

Spis treści

Przedmowa xv

O Autorach xxvii

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 dysk 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 dysk 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 dysk 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. Odzworowywanie 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 dysk 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. Pseudoilościowy 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 963 • Ćwiczenia 967 • Zadania 969 • Zadania
zaawansowane 971 • Zadania projektowe 972 • Zadania komputerowe 974 •
Pojęcia i określenia 975

Bibliografia **977**

Skorowidz **993**