

Spis treści

Przedmowa	9
1. Przegląd teorii liniowych układów sterowania automatycznego	13
1.1. Wstęp. Definicja układu liniowego	13
1.2. Stabilność	17
1.3. Kryterium Routha-Hurwitza	21
1.4. Kryterium Nyquista	25
1.5. Graficzne metody analizy i projektowania układów liniowych	32
1.6. Układy wielowejściowe i wielowyjściowe	32
1.7. Sterowania autonomiczne	40
1.8. Analityczne projektowanie liniowych układów sterowania	42
Zadania	47
2. Zasady projektowania statystycznego	53
2.1. Wstęp. Szumy stochastyczne	53
2.2. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa	56
2.3. Gaussowska funkcja gęstości prawdopodobieństwa	58
2.4. Momenty	60
2.5. Hipoteza ergodyczna i wartość oczekiwana	61
2.6. Centralne twierdzenie graniczne	63
2.7. Funkcje korelacyjne	63
2.8. Gęstość widmowa mocy	73
2.9. Synteza układu w dziedzinie czasowej, równanie Wienera-Hopfa	81
2.10. Synteza układu metodą częstotliwościową	82
2.11. Realizowalność fizyczna, metoda Bode'a-Shannona	85
2.12. Projektowanie statystyczne układów z ograniczeniami	89
Zadania	96
3. Impulsowe układy sterowania i przekształcenie z	97
3.1. Wiadomości wstępne o układach impulsowych	97
3.2. Metody analizy układów impulsowych	98
3.3. Matematyczny opis impulsatora	99
3.4. Przekształcenie z	101
3.5. Transmittancje wyrażone przez transformaty z	103
3.6. Rola elementu podtrzymującego	104
3.7. Odwrotne przekształcenie z	110
3.8. Twierdzenia o przekształceniu z	112
3.9. Stabilność układów impulsowych	113
3.10. Korekcja układów impulsowych	117

3.11. O znaczeniu szczytu rezonansowego M_p i innych wskaźników względnej stabilności, zastosowanych do układów impulsowych	121
3.12. Zmodyfikowane przekształcenie z	122
3.13. Porównanie zwykłego i zmodyfikowanego przekształcenia z	125
3.14. Nieliniowe układy impulsowe	125
Zadania	128
4. Metody numeryczne	130
4.1. Wstęp	130
4.2. Rozwinięcie w szereg Taylora	131
4.3. Zmodyfikowana metoda Eulera	133
4.4. Metoda Adamsa	135
4.5. Metoda Milne'a	136
4.6. Metody Rungego-Kutta	138
4.7. Sposoby sprawdzania obliczeń	140
4.8. Dopasowanie krzywej za pomocą metody najmniejszych kwadratów	142
4.9. Wstęp do analizy metodą formy z	144
4.10. Metoda obliczeń numerycznych przy użyciu formy z	144
4.11. Układy nieliniowe i parametryczne analizowane metodą formy z	150
4.12. Dyskusja błędów w metodzie formy z	151
Zadania	154
5. Układy parametryczne	155
5.1. Wstęp	155
5.2. Klasyczna metoda analizy	156
5.3. Rachunek operatorowy w analizie układów parametrycznych	164
5.4. Sformułowanie metody Zadeha	165
5.5. Kilka szczególnych przypadków	167
5.6. Rozwinięcie w szereg transmitancji czwórników parametrycznych	170
5.7. Równanie różniczkowe spełnione przez $H(j\omega, t)$	171
5.8. Rozwiązanie dla układów o małych zmianach parametrów wokół wartości średniej	175
5.9. Rozwiązanie dla parametrów wolno zmieniających się	177
5.10. Zapis wektorowo-macierzowy układów parametrycznych	179
5.11. Rozwiązanie formalne niejednorodnego, liniowego równania wektorowo-macierzowego	182
5.12. Stabilność układów parametrycznych	183
5.13. Podsumowanie	187
Zadania	187
6. Przybliżone metody obliczania układów o słabych nieliniowościach przez rozwinięcie w szeregi	189
6.1. Wstęp	189
6.2. Metoda perturbacyjna Poincarégo	190
6.3. Pozbycie się składników „wiekowych”	192
6.4. Metoda aproksymacyjna dla układów drugiego rzędu	194
6.5. O stabilności cykli granicznych	200
6.6. Linearyzacja harmoniczna: metoda Kryłowa i Bogoliubowa	204
6.7. Równania aproksymacyjne dla elementu nieliniowego I klasy	206
6.8. Przykład obliczenia dla kilku członów I klasy	209
6.9. Równania aproksymacyjne członów nieliniowych II klasy	213
6.10. Składniki korekcyjne w metodzie równowagi harmonicznej	215
6.11. Analiza drgań niesymetrycznych w układach nieliniowych metodą równowagi harmonicznych	221
Zadania	225
7. Analiza graficzna: metody płaszczyzny fazowej	227
7.1. Wstęp	227
7.2. Konstrukcja płaszczyzny fazowej metodą izoklin	228
7.3. Metoda Pella konstrukcji trajektorii fazowych	234
7.4. Konstrukcja trajektorii fazowych metodą delta	236

7.5. Konstrukcja trajektorii fazowych dla układu z funkcją wymuszającą	237
7.6. Skala czasu na wykresie fazowym	241
7.7. Charakterystyczne postacie wykresu fazowego	242
7.8. Punkty osobliwe	246
7.9. Przekształcenia liniowe i postać kanoniczna	252
7.10. Stany energetyczne układów zachowawczych	256
7.11. Układy niezachowawcze i cykl graniczny pierwszego rodzaju	258
7.12. Wskaźnik Poincarégo punktu osobliwego	262
7.13. Kryterium Bendixsona wystąpienia cyklu granicznego	264
7.14. Definicje stabilności dla układów nieliniowych	268
7.15. Krzywe charakterystyczne Kahna-Macmillana	269
7.16. Rozszerzenie koncepcji płaszczyzny fazowej na układy wyższych rzędów	272
Zadania	273
8. Druga metoda Lapunowa	276
8.1. Wstęp	276
8.2. Pierwsza metoda Lapunowa	277
8.3. Zarys drugiej metody Lapunowa	277
8.4. Określenie znaku funkcji	279
8.5. Twierdzenie Lapunowa o stabilności i niestabilności układów nieliniowych	280
8.6. Określanie asymptotycznej stabilności układów liniowych za pomocą drugiej metody Lapunowa	285
8.7. Optymalizacja liniowych układów sterowania za pomocą drugiej metody Lapunowa	287
8.8. Twierdzenie Krasowskiego o globalnej stabilności asymptotycznej układów nieliniowych	296
8.9. Pierwsza postać kanoniczna Łurje	298
8.10. Uprozczone kryteria stabilności dla pierwszej postaci kanonicznej	305
8.11. Przesuwanie biegunów i zer	309
8.12. Zastosowanie drugiej metody Lapunowa do układów parametrycznych	315
8.13. Generacja funkcji Lapunowa metodą zmiennego gradientu	317
Zadania	320
9. Metoda funkcji opisującej i serwomechanizmy dwustawne	323
9.1. Wstęp	323
9.2. Metody analizy układów dwustawnych	324
9.3. Metoda funkcji opisującej	324
9.4. Kryteria stabilności wyrażone za pomocą metody funkcji opisującej	330
9.5. Korekcja liniowa za pomocą funkcji opisującej	331
9.6. Postać ogólna funkcji opisującej dla członów odcinkowo-liniowych	335
9.7. Ogólna funkcja opisująca dla członów o charakterystykach gładkich	348
9.8. Harmoniczne składniki korekcyjne funkcji opisującej	349
9.9. Uogólnione funkcje opisujące	356
9.10. Funkcje opisujące dla układów z sygnałami stochastycznymi	361
9.11. Charakterystyka częstotliwościowa układu zamkniętego i względna stabilność wyznaczona za pomocą funkcji opisującej	365
9.12. Charakterystyki układu zamkniętego o nieliniowości wieloznacznej. Metoda Hilla	371
9.13. Dwuharmoniczna funkcja opisująca	376
9.14. Przybliżona dwuharmoniczna funkcja opisująca dla przebiegów sinusoidalnych o szerokim zakresie zmian częstotliwości	381
9.15. Przybliżona dwuharmoniczna funkcja opisująca dla przebiegów sinusoidalnych z dodaniem szumów stochastycznych	390
9.16. Dokładna dwuharmoniczna funkcja opisująca dla przebiegów sinusoidalnych nie będących harmonicznymi. Zastosowanie do stabilizacji układów wymuszanych	392
9.17. Zastosowanie funkcji opisującej do syntezy	396
9.18. Odwrotna funkcja opisująca	401
9.19. Badanie układów dwustawnych za pomocą charakterystyki Cypkina	403
Zadania	407

10. Wstęp do optymalnych układów przełączających się (przełącznikowych)	409
10.1. Optymalizacja autonomicznych przełącznikowych układów położeniowych	409
10.2. Uprozczone liniowe przełączanie autonomicznego układu drugiego rzędu	412
10.3. Kryteria przełączania autonomicznych układów wyższych rzędów	417
10.4. Dobór czasowo-optymalnej linii przełączania układów autonomicznych	418
10.5. Układy sterowania o dwu rodzajach działania	423
10.6. Niestabilność na linii rozgraniczającej dwa rodzaje działania układu	423
10.7. Kształt linii rozgraniczającej dwa rodzaje działania układu	427
10.8. Optymalne układy nieprzełączające	431
10.9. Współczesne badania teoretyczne optymalnych układów przełączających się	433
10.10. Dodatkowe wiadomości o zapisie macierzowym układów liniowych	435
10.11. Czasowo-optymalne (przełączające się) układy autonomiczne	442
10.12. Optymalne impulsowe układy autonomiczne	449
10.13. Układy nieautonomiczne czasowo-optymalne (przełączające się)	452
Zadania	453
11. Wstęp do adaptacyjnych układów sterowania	455
11.1. Wstęp	455
11.2. Adaptacja do sygnału wejściowego lub optymalizacja odpowiedzi	458
11.3. Układy adaptacyjne z modelem	461
11.4. Ogólne kryteria sterowania adaptacyjnego	462
11.5. Funkcja identyfikacji	463
11.6. Całkowita identyfikacja bez informacji a priori	464
11.7. Czas identyfikacji wymagany przy identyfikacji idealnej	472
11.8. Identyfikacja całkowita przy znajomości a priori obiektu	476
11.9. Identyfikacja częściowa, czyli przybliżona	478
11.10. Funkcja decyzji	479
11.11. Wskaźnik jakości	479
11.12. Strategia optymalizacji	484
11.13. Metoda najszybszego spadku	485
11.14. Ciągłe i przyrostowe szukanie ekstremum	488
11.15. Funkcja modyfikacji	493
11.16. Stabilność adaptacyjnych układów sterowania	498
11.17. Podsumowanie stanu badań sterowania adaptacyjnego	501
11.18. Układy wykazujące pewne cechy uczenia się	502
Zadania	503
Dodatki	
Dodatek A. Postać całkowita charakterystyk wejście-wyjście dla pewnych elementów nieliniowych	504
Dodatek B. Wyprowadzenie dwuharmonicznej funkcji opisującej	508
Dodatek C. Synteza próbki o skończonej długości szumu binarnego o odstępach dyskretnych dla zadanych własności statystycznych	515
Dodatek D. Rozkład wieloznacznych nieliniowości bezinercyjnych	517
Dodatek E. Metoda analityczna określenia odwrotnej funkcji opisującej	519
Skorowidz rzeczowy	527