

Spis treści

Przedmowa do wydania II	5
1. Liniowe deterministyczne układy wielowymiarowe	6
1.1. Opis układów w przestrzeni stanów	6
1.1.1. Przestrzeń stanów i przestrzeń fazowa	6
1.1.2. Wyznaczanie elementów macierzy A, B, C, D metodą włączania idealnych źródeł napięcia i prądu	9
1.2. Związek opisu w przestrzeni stanów z macierzą transmitancji operatorowych	18
1.2.1. Wyznaczanie macierzy G(s) na podstawie danych macierzy A, B, C, D	19
1.2.2. Wyznaczanie macierzy A, B, C, D na podstawie danej macierzy G(s)	19
1.2.2.1. Metoda bezpośrednia	19
1.2.2.2. Metoda równoległa	22
1.2.2.3. Metoda iteracyjna	26
1.2.3. Liniowe przekształcenia zmiennych stanu	30
1.3. Wyznaczanie rozwiązań układów równań różniczkowych liniowych o stałych współczynnikach	33
1.3.1. Metoda wzoru Sylwestera	33
1.3.2. Metoda odwrotnego przekształcenia Laplace'a	33
1.3.3. Metoda przebiegów chwilowych	33
1.4. Korekcja metodami przestrzeni stanów.	38
1.4.1. Korekcja układów jednowymiarowych	38
1.4.2. Korekcja układów wielowymiarowych	44
1.5. Sterowalność i obserwowalność liniowych układów stacjonarnych	47
1.5.1. Warunki konieczne i dostateczne sterowalności	47
1.5.2. Warunki konieczne i dostateczne obserwowalności	51
1.6. Uogólniona przestrzeń stanów	53
2. Układy regulacji impulsowej	57
2.1. Matematyczne podstawy teorii układów regulacji impulsowej	57
2.1.1. Podstawowe pojęcia z teorii równań różnicowych	59
2.1.2. Przekształcenie Laplace'a dla funkcji schodkowych	63
2.1.3. Własności przekształcenia dyskretnego Laplace'a	66
2.1.4. Rozwiązywanie równań różnicowych	74
2.1.5. Odwrotne przekształcenie dyskretne Laplace'a	79
2.2. Równania układu impulsowego przy impulsach prostokątnych	87
2.2.1. Określenie przepustowości układu impulsowego	89
2.2.2. Charakterystyka częstotliwościowa układu impulsowego przy impulsach prostokątnych	92

2.2.3. Schematy blokowe układów regulacji impulsowej i obliczanie przepustowości wypadkowych	93
2.2.3.1. Szeregowe połączenie członów impulsowych	93
2.2.3.2. Równoległe połączenie członów impulsowych	94
2.2.3.3. Układ z impulsowym sprzężeniem zwrotnym	94
2.3. Ocena stabilności układów regulacji impulsowej	95
2.3.1. Analog kryterium Hurwita	95
2.3.2. Analog kryterium Michajłowa	97
2.3.3. Analog kryterium Nyquista	99
2.3.3.1. Układy regulacji statycznej	99
2.3.3.2. Układy regulacji astatycznej oraz układy neutralne	101
2.4. Kryteria jakości przebiegów nieustalonych	102
2.4.1. Kryteria częstotliwościowe	102
2.4.2. Kryteria całkowite	113
2.4.3. Ocena jakości układu na podstawie stopnia stabilności	120
2.5. Określenie przebiegu przejściowego przy dowolnym wymuszeniu bez konieczności obliczania pierwiastków równania charakterystycznego	121
2.5.1. Metoda siecznych	121
2.5.2. Metoda charakterystyk trapezowych	122
2.5.3. Metoda analityczna w zastosowaniu do liniowych układów regulacji impulsowej	124
2.5.4. Metoda analityczna w zastosowaniu do nieliniowych układów regulacji impulsowej	126
3. Wielowymiarowe liniowe układy stochastyczne	129
3.1. Zmienne losowe jedno- i wielowymiarowe	129
3.1.1. Zmienne losowe jednowymiarowe	129
3.1.1.1. Dystrybuanta i funkcja gęstości zmiennej losowej	129
3.1.1.2. Momenty zmiennej losowej	131
3.1.1.3. Funkcja charakterystyczna zmiennej losowej	133
3.1.1.4. Rozkład równomierny i normalny zmiennej losowej	134
3.1.2. Zmienne losowe wielowymiarowe	136
3.1.2.1. Dystrybuanta i funkcja gęstości wektora losowego	136
3.1.2.2. Dystrybuanta i funkcja gęstości warunkowej zmiennej losowej	138
3.1.2.3. Momenty wektora losowego	139
3.1.2.4. Funkcja charakterystyczna wektora losowego	141
3.1.2.5. Wektor losowy o rozkładzie normalnym	143
3.2. Procesy stochastyczne	145
3.2.1. Funkcja gęstości i momenty procesu stochastycznego	145
3.2.1.1. Funkcja gęstości procesu stochastycznego	145
3.2.1.2. Momenty procesu stochastycznego	146
3.2.2. Niestacjonarne oraz stacjonarne w wąskim i szerokim sensie procesy stochastyczne	148
3.2.3. Własności funkcji korelacyjnych i procesy stochastyczne nieskorelowane	149
3.2.4. Wartość oczekiwana oraz funkcja korelacyjna sumy i iloczynu procesów stochastycznych	151
3.2.5. Hipoteza ergodyczności i ergodyczne procesy stochastyczne	153
3.2.6. Gęstość widmowa stacjonarnego procesu stochastycznego	155
3.2.7. Pochodna i całka procesu stochastycznego	156
3.3. Analiza procesów stochastycznych w układach liniowych	158
3.3.1. Wyznaczanie momentów odpowiedzi układów liniowych przy wymuszeniach stochastycznych	158
3.3.1.1. Wyznaczanie momentów odpowiedzi liniowych układów stacjonarnych przy wymuszeniach niestacjonarnych	158
3.3.1.2. Wyznaczanie momentów odpowiedzi liniowych układów stacjonarnych przy wymuszeniach stacjonarnych	162

3.3.1.3. Wyznaczanie momentów odpowiedzi liniowych układów niestacjonarnych przy wymuszeniach niestacjonarnych	163
3.3.2. Analiza fourierowska stacjonarnych procesów stochastycznych	167
3.3.3. Wyznaczanie charakterystyk dynamicznych liniowych układów stacjonarnych metodą funkcji korelacyjnych	169
3.3.4. Równanie Wienera-Bootona	173
3.4. Analiza procesów stochastycznych w układach nieliniowych	180
3.4.1. Podział układów na słabo i silnie nieliniowe	180
3.4.2. Analiza procesów stochastycznych w układach nieliniowych metodą linearyzacji	180
3.4.3. Analiza procesów stochastycznych w układach nieliniowych metodą linearyzacji statystycznej	181
4. Układy nieliniowe	186
4.1. Wstęp	186
4.2. Analiza i synteza statyczna nieliniowych UAR	186
4.2.1. Linearyzacja nieliniowych charakterystyk statycznych	186
4.2.1.1. Metoda stycznej	187
4.2.1.2. Metoda średniej siecznej	188
4.2.2. Charakterystyki statyczne członów UAR	188
4.2.2.1. Charakterystyki jednoznaczne	188
4.2.2.2. Charakterystyki wieloznaczne	192
4.3. Charakterystyki statyczne UAR	195
4.3.1. Określenia i oznaczenia	195
4.3.2. Postawienie zadania	196
4.3.3. Wytyczne postępowania	197
4.3.4. Przykłady	198
4.4. Projektowanie UAR na podstawie charakterystyk statycznych	205
4.4.1. Przykład projektowania układu	206
4.5. Dynamika układów nieliniowych	216
4.5.1. Pojęcia podstawowe	216
4.5.1.1. Model matematyczny układu	216
4.5.1.2. Stan układu dynamicznego, przestrzeń i trajektoria stanu	217
4.5.2. Reprezentacja stanów równowagi w przestrzeni fazowej	219
4.5.3. Pojęcie stabilności	219
4.5.4. Stabilność układów swobodnych	220
4.5.5. Stabilność układów sterowanych	222
✓ 4.5.6. Analiza stabilności lokalnej w sensie Lapunowa	222
4.5.7. Analiza stabilności globalnej w sensie Lapunowa	229
4.5.7.1. Zastosowanie metody Lapunowa do badania stabilności liniowych systemów stacjonarnych	231
4.5.7.2. Zastosowanie metody Lapunowa do badania stabilności liniowych systemów niestacjonarnych	238
4.5.7.3. Metoda Krasowskiego do badania stabilności systemów nieliniowych	239
4.5.8. Zagadnienie wyznaczania obszaru stabilności asymptotycznej	242
4.5.9. Metoda zmiennego gradientu w zastosowaniu do znajdowania funkcji Lapunowa	251
✓ 4.5.10. Metoda Popowa	256
4.5.10.1. Interpretacja geometryczna metody Popowa	258
4.5.11. Zastosowanie metody Lapunowa do syntezy układów regulacji	260
4.5.11.1. Obliczenie η dla systemów liniowych stacjonarnych	261
4.5.11.2. Synteza parametryczna	263
4.5.11.3. Synteza suboptymalnego regulatora	265

4.5.12. Metoda funkcji opisującej (metoda równowagi pierwszej harmonicznej)	267
4.5.12.1. Hipotezy filtru i samowzbudzenia	270
4.5.12.2. Obliczanie funkcji opisującej	273
4.5.12.3. Zagadnienie stabilności drgań samowzbudnych UAR z jednym członem nieliniowym na podstawie kryterium Hurwitza	277
4.5.12.4. Badanie stabilności drgań samowzbudnych UAR z jednym członem nieliniowym na podstawie kryterium Nyquista	284
4.5.12.5. Badanie stabilności drgań samowzbudnych UAR zawierających człony nieliniowe poprzedzielane członami liniowymi	289
4.5.12.6. Badanie stabilności drgań samowzbudnych w nieliniowych UAR na podstawie kryterium Michajłowa	290
4.5.12.7. Zagadnienie określenia amplitudy i fazy drgań wymuszonych przy wymuszeniu harmonicznym	293
4.5.12.8. Metoda funkcji opisującej w zastosowaniu do nieliniowych UAR, których człony nieliniowe mają charakterystyki będące dowolnymi funkcjami zarówno parzystymi, jak i nieparzystymi	294
5. Optymalne układy regulacji automatycznej	297
5.1. Wstęp	297
5.2. Ewolucja pojęcia optymalnego procesu sterowanego	298
5.3. Zagadnienia sterowania optymalnego	302
5.4. Przeprowadzenie obiektu z jednego stanu w drugi w najkrótszym czasie	302
5.5. Ekonomiczne zużycie paliwa	302
5.6. Optymalne tłumienie zmienne w układach pomiarowych	303
5.7. Przykład sterowania dwuparametrowego	304
5.8. Sterowanie optymalne w ekonomii	304
5.9. Postawienie problemu i pojęcia podstawowe. Modele matematyczne procesów sterowania	304
5.9.1. Równanie różniczkowe zwyczajne	304
5.9.2. Równanie różnicowe	305
5.9.3. Równanie różniczkowo-różnicowe	305
5.9.4. Równanie różniczkowo-całkowe	306
5.9.5. Równanie różniczkowo-cząstkowe	306
5.9.6. Modele procesów stochastycznych i adaptacyjnych	306
5.9.7. Ograniczenia wektora sterującego	307
5.9.8. Ograniczenia wektora fazowego	308
5.9.9. Kryteria optymalności sterowania	308
5.9.10. Kryteria optymalności dla modeli procesów dyskretnych	309
5.10. Metody teorii sterowania optymalnego	309
5.10.1. Metody procesów deterministycznych	309
5.10.2. Zmiana kryteriów optymalności	310
5.10.3. Redukcja problemów sterowania optymalnego do problemu czasowo-optymalnego	311
5.11. Metoda pola orientorowego	311
5.11.1. Ogólne zasady metody	311
5.11.2. Przykład równania nieautonomicznego	314
5.11.3. Przykład równania autonomicznego	315
5.12. Metoda obszaru osiągalnego	315
5.12.1. Ogólne zasady metody	315
5.12.2. Cel sterowania	316
5.12.3. Obszar osiągalny	317
5.12.4. Rodzaje punktów położonych na brzegu	318
5.12.5. Sterowanie optymalne	418
5.12.6. Sterowanie wielowymiarowe	319

✧ 5.13. Zasada maksimum	320
5.13.1. Sformułowanie zasady maksimum	320
5.13.2. Przykład zastosowania zasady maksimum	320
5.13.3. Trudności przy stosowaniu zasady maksimum	321
5.13.4. Przypadek szczególny — sterowanie liniowe	322
5.13.5. Uogólnienie problemu sterowania czasowo-optimalnego	322
5.13.6. Uogólnienie zasady maksimum	322
5.13.7. Procesy opisane równaniem nieautonomicznym	323
✧ 5.14. Programowanie dynamiczne	324
5.14.1. Zasada optymalności	324
5.14.2. Przykład zastosowania programowania dynamicznego	325
5.14.3. Programowanie dynamiczne przy użyciu maszyn	325
5.14.4. Własności charakterystyczne metody Bellmana	327
5.14.5. Zastosowanie metody Bellmana do procesów ciągłych	327
5.14.6. Metoda Bellmana a istnienie pochodnych cząstkowych	329
5.14.7. Przykłady	329
6. Wstęp do metod optymalizacji	337
6.1. Pojęcia podstawowe	337
6.2. Klasyczne metody optymalizacji statycznej	337
6.2.1. Problemy bez ograniczeń	337
6.2.1.1. Funkcja jednej zmiennej	337
6.2.1.2. Funkcje N zmiennych	338
6.2.2. Problemy z ograniczeniami	340
6.2.2.1. Ograniczenia równościowe	340
6.2.2.2. Ograniczenia nierównościowe	346
6.3. Metody krokowe (elementarne)	349
6.3.1. Metoda dychotomii	349
6.3.2. Metoda Fibonacciego	450
6.3.3. Metoda złotego podziału	353
6.3.4. Maksymalna liczba eksperymentów	355
Bibliografia	357