

SPIS TREŚCI

Przedmowa 5

Rozdział 1. SYGNAŁY ELEKTRYCZNE 15

1. Rodzaje sygnałów elektrycznych 15
2. Przykłady sygnałów 18
3. Sygnały ortogonalne 23
4. Aproksymacje sygnałów 23
5. Rozwinięcie funkcji w szereg Fouriera w przedziale skończonym 27
 - 5.1. Wykładniczy szereg Fouriera 27
 - 5.2. Trygonometryczny szereg Fouriera 29
6. Rozwinięcie funkcji okresowej w szereg Fouriera w przedziale nieograniczonym $-\infty < t < \infty$ 36
7. Przekształcenie Fouriera 42
8. Dwustronne przekształcenie Laplace'a 43
9. Jednostronne przekształcenie Laplace'a 45
10. Wartość średnia sygnałów okresowych 46
11. Wartość skuteczna sygnałów okresowych 47
12. Oznaczenia najczęściej spotykanych sygnałów 49
13. Moc sygnału elektrycznego 52
 - 13.1. Sygnał stały 52
 - 13.2. Sygnał sinusoidalny 52
 - 13.3. Sygnał wykładniczy 54
 - 13.4. Sygnał okresowy rzeczywisty wyrażony w postaci szeregu Fouriera 55
14. Widmo gęstości energii 57
15. Transmitancja obwodu 59
 - 15.1. Własności transmitancji obwodu 59
 - 15.2. Zależności między poszczególnymi częściami transmitancji 61

Literatura 68

Rozdział 2. ELEMENTY OBWODU ELEKTRYCZNEGO 70

16. Idealne elementy i modele obwodów elektrycznych 70
 - 16.1. Układ fizyczny i jego model 70
 - 16.2. Elementy o parametrach rozłożonych i skupionych 73
 - 16.3. Elementy dyskretne dwukońcówkowe 76
 - 16.4. Elementy zdegenerowane dwukońcówkowe 93
 - 16.5. Zorientowanie prądu i napięcia w dwukońcówkowym elemencie dyskretnym 95
17. Elementy wielokońcówkowe 97
 - 17.1. Wielokońcówkowe dyskretne elementy obwodu 97
 - 17.2. Elementy trójkońcówkowe 99
 - 17.3. Elementy czterońcówkowe 101
 - 17.4. Sterowane źródła czterońcówkowe 109
 - 17.5. Wzmacniacz operacyjny 112
 - 17.6. Ujemne konwertery 114
 - 17.7. Elementy n -końcówkowe 116

18. Elementy realizujące podstawowe działania matematyczne	117
19. Własności elementów i obwodów	122
19.1. Wstęp	122
19.2. Liniowość i nieliniowość obwodów	125
20. Stacjonarność i niestacjonarność elementów obwodów	130
21. Pasywność i aktywność obwodów	135
22. Przyczynowość i niewyprzedzalność obwodów	139
23. Stabilność i niestabilność obwodów	142
24. Wzajemność i niewzajemność obwodów	144
25. Połączenia elementów obwodu elektrycznego	146
25.1. Połączenia szeregowo i równoległe	146
25.2. Połączenia szeregowo-równoległe i równoległe-szeregowo	155

Literatura 157

Rozdział 3. METODY ROZWIĄZYWANIA OBWODÓW 158

26. Elementy topologii obwodów	158
27. Macierze strukturalne	162
28. Prawa Kirchhoffa	167
28.1. Równania równowagi	168
28.2. Równania gałęziowe	169
29. Metody rozwiązywania obwodów elektrycznych	176
29.1. Metoda prądów i napięć gałęziowych	176
29.2. Metoda prądów oczkowych	180
29.3. Metoda potencjałów węzłowych	186
29.4. Metoda zmiennych stanu	190
30. Niektóre własności obwodów elektrycznych	202
30.1. Zasada superpozycji	202
30.2. Twierdzenie o zastępczym źródle napięcia (twierdzenie Thévenina)	203
30.3. Twierdzenie o zastępczym źródle prądu (twierdzenie Nortona)	204
30.4. Twierdzenie o kompensacji	205
30.5. Twierdzenie o zmianie prądów w obwodzie elektrycznym przy zmianie parametrów jednej gałęzi	206
30.6. Twierdzenie o wzajemności	207
30.7. Twierdzenie o włączaniu dodatkowych źródeł	207
30.8. Przekształcanie trójkąta impedancji w gwiazdę	208
30.9. Obwody symetryczne	209
30.10. Eliminacja indukcyjności wzajemnej z układu gwiazdowego	211

Literatura 212

Rozdział 4. SKŁADOWA USTALONA ODPOWIEDZI W OBWODZIE LINIOWYM RLCM 214

31. Odpowiedź ustalona w obwodzie liniowym	214
31.1. Odpowiedź ustalona jako rozwiązanie szczególne równania stanu obwodu	214
31.2. Odpowiedź ustalona przy wymuszeniu wykładniczym zespolonym	218
32. Analiza obwodów rezystancyjnych przy wymuszeniu stałym	220
32.1. Metoda napięć i prądów gałęziowych	220
32.2. Metoda oczkowa	230
32.3. Metoda węzłowa	236
33. Analiza obwodów liniowych w stanie ustalonym przy wymuszeniu harmonicznym	243
33.1. Analiza dwójników	243

- 33.2. Moc dwójnika liniowego w stanie ustalonym przy wymuszeniu harmonicznym 250
- 33.3. Analiza obwodów *RLCM* ze źródłami niesterowanymi 256
- 33.4. Analiza obwodów *RLCM* ze źródłami sterowanymi 261
- 34. Zastosowanie twierdzenia Thévenina i twierdzenia Nortona do obliczania ustalonej odpowiedzi harmonicznej 268
- 35. Obliczanie odpowiedzi ustalonej obwodu w oparciu o transmitancję 273
 - 35.1. Transmitancja i jej znaczenie dla sygnałów wykładniczych 273
 - 35.2. Odpowiedź ustalona obwodu na wymuszenie stałe w czasie 278
 - 35.3. Odpowiedź ustalona obwodu na wymuszenie harmoniczne 280
- 36. Analiza częstotliwościowa obwodów *RLCM* 283
 - 36.1. Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji zespolonej 283
 - 36.2. Charakterystyki częstotliwościowe Nyquista 287
 - 36.3. Rezonans w obwodzie elektrycznym 288
- 37. Odpowiedź ustalona na okresowe wymuszenie niesinusoidalne w obwodzie liniowym *RLCM* 300
 - 37.1. Zastosowanie transmitancji zespolonej 300
 - 37.2. Moc dwójnika dla ustalonych sygnałów okresowych nieharmonicznych 304
- 38. Odpowiedź ustalonej macierzową metodą zmiennych stanu 307

Literatura 310

Rozdział 5. ODPOWIEDŹ SWOBODNA, PRZEJŚCIOWA I NIEUSTALONA OBWODU LINIOWEGO 311

- 39. Odpowiedź swobodna, przejściowa wymuszona oraz przejściowa całkowita 311
 - 39.1. Odpowiedź swobodna 311
 - 39.2. Odpowiedź przejściowa 315
- 40. Metody obliczania odpowiedzi przejściowej 315
 - 40.1. Obliczanie odpowiedzi przejściowej w dziedzinie rzeczywistej 315
 - 40.2. Obliczanie odpowiedzi przejściowej w dziedzinie zespolonej 318
 - 40.3. Częstotliwości własne obwodu 322
 - 40.4. Metody macierzowe obliczania odpowiedzi przejściowej 328
- 41. Odpowiedź wypadkowa w stanie nieustalonym 340
 - 41.1. Wyznaczanie odpowiedzi metodą przewidywania 340
 - 41.2. Odpowiedź nieustalona na wymuszenie w postaci impulsu jednostkowego 343
 - 41.3. Odpowiedź obwodu na funkcję jednostkową 345
- 42. Metoda macierzowa wyznaczania odpowiedzi nieustalonej 346
 - 42.1. Metoda macierzowa dokładna 346
 - 42.2. Metoda macierzowa wyznaczania odpowiedzi nieustalonej w skończonym przedziale czasu 349
- 43. Wyznaczanie odpowiedzi nieustalonej obwodu za pomocą całki spłotowej 350
 - 43.1. Całka spłotowa i jej własności 350
 - 43.2. Zastosowanie całki spłotowej do wyznaczania odpowiedzi nieustalonej 353
- 44. Metody transformacyjne obliczania odpowiedzi nieustalonej 355
 - 44.1. Zastosowanie przekształcenia Laplace'a do wyznaczania odpowiedzi nieustalonej 355
 - 44.2. Zastosowanie macierzowej postaci przekształcenia Laplace'a do wyznaczania odpowiedzi nieustalonej 358
 - 44.3. Zastosowanie przekształcenia Fouriera do obliczenia odpowiedzi nieustalonej 360
- 45. Sterowalność i obserwowalność 362

Literatura 365

Rozdział 6. GRAFICZNE PRZEDSTAWIENIE RÓWNAŃ OBWODÓW ELEKTRYCZ- NYCH 367

- 46. Schematy blokowe 367
 - 46.1. Schematy blokowe funkcyjne 367
 - 46.2. Schematy blokowe operatorowe 372
- 47. Grafy przepływu sygnałów 378

Literatura 385

Rozdział 7. OBWODY TRÓJFAZOWE 386

- 48. Pojęcia podstawowe 386
- 49. Przekształcenia liniowe stosowane w analizie obwodów trójfazowych 390
 - 49.1. Składowe symetryczne 390
 - 49.2. Składowe $\alpha, \beta, 0$ 393
 - 49.3. Składowe $q, d, 0$ 397
- 50. Obwody trójfazowe w stanie ustalonym 403
 - 50.1. Obwód trójfazowy połączony w gwiazdę 403
 - 50.2. Obwód trójfazowy połączony w trójkąt 405
- 51. Moc w układach trójfazowych 407
- 52. Metoda składowych symetrycznych w zastosowaniu do stanów ustalonych 410
 - 52.1. Zwarcia w obwodach trójfazowych 414
 - 52.2. Filtry składowej symetrycznej zgodnej i przeciwnej 418
 - 52.3. Moc obwodu trójfazowego wyrażona za pomocą składowych symetrycznych 419
- 53. Obwody trójfazowe symetryczne przy wymuszeniu okresowym niesinusoidalnym 420
- 54. Obliczanie stanów nieustalonych w obwodach trójfazowych 422
 - 54.1. Wyznaczanie odpowiedzi nieustalonej w obwodzie trójfazowym jako rozwiązania równań różniczkowych niejednorodnych 422
 - 54.2. Zastosowanie przekształcenia Laplace'a do obliczania odpowiedzi nieustalonej w obwodzie trójfazowym 428
- 55. Obwód trójfazowy niestacjonarny (równanie różniczkowe maszyny synchronicznej) 431

Literatura 437

Rozdział 8. UKŁADY n -WROTOWE (n -WROTNIKI) I UKŁADY n -BIEGUNOWE (n -BIEGUNNIKI) 438

- 56. Ogólna charakterystyka i podstawowe równania n -wrotnika 438
- 57. Równania impedancyjne, admitancyjne i hybrydowe n -wrotnika 439
 - 57.1. Postać impedancyjna równań n -wrotnika 439
 - 57.2. Postać admitancyjna równań n -wrotnika 446
 - 57.3. Postać hybrydowa równań n -wrotnika 450
 - 57.4. Połączenia n -wrotników 452
- 58. Czwórniki 454
 - 58.1. Podstawowe własności i równania czwórnika 454
 - 58.2. Równania oraz parametry impedancyjne i admitancyjne czwórnika 454
 - 58.3. Równania i parametry łańcuchowe czwórnika 459
 - 58.4. Równania i parametry hybrydowe czwórnika 462
 - 58.5. Własności czwórnika: odwracalność i symetria 467
 - 58.6. Schematy i układy zastępcze czwórników 469
 - 58.7. Połączenia czwórników 469
- 59. Parametry falowe czwórników 480

- 59.1. Transmitancje charakterystyczne czwórnika w układzie źródło-odbiornik 480
- 59.2. Impedancja falowa i stała przenoszenia czwórnika 483
- 59.3. Zależność parametrów łańcuchowych czwórnika od parametrów falowych 486
- 60. Filtry falowe *LC* i ich charakterystyki częstotliwościowe 487
 - 60.1. Przepustowe i tłumieniowe pasma filtrów falowych 487
 - 60.2. Transformacja częstotliwościowa i impedancyjna charakterystyk filtru 489
 - 60.3. Filtry dolnoprzepustowe Zobela 491
 - 60.4. Filtry górnoprzepustowe Zobela 494
 - 60.5. Filtry pasmowoprzepustowe 496
 - 60.6. Aproksymacje Butterwotha i Czebyszewa charakterystyk częstotliwościowych filtrów 500
 - 60.7. Filtry cyfrowe 502
- 61. Układy *n*-biegunowe (*n*-biegunniki) 505
 - 61.1. Własności i parametry *n*-biegunnika 505
 - 61.2. Równoważność *n*-biegunników i przekształcanie *n*-biegunnika w (*n* - 1)-wrotnik 508

Literatura 511

Rozdział 9. PARAMETRY ROZPROSZENIOWE 512

- 62. Parametry rozproszeniowe dwójnika, czwórnika i *n*-wrotnika 512
 - 62.1. Dopasowanie źródła do odbiornika 512
 - 62.2. Normalizacja wielkości na wejściu dwójnika 515
 - 62.3. Parametry rozproszeniowe czwórnika 517

Literatura 523

Rozdział 10. AKTYWNE UKŁADY LINIOWE 524

- 63. Podstawowe własności aktywnych układów liniowych 524
 - 63.1. Energetyczne funkcje obwodów z opornikami aktywnymi i źyratorami 524
 - 63.2. Własności funkcji obwodu liniowego *RC* z aktywnymi opornikami 526
 - 63.3. Własności funkcji opisujących obwody liniowe *RC* z źyratorami i opornikami aktywnymi 528
 - 63.4. Podstawy stabilności obwodów aktywnych liniowych 528
- 64. Modele elementów aktywnych dla małych wartości sygnałów 530
 - 64.1. Modele liniowe i nieliniowe elementów aktywnych 530
 - 64.2. Modele elementów aktywnych dla określonych zakresów częstotliwości przenoszonych sygnałów 532
 - 64.3. Modele fizyczne wybranych elementów aktywnych 534
 - 64.4. Modele zaciskowe („czarnego pudełka”) wybranych elementów aktywnych 537
 - 64.5. Przedstawienie czwórników za pomocą źródeł sterowanych 539
- 65. Modele wzmacniacza operacyjnego 544
 - 65.1. Model idealnego wzmacniacza operacyjnego 544
 - 65.2. Model nieidealnego wzmacniacza operacyjnego 545
 - 65.3. Analiza układów zawierających wzmacniacze operacyjne idealne 559
 - 65.4. Aktywne filtry częstotliwościowe 557

Literatura 559

Rozdział 11. SYNTEZA UKŁADÓW PASYWNYCH 561

- 66. Dwójniki liniowe, skupione, stacjonarne 561
 - 66.1. Własności dwójników liniowych, skupionych, stacjonarnych 561
 - 66.2. Pasywność i aktywność dwójnika 562

- 66.3. Testy pasywności dwójnika 564
- 66.4. Dwójniki reaktancyjne 565
- 66.5. Struktury kanoniczne dwójników reaktancyjnych 567
- 66.6. Dwójniki RC i RL 574
- 66.7. Struktury kanoniczne dwójników RC i RL 576
- 66.8. Dwójniki RLC 585
- 67. Synteza liniowych czwórników pasywnych 594
 - 67.1. Synteza pasywnych czwórników bezstratnych 594
 - 67.2. Synteza czwórnika bezstratnego na podstawie parametrów impedancyjnych 596
 - 67.3. Synteza czwórnika bezstratnego na podstawie parametrów admitancyjnych 599
- 68. Synteza czwórnika bezstratnego obciążonego rezystancją 603
- 69. Synteza czwórnika na podstawie impedancji wejściowej. Metoda Darlingtona 607

Literatura 611

Rozdział 12. SYNTEZA UKŁADÓW AKTYWNYCH 612

- 70. Warunki syntezy układów aktywnych 612
- 71. Synteza transmitancji z wykorzystaniem elementu o ujemnej rezystancji — R 614
- 72. Synteza immitancji z wykorzystaniem źródeł sterowanych 618
- 73. Synteza transmitancji 621
 - 73.1. Synteza transmitancji z wykorzystaniem źródeł sterowanych 621
 - 73.2. Synteza transmitancji z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych 624
- 74. Badanie wrażliwości w procesie realizacji układów 635
 - 74.1. Określenie wrażliwości transmitancji układu 635
 - 74.2. Synteza filtru aktywnego z minimalizacją wrażliwością na zmiany wzmocnienia elementu aktywnego 637
- 75. Synteza n -wrotników aktywnych metodą zmiennych stanu 639
 - 75.1. Warunki minimalnej realizacji n -wrotnika metodą zmiennych stanu 639
 - 75.2. Realizacja dowolnej macierzy admitancyjnej Y n -wrotnika RC - $ZNSN$ z użyciem minimalnej liczby kondensatorów 641

Literatura 646

Rozdział 13. LINIE DŁUGIE 648

- 76. Równania linii długiej jednofazowej 648
- 77. Równania linii długiej trójfazowej 650
- 78. Stan ustalony w linii długiej przy wymuszeniu sinusoidalnym 652
 - 78.1. Równanie linii w stanie ustalonym 652
 - 78.2. Impedancja wejściowa linii długiej 655
 - 78.3. Prędkość fazowa i długość fali 656
 - 78.4. Charakterystyki częstotliwościowe impedancji falowej i stałej propagacji 658
 - 78.5. Linie nieznieszkodzające 659
 - 78.6. Linia o małych stratach 660
 - 78.7. Linia bezstratna 661
- 79. Stany nieustalone w liniach długich 665
 - 79.1. Równania transformant 665
 - 79.2. Przykłady stanów nieustalonych w linii bezstratnej 668
 - 79.3. Równania różnicowe linii o małych stratach 677
 - 79.4. Równanie różniczkowe z odchylnym argumentem linii długiej o małych stratach 680
 - 79.5. Schemat blokowy dla linii opisanej równaniem różniczkowym z odchylnym argumentem 683

Literatura 685

**Rozdział 14. RÓWNANIA LAGRANGE'A W UKŁADACH
ELEKTROMECHANICZNYCH 686**

80. Równania Lagrange'a drugiego rodzaju w mechanice **686**
81. Uogólnione siły elektromagnetyczne w układach liniowych **687**
82. Równania Lagrange'a dla obwodów elektrycznych **689**

Literatura 694

DODATKI 695

- Dodatek 1. Własności przekształcenia Fouriera **695**
Dodatek 2. Własności przekształcenia Laplace'a **695**
Dodatek 3. Rachunek macierzowy **700**
 D.3.1. Wartości własne i wektory własne **700**
 D.3.2. Diagonalizacja macierzy **702**
 D.3.3. Twierdzenie Sylwestera **704**
 D.3.4. Twierdzenie Cayleya-Hamiltona **704**
 D.3.5. Niektóre macierze szczególne **706**
Dodatek 4. Operator różniczkowy **707**

Literatura 708