
Spis treści

Wstęp	9
CZĘŚĆ I. Liniowe modele układów dynamicznych	13
1. Liniowe modele układów dynamicznych - wprowadzenie	15
1.1. Systemy i sygnały	15
1.2. Modelowanie systemów	17
1.3. Linearyzacja - metody i przykłady	18
2. Modele układów dynamicznych z czasem ciągłym - równania stanu	24
2.1. Definicja zmiennych stanu	24
2.2. Liniowy układ dynamiczny	25
2.3. Rozwiązanie równania stanu	26
2.4. Rozwinięcie macierzy tranzycyjnej w szereg potęgowy	28
2.5. Postać macierzy tranzycyjnej w przypadku pojedynczych wartości własnych macierzy stanu	30
2.6. Modalna postać trajektorii stanu w przypadku pojedynczych wartości własnych macierzy stanu	32
2.7. Macierz tranzycyjna i trajektoria wektora stanu w przypadku niediagonalizowalnej macierzy stanu	37
2.8. Trajektoria stanu wyznaczana od chwili $t_0 > 0$	40
2.9. Równanie wyjścia	40
2.10. Liniowe przekształcenie zmiennych stanu	41
2.11. Opis złożonych układów liniowych	42
2.12. Stabilne, liniowe układy dynamiczne	47
3. Modele układów dynamicznych z czasem ciągłym - transmitancja	55
3.1. Transmitancja liniowego układu dynamicznego	55
3.2. Transmitancja a liniowe równanie różniczkowe «-tego rzędu	58
3.3. Odpowiedź układu o jednym wejściu i jednym wyjściu	59
3.4. Transmitancja układów złożonych	64
3.5. Wybór zmiennych stanu dla układu o znanej transmitancji	67
3.6. Charakterystyki częstotliwościowe	76
3.7. Zera transmitancji	84

4. Modele układów dynamicznych z czasem dyskretnym - równania stanu	89
4.1. Dyskretyzacja w czasie	90
4.2. Liniowy, dyskretny układ dynamiczny	93
4.3. Rozwiązanie równania stanu	95
4.4. Właściwości macierzy tranzycyjnej układu dyskretnego	98
4.5. Postać macierzy tranzycyjnej układu dyskretnego w przypadku pojedynczych wartości własnych macierzy stanu	99
4.6. Modalna postać trajektorii stanu w przypadku pojedynczych wartości własnych macierzy stanu	101
4.7. Macierz tranzycyjna i trajektoria wektora stanu układu dyskretnego w przypadku niediagonalizowalnej macierzy stanu	105
4.8. Dyskretna trajektoria stanu wyznaczana od chwili $k_0 T > 0$	107
4.9. Równanie wyjścia	108
4.10. Liniowe przekształcenie zmiennych stanu	109
4.11. Opis złożonych układów liniowych	109
4.12. Stabilne, liniowe, dyskretny układy dynamiczne	110
5. Modele liniowych układów dynamicznych z czasem dyskretnym-transmitancja	117
5.1. Transmitancja dyskretna liniowego układu dynamicznego	117
5.2. Transmitancja a liniowe równanie różnicowe n-tego rzędu	120
5.3. Odpowiedź układu o jednym wejściu i jednym wyjściu	122
5.4. Transmitancja dyskretna próbkowanego układu ciągłego	125
5.5. Transmitancja układów złożonych	135
5.6. Wybór zmiennych stanu dla układu o znanej transmitancji	138
5.7. Charakterystyki częstotliwościowe	146
5.8. Zera transmitancji	155
INTERMEDIUM Przykłady analizy układów dynamicznych	161
P1. Analiza właściwości układu drugiego rzędu o rzeczywistych, różnych wartościach własnych	163
P2. Analiza właściwości układu drugiego rzędu o podwójnych, rzeczywistych wartościach własnych	176
P3. Analiza właściwości układu drugiego rzędu o zespolonych wartościach własnych	190
CZĘŚĆ II Projektowanie układów sterowania	197
6. Sterowanie-struktury i wymagania	199
6.1. Struktury układów sterowania	199
6.2. Wymagania stawiane układom sterowania	200
6.3. Metody projektowania	202
7. Projektowanie ciągłych układów regulacji modelowanych za pomocą transmitancji	204
7.1. Transmitancyjne modele układów regulacji	204
7.2. Stabilność układu zamkniętego	209
7.3. Wrażliwość, odporność i tłumienie zakłóceń w układzie zamkniętym	215
7.4. Układy odwracające fazę - ćwiczenia z kryterium Nyquista	230
7.5. Odtwarzanie harmonicznych wymuszeń i tłumienie harmonicznych zakłóceń w stanach ustalonych	234
7.6. Odtwarzanie wielomianowych wymuszeń w stanach ustalonych - układy astatyczne	236
7.7. Związki między charakterystykami częstotliwościowymi a czasowymi	240

7.8.	Ograniczenia i sposoby projektowania	242
7.9.	Proste zasady projektowania skomplikowanych regulatorów	246
7.10.	Składnik forsujący sterowania	250
7.11.	Regulatory PID	255
8.	Projektowanie dyskretnych układów regulacji modelowanych za pomocą skalarnej transmitancji	264
8.1.	Transmitancyjne modele dyskretnych układów regulacji	264
8.2.	Stabilność układu zamkniętego	265
8.3.	Odtwarzanie wielomianowych wymuszeń w stanach ustalonych - dyskretny układ astatyczny	270
8.4.	Odporność stabilności w układzie zamkniętym, tłumienie dyskretnych zakłóceń harmonicznym i odtwarzanie dyskretnych, harmonicznym wymuszeń	275
8.5.	Metody projektowania dyskretnych układów regulacji	276
8.6.	Dyskretny regulator PID	282
9.	Sterowalność i obserwowalność układów ciągłych	286
9.1.	Podstawowe zależności opisujące ciągłe układy dynamiczne w przestrzeni stanów	286
9.2.	Sterowalność układów ciągłych	295
9.3.	Obserwowalność układów ciągłych	305
9.4.	Dekompozycja Kalmana i realizacja minimalna	311
10.	Sterowalność i obserwowalność układów dyskretnych	318
10.1.	Podstawowe zależności opisujące dyskretny układ dynamiczny w przestrzeni stanów	318
10.2.	Sterowalność układów dyskretnych	325
10.3.	Obserwowalność układów dyskretnych	330
10.4.	Dekompozycja Kalmana i realizacja minimalna	335
10.5.	Sterowalność a okres próbkowania	335
11.	Lokowanie biegunów układu zamkniętego	338
11.1.	Statyczne sprzężenie zwrotne od wyjścia obiektu	338
11.2.	Statyczne sprzężenie zwrotne od wektora stanu w układzie jednowyjściowym	342
11.3.	Astyzm w jednowyjściowym układzie ze sprzężeniem zwrotnym od wektora stanu	348
11.4.	Sprzężenie od wektora stanu minimalizujące kwadratowy wskaźnik jakości - układ ciągły	352
11.5.	Sprzężenie od wektora stanu minimalizujące kwadratowy wskaźnik jakości - układ dyskretny	358
11.6.	Lokowanie biegunów układu dyskretnego w zerze - układy dead-beat	359
11.7.	Przykłady projektowania układów sterowania metodą lokowania biegunów	362
12.	Odtwarzanie zmiennych stanu	373
12.1.	Obserwator Luenbergera	373
12.2.	Projektowanie obserwatora w układzie jednowyjściowym	377
12.3.	Obserwator zakłóceń	378
12.4.	Obserwator zredukowany	379
12.5.	Wykorzystanie obserwatora do przesuwania biegunów w układzie o jednym wejściu i jednym wyjściu	381
12.6.	Obserwator + regulator proporcjonalny = kompensator dynamiczny	383
12.7.	Regulacja ze składnikiem forsującym	386
12.8.	Astyzm w układzie z obserwatorem	390
12.9.	Przykłady projektowania układów regulacji z obserwatorem	391

DODATKI	411
DO. Matematyczne podstawy automatyki	413
D0.1. Liczby i wektory	413
D0.2. Elementy analizy matematycznej	421
D0.3. Podstawy rachunku macierzowego	426
D1. Transformata Laplace'a	433
D1.1. Definicja	433
D1.2. Podstawowe właściwości przekształcenia Laplace'a	435
D1.3. Przykłady wykorzystania właściwości transformaty Laplace'a	438
D1.4. Obliczanie transformat odwrotnych	441
D2. Transformata Z	443
D2.1. Definicja transformaty Z	443
D2.2. Właściwości transformaty Z	444
D2.3. Transformata odwrotna	446
D2.4. Liniowe równania różnicowe	447
D3. Typowe elementy liniowych, ciągłych systemów dynamicznych	449
D3.1. Element proporcjonalny	450
D3.2. Element inercyjny pierwszego rzędu	450
D3.3. Idealny element całkujący	453
D3.4. Idealny element różniczkujący	455
D3.5. Element różniczkujący rzeczywisty (różniczkujący z inercją)	456
D3.6. Regulator PD	459
D3.7. Element całkujący z inercją	461
D3.8. Element inercyjny drugiego rzędu	465
D3.9. Element oscylacyjny	468
D3.10. Element opóźniający	472
D3.11. Korektor opóźniający fazę	472
D3.12. Korektor przyspieszający fazę	478
D3.13. Korektor przyspieszająco/opóźniający fazę	485
D3.14. Regulator PI	485
D3.15. Regulator PID	487
D4. Dyskretne odpowiedniki elementarnych układów dynamicznych	490
D4.1. Element inercyjny pierwszego rzędu	492
D4.2. Element całkujący	493
D4.3. Element różniczkujący	494
D4.4. Układ różniczkujący z inercją	495
D4.5. Regulator PD	497
D4.6. Układ całkujący z inercją	497
D4.7. Układ inercyjny drugiego rzędu	499
D4.8. Układ oscylacyjny	500
D4.9. Element opóźniający	502
D4.10. Korektor opóźniający fazę	504
D4.11. Korektor przyspieszający fazę	505
D4.12. Regulator PI	507
Bibliografia, a raczej, co jeszcze przeczytać	509