

Spis treści

Przedmowa	11
1. Klasyfikacja układów regulacji automatycznej	13
1.1. Wstęp	13
1.2. Pojęcia podstawowe	14
1.3. Układy automatyki	17
1.4. Klasyfikacja układów regulacji	21
2. Liniowe układy regulacji	24
2.1. Założenia dotyczące liniowości	24
2.2. Linearyzacja układów nieliniowych	25
2.2.1. Linearyzacja statyczna	25
2.2.2. Linearyzacja równań różniczkowych opisujących układy nieliniowe	26
2.3. Opis matematyczny układów liniowych, transmitancja operatorowa	30
2.4. Wyznaczanie charakterystyk statycznych i dynamicznych układu liniowego	32
2.4.1. Charakterystyka statyczna	32
2.4.2. Charakterystyka impulsowa	33
2.4.3. Charakterystyka skokowa	40
2.4.4. Odpowiedź układu liniowego na dowolne wymuszenie	42
2.4.5. Transmitancja widmowa	43
2.4.6. Charakterystyki częstotliwościowe	48
2.4.7. Związek charakterystyk czasowych z transmitancją widmową	50
2.5. Podstawowe człony liniowych układów regulacji	57
2.5.1. Człon proporcjonalny	58
2.5.2. Człon inercyjny pierwszego rzędu	62
2.5.3. Człon całkujący idealny	71
2.5.4. Człon całkujący z inercją	76
2.5.5. Człon różniczkujący idealny	84
2.5.6. Człon różniczkujący rzeczywisty	89

2.5.7. Człony oscylacyjny	96
2.5.8. Człony inercyjne: drugiego i n-tego rzędu	109
2.5.9. Człon opóźniający	119
2.6. Pytania kontrolne	123
3. Zasady tworzenia i przekształcania schematów blokowych, wyznaczanie transmitancji zastępczej	127
3.1. Rodzaje węzłów występujących w układach blokowych oraz zasady ich przesuwania	128
3.2. Połączenie łańcuchowe	132
3.3. Połączenie równoległe	134
3.4. Połączenie ze sprzężeniem zwrotnym	135
3.5. Pytania kontrolne	140
4. Obiekty regulacji	142
4.1. Rodzaje obiektów regulacji	142
4.2. Wyznaczanie charakterystyk dynamicznych obiektów regulacji	145
4.3. Przykłady statycznych i astatycznych obiektów regulacji... ..	152
4.4. Pytania kontrolne	156
5. Stabilność liniowych układów regulacji	157
5.1. Układ otwarty i zamknięty	157
5.2. Równanie charakterystyczne	159
5.3. Warunki konieczne i wystarczające stabilności	160
5.4. Kryteria stabilności	161
5.4.1. Kryterium Hurwitza	162
5.4.2. Kryterium Nyquista	169
5.4.3. Logarytmiczne kryterium stabilności	179
5.5. Pytania kontrolne	184
6. Jakość procesów regulacji	187
6.1. Dokładność statyczna	187
6.2. Metody zwiększania dokładności statycznej	195
6.3. Kryteria jakości regulacji	202
6.3.1. Ocena dokładności dynamicznej układu w dziedzinie czasu	203

6.3.2. Ocena dokładności dynamicznej układu w dziedzinie częstotliwości	205
6.3.3. Całkowe kryteria jakości	209
6.4. Pytania kontrolne	214
7. Regulatory	216
7.1. Klasyfikacja regulatorów	217
7.2. Własności dynamiczne regulatorów	217
7.3. Zasady budowy regulatorów	237
7.4. Dobór nastaw regulatorów	247
7.4.1. Zasady Zieglera-Nicholsa	248
7.4.2. Metody doboru nastaw optymalnych	250
7.5. Pytania kontrolne	253
8. Korekcja układów regulacji	254
8.1. Rodzaje korekcji	254
8.2. Korekcja szeregową	256
8.3. Korekcja równoległa	269
8.4. Korekcja ze sprzężeniem zwrotnym	274
8.5. Pytania kontrolne	278
9. Opis układów liniowych w przestrzeni stanów	280
9.1. Pojęcia podstawowe	280
9.2. Równanie stanu i wyjścia układu	282
9.3. Związek transmitancji operatorowej układu z jego opisem w przestrzeni stanów	284
9.3.1. Wyznaczanie transmitancji macierzowej	284
9.3.2. Sterowalność i obserwowalność układów liniowych	291
9.3.3. Wybór zmiennych stanu dla układu o znanej transmitancji operatorowej	300
9.3.4. Macierz charakterystyczna układu	323
9.4. Pytania kontrolne	325
10. Symulacja układów dynamicznych	327
10.1. Zasady symulacji analogowej	327
10.1.1. Wzmacniacz operacyjny	329

10.1.2. Modelowanie strukturalne układów dynamicznych na wzmacniaczach operacyjnych	332
10.2. Zasady modelowania układów dynamicznych na maszynie analogowej	339
10.3. Zasady symulacji cyfrowej układów dynamicznych	344
10.3.1. Numeryczne całkowanie równań różniczkowych	344
10.3.2. Metody Eulera i Adamsa	345
10.3.3. Metoda Runge-Kutta	347
10.3.4. Numeryczne rozwiązywanie układów równań różniczkowych	348
10.4. Pytania kontrolne	351
11. Nieliniowe układy regulacji	353
11.1. Nieliniowe człony statyczne i dynamiczne	353
11.2. Układy zastępcze członów nieliniowych	357
12. Przekształcanie schematów blokowych układów nieliniowych	362
12.1. Połączenie łańcuchowe	362
12.2. Połączenie równoległe	365
12.3. Połączenie ze sprzężeniem zwrotnym	367
12.4. Przenoszenie węzłów w schematach blokowych.....	370
12.5. Pytania kontrolne	371
13. Metody analizy układów nieliniowych	373
13.1. Metoda operatorowa kolejnych przybliżeń	373
13.2. Metoda funkcji opisującej	379
13.2.1. Wyznaczanie funkcji opisującej	379
13.2.2. Analiza własności dynamicznych układów nieliniowych przy pomocy funkcji opisującej	386
13.3. Metoda przestrzeni stanów	395
13.3.1. Portret fazowy	395
13.3.2. Wyznaczanie trajektorii fazowych	398
13.3.3. Typy punktów osobliwych	408
13.4. Pytania kontrolne	412

14. Stabilność nieliniowych układów regulacji	414
14.1. Definicja stabilności dla układów nieliniowych	414
14.2. Badanie stabilności układów nieliniowych	417
14.2.1. Pierwsza metoda Lapunowa	418
14.2.2. Druga metoda Lapunowa	420
14.3. Pytania kontrolne	429
15. Liniowe układy impulsowe	430
16. Sygnały dyskretne	433
16.1. Matematyczny opis impulsatora	433
16.2. Twierdzenie Kotelnikowa-Shannona	436
16.3. Rekonstrukcja sygnału ciągłego na podstawie jego danych próbkowanych.....	438
17. Funkcje dyskretne i równania różnicowe	446
17.1. Różnice i sumy funkcji dyskretnych	446
17.2. Liniowe równania różnicowe	449
17.3. Przekształcenie Z i jego własności	451
17.3.1. Przekształcenie Z – definicja	451
17.3.2. Własności przekształcenia Z i podstawowe transformaty	452
17.4. Pytania kontrolne	458
18. Rozwiązywanie liniowych równań różnicowych o stałych współczynnikach	459
18.1. Rozwiązywanie rekurencyjne równań różnicowych	459
18.2. Rozwiązywanie liniowych równań różnicowych przy pomocy przekształcenia Z	461
18.3. Wyznaczanie oryginału transformaty Z	463
18.3.1. Metoda rozwinięcia transformaty Z w szereg potęgowy względem z^{-1}	463
18.3.2. Metoda rozkładu transformaty Z na ułamki proste	466
18.4. Pytania kontrolne	471

19. Transmitancja dyskretna i dyskretnie charakterystyki	
czasowe	472
19.1. Transmitancja dyskretna	472
19.2. Dyskretnie charakterystyki czasowe	475
19.3. Wyznaczanie transmitancji dyskretniej na podstawie danej transmitancji operatorowej części ciągłej układu dyskretnego	478
20. Wyznaczanie zastępczej transmitancji dyskretniej oraz uchybu regulacji	482
20.1. Dyskretna transmitancja zastępcza układu otwartego i zamkniętego	482
20.2. Przebieg uchybu regulacji w impulsowych układach statycznych i astatycznych	487
21. Dyskretna transmitancja widmowa i dyskretnie charakterystyki częstotliwościowe	492
21.1. Dyskretna transmitancja widmowa	492
21.2. Dyskretnie charakterystyki częstotliwościowe	494
22. Stabilność liniowych układów impulsowych	501
22.1. Warunek konieczny i dostateczny stabilności	501
22.2. Kryteria stabilności	502
22.2.1. Kryterium Hurwitza	504
22.2.2. Kryterium Nyquista	507
22.3. Pytania kontrolne	511
23. Sterowanie cyfrowe	512
23.1. Struktury układów sterowania cyfrowego	512
23.2. Podstawowe algorytmy bezpośredniego sterowania cyfrowego	513
23.2.1. Algorytmy pozycyjne	515
23.2.2. Algorytmy prędkościowe	516
23.3. Jednoobwodowe układy bezpośredniego sterowania cyfrowego	518
23.4. Pytania kontrolne	525

24. Wybrane przykłady automatyzacji i sterowania	527
24.1. Układ regulacji położenia	527
24.2. Regulacja kursu statku	530
24.3. Automatyzacja układów napędowych prądu przemiennego	533
24.4. Układy regulacji kolumny destylacyjnej	535
Dodatek	538
D-1. Przekształcenie Laplace'a	538
D-1.1. Definicje przekształcenia Laplace'a	538
D-1.2. Własności przekształcenia Laplace'a	539
D-1.3. Wyznaczanie oryginału $f(t)$ z danej transformaty Laplace'a $F(s)$	542
D-2. Podstawy rachunku macierzowego	544
Literatura	555
Streszczenie	560
Summary	560