywej prądu . . . . .	196
10.3.3. Straty w rdzeniu transformatora . . . . .	197
10.3.4. Równania i wykres wektorowy transformatora . . . . .	200
10.3.5. Transformator idealny . . . . .	206
10.3.6. Schematy zastępcze transformatora . . . . .	208
11. Układy trójfazowe . . . . .	210
11.1. Klasyfikacja układów trójfazowych i pojęcia podstawowe . . . . .	210
11.2. Obliczanie układów trójfazowych symetrycznych . . . . .	214
11.2.1. Połączenie odbiornika w gwiazdę . . . . .	214
11.2.2. Połączenie odbiornika w trójkąt . . . . .	217

11.3. Obliczanie układów trójfazowych niesymetrycznych . . . . .	219
11.3.1. Połączenie odbiornika w gwiazdę . . . . .	219
11.3.2. Połączenie odbiornika w trójkąt . . . . .	223
11.4. Pomiar mocy w układach trójfazowych . . . . .	224
11.4.1. Pomiar mocy w układach symetrycznych . . . . .	224
11.4.2. Pomiar mocy w układach niesymetrycznych . . . . .	228
11.5. Pole magnetyczne wirujące . . . . .	230
11.6. Metoda składowych symetrycznych . . . . .	233
11.7. Składowe $\alpha, \beta, 0$ . . . . .	243
12. Obliczanie obwodów elektrycznych przy przebiegach niesinusoidalnych . . . . .	246
12.1. Rozwinięcie funkcji okresowej w szereg Fouriera . . . . .	246
12.2. Postacie szeregu Fouriera i obliczanie współczynników szeregu . . . . .	248
12.3. Rodzaje symetrii sygnałów okresowych odkształconych . . . . .	252
12.3.1. Symetria względem osi odciętych . . . . .	252
12.3.2. Symetria względem osi rzędnych . . . . .	253
12.3.3. Symetria względem początku układu współrzędnych . . . . .	254
12.4. Twierdzenie Parsewala . . . . .	255
12.5. Wartość skuteczna napięcia i prądu niesinusoidalnego . . . . .	256
12.6. Moc przy przebiegach niesinusoidalnych . . . . .	257
12.7. Rozwiązywanie obwodów jednofazowych przy wymuszeniach okresowych niesinusoidalnych . . . . .	259
12.8. Zależność krzywej prądu od charakteru obwodu . . . . .	262
12.9. Wyższe harmoniczne w układach trójfazowych . . . . .	263
13. Analiza częstotliwościowa . . . . .	272
13.1. Przekształcenie Fouriera i całka Fouriera . . . . .	272
13.2. Widmo amplitudowe i widmo fazowe . . . . .	275
13.2.1. Widmo amplitudowe i widmo fazowe funkcji okresowej . . . . .	275

13.2.2. Widmo amplitudowe i widmo fazowe funkcji nieokresowej . . . . .	277
14. Stany nieustalone w obwodach liniowych . . . . .	279
14.1. Pojęcia podstawowe . . . . .	279
14.2. Warunki początkowe, prawa komutacji . . . . .	280
14.3. Metody analizy obwodów liniowych w stanie nieustalonym . . . . .	281
14.4. Metoda klasyczna analizy stanów nieustalonych . . . . .	282
14.4.1. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, L przy wymuszeniu stałym . . . . .	284
14.4.2. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, L przy zwarcie . . . . .	287
14.4.3. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, L przy wymuszeniu sinusoidalnym . . . . .	289
14.5. Metoda operatorowa analizy stanów nieustalonych . . . . .	292
14.5.1. Przekształcenie Laplace'a i jego własności . . . . .	292
14.5.2. Wyznaczanie oryginału funkcji operatorowej . . . . .	295
14.5.3. Impedancja, admitancja i transmitancja operatorowa, prawa Kirchhoffa dla transformata . . . . .	298
14.5.4. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, C przy wymuszeniu stałym . . . . .	302
14.5.5. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, C przy zwarcie . . . . .	305
14.5.6. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, C przy wymuszeniu sinusoidalnym . . . . .	307
14.5.7. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, L, C przy wymuszeniu stałym . . . . .	310
14.5.8. Stan nieustalony w gałęzi szeregowej R, L, C przy zwarcie . . . . .	316
14.6. Rozwiązywanie obwodów w stanie nieustalonym metodą klasyczną i operatorową łącznie . . . . .	319
14.7. Rozwiązywanie obwodów w stanie nieustalonym z zastosowaniem twierdzenia Thevenina i twierdzenia Nortona . . . . .	322
14.8. Rozwiązywanie obwodów w stanie nieustalonym przy zastosowaniu całki splotowej i całki Duhamela . . . . .	327
14.9. Metoda zmiennych stanu . . . . .	334
14.9.1. Istota metody . . . . .	334

14.9.2. Formułowanie równań stanu . . . . .	336
14.9.3. Rozwiązywanie równania stanu . . . . .	339
14.9.4. Wartości własne i wektory własne macierzy kwadratowej . . . . .	341
14.9.5. Obliczanie macierzy e At . . . . .	342
14.9.6. Zastosowanie metody zmiennych stanu do obliczania stanu nieustalonego w gałęzi R, L, C przy zwarciu . . . . .	350
15. Schematy blokowe i grafy przepływu sygnałów . . . . .	353
15.1. Elementy schematu blokowego . . . . .	353
15.2. Tworzenie schematu blokowego obwodu elektrycznego . . . . .	354
15.3. Reguły upraszczania schematów blokowych . . . . .	355
15.3.1. Połączenie kaskadowe bloków . . . . .	355
15.3.2. Połączenie równoległe bloków . . . . .	356
15.3.3. Schemat blokowy układu ze sprzężeniem zwrotnym. . . . .	356
15.3.4. Przenoszenie węzła zaczepowego. . . . .	357
15.3.5. Przenoszenie węzła sumacyjnego . . . . .	358
15.4. Wyznaczanie transmitancji zastępczej układu równoważnego . . . . .	359
15.5. Grafy przepływu sygnałów Masona. Pojęcia podstawowe . . . . .	362
15.6. Tworzenie grafu przepływowego obwodu elektrycznego . . . . .	365
15.7. Reguły redukcji grafów . . . . .	367
15.7.1. Połączenie kaskadowe gałęzi . . . . .	367
15.7.2. Połączenie równoległe gałęzi . . . . .	368
15.7.3. Eliminacja węzła pośredniego i pętli własnej . . . . .	368
15.7.4. Inwersja gałęzi grafu . . . . .	370
15.8. Reguła ogólna Masona . . . . .	371
15.9. Grafy wzmacniacza operacyjnego . . . . .	372
16. Czwórniki . . . . .	379
16.1. Określenia i właściwości n-wrotnika . . . . .	379

16.2. Pojęcia podstawowe dotyczące czwórników .....	382
16.3. Równania czwórnika .....	383
16.4. Warunki symetrii i odwracalności czwórnika .....	391
16.5. Stany pracy czwórnika .....	392
16.6. Impedancja wejściowa czwórnika .....	392
16.7. Sens fizyczny parametrów łańcuchowych A, B, C, D .....	395
16.8. Czwórniki pasywne .....	396
16.8.1. Schematy zastępcze czwórników pasywnych. ....	396
16.8.2. Wyznaczanie parametrów łańcuchowych A, B, C, D w funkcji impedancji w stanie jałowym i w stanie zwarcia .....	399
16.8.3. Impedancja charakterystyczna czwórnika symetrycznego .....	402
16.8.4. Współczynnik tłumienia, współczynnik fazowy, współczynnik przenoszenia czwórnika symetrycznego .....	403
16.8.5. Równania czwórnika symetrycznego w zależności od funkcji hiperbolicznych . . . .	406
16.9. Czwórniki aktywne .....	408
16.9.1. Klasyfikacja czwórników aktywnych .....	408
16.9.2. Schematy zastępcze czwórników aktywnych .....	408
16.9.3. Źródła sterowane .....	410
16.9.4. Konwertery impedancji .....	411
16.9.5. Inwertery impedancji .....	412
16.9.6. Realizacja źródeł sterowanych, konwerterów i inwerterów .....	415
16.9.7. Podstawowe układy wykorzystujące wzmacniacz operacyjny .....	416
16.10. Połączenia czwórników .....	418
16.10.1. Połączenie łańcuchowe czwórników .....	418
16.10.2. Połączenie równoległe czwórników .....	420
16.10.3. Połączenie szeregowe czwórników .....	422
16.10.4. Połączenie szeregowo-równoległe czwórników .....	423



16.10.5. Połączenie równoległo-szeregowe czwórników . . . . .	425
17. Filtry częstotliwościowe . . . . .	428
17.1. Określenia podstawowe i klasyfikacja filtrów . . . . .	428
17.2. Zależności ogólne dotyczące filtrów typu k . . . . .	429
17.3. Filtr dolnoprzepustowy . . . . .	431
17.4. Filtr górnoprzepustowy . . . . .	434
17.5. Filtr pasmowy i filtr zaporowy . . . . .	437
17.6. Filtry aktywne . . . . .	441
18. Synteza dwójników pasywnych . . . . .	444
18.1. Przedmiot syntezy obwodów . . . . .	444
18.2. Własności funkcji opisującej dwójnik . . . . .	445
18.2.1. Własności immitancji operatorowej dwójnika pasywnego . . . . .	445
18.2.2. Funkcje energetyczne . . . . .	447
18.3. Sprawdzanie warunków realizowalności immitancji . . . . .	451
18.4. Metoda Fostera realizacji dwójnika . . . . .	452
18.5. Metoda Cauera realizacji dwójnika . . . . .	461
19. Teoria linii długich . . . . .	464
19.1. Pojęcie linii długiej . . . . .	464
19.2. Parametry linii długiej . . . . .	465
19.2.1. Rezystancja jednostkowa $R_0$ . . . . .	466
19.2.2. Indukcyjność jednostkowa $L_0$ . . . . .	466
19.2.3. Pojemność jednostkowa $C_0$ . . . . .	467
19.2.4. Uptywność jednostkowa $G_0$ . . . . .	468
19.3. Równania linii długiej jednorodnej . . . . .	468
19.4. Stan ustalony w linii długiej jednorodnej przy wymuszeniu sinusoidalnym . . . . .	472
19.5. Wartości chwilowe napięcia i prądu w linii długiej . . . . .	479
19.6. Prędkość fazowa i długość fali . . . . .	481

19.7. Parametry falowe linii długiej i ich zależność od częstotliwości . . . . .	482
19.8. Impedancja wejściowa linii długiej . . . . .	486
19.9. Praca linii długiej przy dopasowaniu falowym . . . . .	487
19.10. Linia bez strat . . . . .	490
19.11. Linia nieznkształcająca . . . . .	495
19.12. Zastępowanie linii długiej czwórnikami . . . . .	497
19.13. Stany nieustalone w liniach długich . . . . .	498
19.13.1. Stan nieustalony w linii długiej bez strat w stanie jałowym . . . . .	500
19.13.2. Stan nieustalony w linii długiej bez strat w stanie zwarcia . . . . .	503
19.13.3. Stan nieustalony w linii długiej przy obciążeniu impedancją falową . . . . .	504
19.13.4. Graf przepływowy linii długiej . . . . .	504
20. Obwody nieliniowe prądu stałego . . . . .	507
20.1. Elementy nieliniowe i ich charakterystyki . . . . .	507
20.2. Obliczanie obwodów nieliniowych prądu stałego metodami graficznymi . . . . .	509
20.2.1. Połączenie szeregowe elementów nieliniowych . . . . .	509
20.2.2. Połączenie równoległe elementów nieliniowych . . . . .	510
20.3. Obliczanie obwodów nieliniowych na podstawie twierdzenia Thevenina . . . . .	511
21. Obwody magnetyczne . . . . .	512
21.1. Definicje podstawowe . . . . .	512
21.2. Podstawowe pojęcia magnetyzmu i prawa obwodów magnetycznych . . . . .	514
21.3. Rozwiązywanie obwodu magnetycznego nierozgałęzionego ze szczeliną powietrzną . . . . .	519
21.4. Rozwiązywanie obwodu magnetycznego rozgałęzionego . . . . .	524
21.5. Obwód magnetyczny magnesu trwałego . . . . .	526
22. Obwody nieliniowe prądu zmiennego . . . . .	531
22.1. Opis elementów w obwodach nieliniowych prądu zmiennego . . . . .	531
22.2. Aproksymacja charakterystyk nieliniowych . . . . .	533

22.3. Obwody nieliniowe z elementami ferromagnetycznymi . . . . .	535
22.3.1. Cewka z rdzeniem ferromagnetycznym . . . . .	535
22.3.2. Zjawisko ferorezonansu . . . . .	537
22.3.3. Stabilizator ferorezonansowy . . . . .	542
22.3.4. Potrójacze częstotliwości . . . . .	544
22.3.5. Układy ferromagnetyczne sterowane . . . . .	546
22.4. Obwody nieliniowe z elementami elektronicznymi . . . . .	550
22.4.1. Charakterystyki elementów prostownikowych . . . . .	550
22.4.2. Charakterystyki diod o specjalnym przeznaczeniu . . . . .	552
22.4.3. Obwody z prostownikami . . . . .	553
22.5. Drgania w układach nieliniowych . . . . .	558
22.5.1. Metoda bilansu harmonicznyc . . . . .	562
22.5.2. Metoda funkcji opisującej . . . . .	564
22.6. Metoda płaszczyzny fazowej . . . . .	566
22.6.1. Pojęcia podstawowe . . . . .	566
22.6.2. Rodzaje punktów osobliwych . . . . .	567
22.6.3. Metoda izoklin . . . . .	573
Literatura . . . . .	575
Skorowidz . . . . .	576