

Spis treści

Przedmowa
O Autorach

ROZDZIAŁ 1 Wprowadzenie do systemów sterowania 1

- 1.1. Wstęp 2
 - 1.2. Krótka historia sterowania automatycznego 6
 - 1.3. Przykłady systemów sterowania 12
 - 1.4. Projektowanie inżynierskie 18
 - 1.5. Projektowanie systemów sterowania 20
 - 1.6. Systemy mechatroniczne 23
 - 1.7. Zielona inżynieria 27
 - 1.8. Przyszła ewolucja systemów sterowania 29
 - 1.9. Przykłady projektowania 30
 - 1.10. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 35
 - 1.11. Podsumowanie 37
- Sprawdzenie umiejętności 37 • Ćwiczenia 40 • Zadania 42 • Zadania zaawansowane 47 •
Zadania projektowe 49 • Pojęcia i określenia 52

ROZDZIAŁ 2 Modele matematyczne systemów 53

- 2.1. Wstęp 54
 - 2.2. Równania różniczkowe systemów fizycznych 54
 - 2.3. Przybliżenia liniowe systemów fizycznych 59
 - 2.4. Przekształcenie Laplace'a 62
 - 2.5. Transmitancja systemu liniowego 69
 - 2.6. Modele w postaci schematów blokowych 82
 - 2.7. Modele w postaci grafów przepływu sygnałów 87
 - 2.8. Przykłady projektowania 94
 - 2.9. Symulacja systemów przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 112
 - 2.10. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 125
 - 2.11. Podsumowanie 128
- Sprawdzenie umiejętności 128 • Ćwiczenia 133 • Zadania 139 • Zadania zaawansowane 150 •
Zadania projektowe 152 • Zadania komputerowe 154 • Pojęcia i określenia 157

ROZDZIAŁ 3 Modele w przestrzeni stanów 159

- 3.1. Wstęp 160
 - 3.2. Zmienne stanu systemu dynamicznego 160
 - 3.3. Różniczkowe równanie stanu 163
 - 3.4. Modele w postaci grafów przepływu sygnałów i schematów blokowych 168
 - 3.5. Alternatywne modele w postaci grafów przepływu sygnałów i schematów blokowych 179
 - 3.6. Transmitancja z równania stanu 183
 - 3.7. Odpowiedź czasowa i macierz tranzycji stanu 184
 - 3.8. Przykłady projektowania 188
 - 3.9. Analiza modeli w przestrzeni stanów przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 201
 - 3.10. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 205
 - 3.11. Podsumowanie 208
- Sprawdzenie umiejętności 209 • Ćwiczenia 213 • Zadania 215 • Zadania zaawansowane 223 •
Zadania projektowe 225 • Zadania komputerowe 226 • Pojęcia i określenia 228

ROZDZIAŁ 4 Własności systemów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym 229

- 4.1. Wstęp 230
 - 4.2. Analiza sygnału błędu 232
 - 4.3. Wrażliwość systemów sterowania na zmiany parametrów 234
 - 4.4. Sygnały zakłócające w systemach ze sprzężeniem zwrotnym 237
 - 4.5. Kształtowanie odpowiedzi przejściowej 242
 - 4.6. Błąd ustalony 245
 - 4.7. Koszt sprzężenia zwrotnego 247
 - 4.8. Przykłady projektowania 247
 - 4.9. Określanie własności systemów sterowania przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 258
 - 4.10. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 265
 - 4.11. Podsumowanie 268
- Sprawdzenie umiejętności 268 • Ćwiczenia 273 • Zadania 276 • Zadania zaawansowane 283 • Zadania projektowe 286 • Zadania komputerowe 290 • Pojęcia i określenia 292

ROZDZIAŁ 5 Jakość działania systemów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym 293

- 5.1. Wstęp 294
 - 5.2. Testowe sygnały wejściowe 295
 - 5.3. Jakość działania systemów drugiego rzędu 297
 - 5.4. Wpływ trzeciego bieguna i miejsca zerowego na odpowiedź systemu drugiego rzędu 302
 - 5.5. Położenie pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej s i odpowiedź przejściowa 308
 - 5.6. Błąd ustalony w systemach sterowania ze sprzężeniem zwrotnym 310
 - 5.7. Wskaźniki jakości 316
 - 5.8. Upraszczanie systemów liniowych 322
 - 5.9. Przykłady projektowania 324
 - 5.10. Badanie jakości działania systemów przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 337
 - 5.11. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 342
 - 5.12. Podsumowanie 345
- Sprawdzenie umiejętności 345 • Ćwiczenia 349 • Zadania 352 • Zadania zaawansowane 358 • Zadania projektowe 360 • Zadania komputerowe 363 • Pojęcia i określenia 366

ROZDZIAŁ 6 Stabilność systemów liniowych ze sprzężeniem zwrotnym 367

- 6.1. Pojęcie stabilności 368
 - 6.2. Kryterium stabilności Routha-Hurwitza 373
 - 6.3. Stabilność względna systemów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym 380
 - 6.4. Stabilność systemów opisanych równaniem stanu 382
 - 6.5. Przykłady projektowania 385
 - 6.6. Analiza stabilności systemów przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 392
 - 6.7. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 399
 - 6.8. Podsumowanie 402
- Sprawdzenie umiejętności 402 • Ćwiczenia 405 • Zadania 408 • Zadania zaawansowane 412 • Zadania projektowe 416 • Zadania komputerowe 418 • Pojęcia i określenia 420

ROZDZIAŁ 7 Metoda linii pierwiastkowych 421

- 7.1. Wstęp 422
- 7.2. Pojęcie linii pierwiastkowych 422

- 7.3. Procedura linii pierwiastkowych 427
- 7.4. Projektowanie parametryczne metodą linii pierwiastkowych 441
- 7.5. Wrażliwość a linie pierwiastkowe 447
- 7.6. Regulatory PID 452
- 7.7. Linie pierwiastkowe dla wzmocnienia ujemnego 464
- 7.8. Przykłady projektowania 468
- 7.9. Wyznaczanie linii pierwiastkowych za pomocą oprogramowania do projektowania sterowania 478
- 7.10. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 483
- 7.11. Podsumowanie 485
- Sprawdzenie umiejętności 489 • Ćwiczenia 493 • Zadania 497 • Zadania zaawansowane 507 • Zadania projektowe 510 • Zadania komputerowe 517 • Pojęcia i określenia 519

ROZDZIAŁ 8 Metody oparte na odpowiedziach częstotliwościowych 521

- 8.1. Wstęp 522
- 8.2. Wykresy odpowiedzi częstotliwościowych 525
- 8.3. Pomiarowe wyznaczanie odpowiedzi częstotliwościowych 545
- 8.4. Specyfikacje jakości działania w dziedzinie częstotliwości 547
- 8.5. Wykresy wzmocnienia logarytmicznego w zależności od fazy 550
- 8.6. Przykłady projektowania 551
- 8.7. Metody odpowiedzi częstotliwościowych wspomagane oprogramowaniem do projektowania sterowania 560
- 8.8. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 566
- 8.9. Podsumowanie 571
- Sprawdzenie umiejętności 571 • Ćwiczenia 576 • Zadania 579 • Zadania zaawansowane 588 • Zadania projektowe 590 • Zadania komputerowe 593 • Pojęcia i określenia 596

ROZDZIAŁ 9 Analiza stabilności w dziedzinie częstotliwości 597

- 9.1. Wstęp 598
- 9.2. Odwzorowywanie konturów na płaszczyźnie zmiennej s 599
- 9.3. Kryterium stabilności Nyquista 605
- 9.4. Stabilność względna i kryterium Nyquista 616
- 9.5. Czasowe wskaźniki jakości w dziedzinie częstotliwościowej 622
- 9.6. Pasma przenoszenia systemu 629
- 9.7. Stabilność systemów sterowania z opóźnieniami 630
- 9.8. Przykłady projektowania 633
- 9.9. Regulatory PID w dziedzinie częstotliwościowej 650
- 9.10. Analiza stabilności w dziedzinie częstotliwościowej przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 651
- 9.11. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 662
- 9.12. Podsumowanie 663
- Sprawdzenie umiejętności 672 • Ćwiczenia 675 • Zadania 681 • Zadania zaawansowane 691 • Zadania projektowe 694 • Zadania komputerowe 699 • Pojęcia i określenia 701

ROZDZIAŁ 10 Projektowanie systemów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym 703

- 10.1. Wstęp 704
- 10.2. Podejścia do projektowania systemów 705
- 10.3. Kompensatory kaskadowe 706
- 10.4. Projektowanie z przyspieszeniem fazy na podstawie wykresu Bodego 710
- 10.5. Projektowanie z przyspieszeniem fazy na podstawie linii pierwiastkowych 716

10.6. Projektowanie systemów z użyciem kompensatorów całkujących 722
10.7. Projektowanie z opóźnieniem fazy na podstawie linii pierwiastkowych 725
10.8. Projektowanie z opóźnieniem fazy na podstawie wykresu Bodego 728
10.9. Projektowanie na podstawie wykresu Bodego przy pomocy metody analitycznej 733
10.10. Systemy z filtrem wstępnym 734
10.11. Projektowanie odpowiedzi typu deadbeat 737
10.12. Przykłady projektowania 739
10.13. Projektowanie systemów przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 749
10.14. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 756
10.15. Podsumowanie 757
Sprawdzenie umiejętności 759 • Ćwiczenia 763 • Zadania 767 • Zadania zaawansowane 776 • Zadania projektowe 779 • Zadania komputerowe 783 • Pojęcia i określenia 785

ROZDZIAŁ 11 Projektowanie systemów ze sprzężeniem zwrotnym od stanu 787

11.1. Wstęp 788
11.2. Sterowalność i obserwowalność 789
11.3. Projektowanie sterowania ze sprzężeniem zwrotnym od pełnego stanu 794
11.4. Projektowanie obserwatora 800
11.5. Sprzężenie zwrotne od pełnego stanu zintegrowane z obserwatorem 804
11.6. Wejścia odniesienia 810
11.7. Optymalne systemy sterowania 812
11.8. Projektowanie systemów z modelem wewnętrznym 820
11.9. Przykłady projektowania 823
11.10. Projektowanie w przestrzeni stanów przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 830
11.11. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 836
11.12. Podsumowanie 837
Sprawdzenie umiejętności 837 • Ćwiczenia 842 • Zadania 844 • Zadania zaawansowane 848 • Zadania projektowe 851 • Zadania komputerowe 854 • Pojęcia i określenia 857

ROZDZIAŁ 12 Odporne systemy sterowania 859

12.1. Wstęp 860
12.2. Odporne systemy sterowania i wrażliwość systemów 861
12.3. Analiza odporności 865
12.4. Systemy o niepewnych parametrach 867
12.5. Projektowanie odpornych systemów sterowania 869
12.6. Projektowanie systemów odpornych z regulatorami PID 873
12.7. Odporny system sterowania z modelem wewnętrznym 878
12.8. Przykłady projektowania 880
12.9. Pseudo-ilościowy system sprzężenia zwrotnego 891
12.10. Synteza odpornego systemu sterowania przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania 893
12.11. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego 896
12.12. Podsumowanie 898
Sprawdzenie umiejętności 900 • Ćwiczenia 904 • Zadania 906 • Zadania zaawansowane 910 • Zadania projektowe 913 • Zadania komputerowe 918 • Pojęcia i określenia 921

ROZDZIAŁ 13 Dyskretne systemy sterowania 923

13.1. Wstęp 924

13.2. Zastosowania systemów sterowania komputerowego	924
13.3. Systemy z danymi próbkowanymi	926
13.4. Przekształcenie Z	929
13.5. Systemy próbkowane ze sprzężeniem zwrotnym	934
13.6. Jakość działania systemu próbkowanego drugiego rzędu	938
13.7. Systemy zamknięte z dyskretną kompensacją komputerową	940
13.8. Linie pierwiastkowe dyskretnych systemów sterowania	943
13.9. Implementacja regulatorów dyskretnych	947
13.10. Przykłady projektowania	948
13.11. Analiza i projektowanie dyskretnych systemów sterowania przy pomocy oprogramowania do projektowania sterowania	956
13.12. Przykład projektowania sekwencyjnego: system odczytujący dysku twardego	961
13.13. Podsumowanie	963
Sprawdzenie umiejętności • Ćwiczenia • Zadania • Zadania zaawansowane • Zadania projektowe • Zadania komputerowe • Pojęcia i określenia	963 • 967 • 969 • 971 • 972 • 974 • 975

Bibliografia 977

Skorowidz