

SPIS TREŚCI

Przedmowa	9
Wykaz oznaczeń	11

1. Wstęp

1.1. Definicja i przykłady wielowymiarowych obiektów regulacji i sterowania.	19
1.2. Specyfika wielowymiarowych obiektów regulacji i sterowania	22
1.3. Stosowany model	23
1.4. Zarys historyczny	23

2. Opis matematyczny wielowymiarowych układów liniowych, stacjonarnych

2.1. Wstęp	25
2.2. Macierz transmitancji	26
2.2.1. Definicja i właściwości	26
2.2.2. Rozkład macierzy transmitancji na składniki unipolarne	30
2.2.3. Diagonalizacja macierzy licznikowej i postać kanoniczna Smitha	31
2.2.4. Diagonalizacja macierzy transmitancji i postać kanoniczna Smitha-McMillana	35
2.2.5. Dekompozycja macierzy transmitancji i klasyfikacja układów wielowymiarowych	38
2.3. Równania stanu	40
2.3.1. Pojęcie stanu układu	40
2.3.2. Związek z macierzą transmitancji.	47
2.3.2.1. Zależności podstawowe.	47
2.3.2.2. Postać kanoniczna Smitha macierzy charakterystycznej.	48
2.3.2.3. Niejednoznaczność równań stanu	49
2.3.2.4. Metoda obliczania macierzy $C(sI - A)^{-1}B$	51
2.3.3. Postać kanoniczna Jordana macierzy stanu.	52
2.3.3.1. Zależności podstawowe.	52
2.3.3.2. Przekształcenie w postać kanoniczną Jordana	54
2.3.3.3. Zalety i zastosowania postaci kanonicznej Jordana.	57

2.3.4.	Wrażliwość macierzy transmitancji na zmiany wartości elementów macierzy stanu	57
2.3.4.1.	Wrażliwość wartości własnych macierzy stanu układu	57
2.3.4.2.	Wrażliwość współczynników wielomianu charakterystycznego	58
2.3.4.3.	Wrażliwość współczynników macierzy licznikowej	58
2.3.5.	Równania stanu układów złożonych	58
2.3.6.	Redukcja stopnia równań stanu układu wielowymiarowego	60
2.3.7.	Zastosowanie do modelowania analogowego	61
2.3.8.	Zastosowanie do modelowania cyfrowego	61
2.3.8.1.	Obliczanie e^{AT} metodą rozwinięcia w szereg	63
2.3.8.2.	Obliczanie e^{AT} na podstawie postaci kanonicznej Jordana macierzy A	67
2.3.8.3.	Obliczanie e^{AT} za pomocą wielomianów interpolujących Lagrange'a-Sylwestra	71
2.3.8.4.	Porównanie metod obliczania e^{AT}	73
2.3.9.	Równanie zastępcze ruchu swobodnego w przypadku wymuszeń skokowych i liniowych	73
2.4.	Realizacja minimalna macierzy transmitancji	74
2.4.1.	Realizacja i realizacja minimalna	74
2.4.2.	Realizacje minimalne kanoniczne dla układów jednowymiarowych	75
2.4.3.	Właściwości realizacji minimalnej dla układów wielowymiarowych	80
2.4.4.	Realizacja minimalna macierzy transmitancji w przypadku biegunów pojedynczych wyznaczona za pomocą metody Gilberta	82
2.4.5.	Realizacja minimalna macierzy transmitancji w przypadku ogólnym wyznaczona za pomocą metody Kalmana	85
2.5.	Przekształcenia równań liniowych układów wielowymiarowych	89
2.5.1.	Uzasadnienie	89
2.5.2.	Macierz systemowa układu wielowymiarowego i jej właściwości	91
2.5.3.	Typy macierzy systemowych i ich przekształcenia	93
2.5.4.	Przekształcenie typu macierzy systemowej w zastosowaniu do zmiany postaci opisu matematycznego układów	96
2.5.5.	Wyznaczenie realizacji minimalnej metodą przekształcenia macierzy systemowej	99
2.6.	Sterowalność i obserwowalność układów wielowymiarowych	101
2.6.1.	Wstęp	101
2.6.2.	Pojęcie sterowalności w sensie Kalmana	102
2.6.2.1.	Analiza sterowalności na podstawie postaci kanonicznej Jordana	105
2.6.3.	Pojęcie obserwowalności w sensie Kalmana	107
2.6.3.1.	Analiza obserwowalności na podstawie postaci kanonicznej Jordana	109
2.6.4.	Zasada dualności	111
2.6.5.	Postać kanoniczna Kalmana równań stanu	112
2.6.6.	Sterowalność i obserwowalność układów złożonych	115
2.6.7.	Zastosowania	116

3. Podstawowa struktura wielowymiarowego układu regulacji automatycznej

3.1.	Równania podstawowe	118
3.2.	Stabilność wielowymiarowych układów regulacji automatycznej	122
3.2.1.	Wstęp	122
3.2.2.	Krótką charakterystyka metod badania stabilności	125
3.2.3.	Metody algebraiczne badania stabilności	125
3.2.3.1.	Metoda Gerszgorina lokalizacji wartości własnych macierzy stanu układu regulacji	125
3.2.3.2.	Metody Ostrowskiego lokalizacji wartości własnych macierzy stanu układu regulacji	127
3.2.3.3.	Metoda Zubowa	129
3.2.3.4.	Metoda Routha-Hurwitza	130
3.2.3.5.	Druga metoda Lapunowa	131

3.2.4.	Metody częstotliwościowe badania stabilności	134
3.2.4.1.	Zmodyfikowana metoda Michajłowa-Leonharda	134
3.2.4.2.	Uogólnienie metody Nyquista	136
3.2.4.3.	Metoda transmitancji charakterystycznych	140
3.2.4.4.	Metoda MacFarlane'a	143
3.2.4.5.	Metoda Rosenbrocka	145
3.3.	Kryteria dobroci regulacji obiektów wielowymiarowych	149
3.3.1.	Uwagi ogólne	149
3.3.2.	Kryteria zapasu stabilności	150
3.3.3.	Kryteria rozkładu pierwiastków równania charakterystycznego	150
3.3.4.	Kryteria czasowe	150
3.3.5.	Ocena czasu ustalenia za pomocą funkcji Lapunowa	150
3.3.6.	Kryteria częstotliwościowe	152
3.3.7.	Kryteria całkowite	154
3.4.	Wrażliwość wielkości regulowanych na zmianę parametrów obiektu	155

4. Wielowymiarowe układy regulacji nieautonomiczne z regulatorem o strukturze diagonalnej

4.1.	Równania podstawowe	159
4.1.1.	Macierze transmitancji	159
4.1.2.	Równania stanu	161
4.1.3.	Zmiana przyporządkowania wielkości sterujących wielkościom regulowanym	163
4.2.	Metoda odwrotnych charakterystyk biegunowych dla układów dwuwymiarowych regulacji	165
4.3.	Interakcja i jej miary	171
4.3.1.	Wstęp	171
4.3.2.	Wskaźnik strukturalnej niestabilności	171
4.3.3.	Obszary stabilności wielowymiarowych układów nieautonomicznych regulacji proporcjonalnej	177
4.3.4.	Wskaźnik pogorszenia podatności regulacyjnej	181
4.3.5.	Zastosowanie do problemu przyporządkowania	186
4.4.	Dobór nastaw regulatorów	190
4.4.1.	Metody algorytmiczne i heurystyczne	190
4.4.2.	Uogólniona metoda Zieglera-Nicholsa	191
4.5.	Układy regulacji ze sterowaniem od zakłóceń	200
4.5.1.	Układy ze sterowaniem od zakłóceń	200
4.5.2.	Wielowymiarowe układy regulacji ze sterowaniem od zakłóceń	201
4.6.	Układy regulacji kaskadowej	202

5. Wielowymiarowe układy regulacji nieautonomiczne z regulatorem o strukturze niediagonalnej

5.1.	Uwagi ogólne	206
5.2.	Projektowanie metodą majoryzacji	207
5.3.	Projektowanie na podstawie warunku inwariantności	211

6. Autonomizacja obiektów wielowymiarowych i układy regulacji autonomiczne

6.1.	Wstęp	213
6.2.	Autonomizacja za pomocą układów rozsprzęgających szeregowych	214
6.2.1.	Układy rozsprzęgające o strukturze P	215
6.2.2.	Układy rozsprzęgające o strukturze V	217
6.2.3.	Właściwości zakłóceniami wielowymiarowych układów regulacji autonomicznych z układami rozsprzęgającymi szeregowymi	220
6.2.4.	Autonomizacja statyczna obiektów nieliniowych	223



6.3. Autonomizacja za pomocą sprzężeń zwrotnych od współrzędnych stanu	224
6.3.1. Postawienie problemu	224
6.3.2. F -inwarianty układu o sprzężeniu zwrotnym od współrzędnych stanu . . .	225
6.3.3. Układy całkująco-autonomiczne	227
6.3.4. Warunek konieczny i wystarczający autonomizacji	230
6.3.5. Klasa macierzy autonomizujących	231
6.3.6. Autonomizacja za pomocą sprzężeń zwrotnych od składowych wektora wyjść obiektu	234
6.3.7. Metoda Gilberta	235
6.3.8. Przypadek $\det D_o^+ = 0$ i $\det H_o(s, 0, 1) \neq 0$	241

7. Sterowanie modalne obiektów wielowymiarowych

7.1. Wstęp	243
7.2. Sterowanie modalne obiektów jednowyjściowych	244
7.3. Uogólnienie dla obiektów wielowyjściowych	246
7.4. Przypadek braku dostępu pomiarowego do wszystkich współrzędnych stanu . .	249

8. Sterowanie optymalne układów wielowymiarowych przy kwadratowych wskaźnikach jakości

8.1. Wstęp	251
8.2. Sterowanie stanu układu w przypadku skończonego czasu sterowania	252
8.2.1. Sprowadzenie problemu do równania Hamiltona-Jacobiego-Bellmana . . .	253
8.2.2. Macierzowe równanie różniczkowe Riccatiego i jego rozwiązanie . . .	257
8.3. Sterowanie wyjścia układu w przypadku skończonego czasu sterowania . . .	261
8.4. Sterowanie stanu układu w przypadku nieskończonego czasu sterowania . .	263
8.4.1. Algebraiczne równanie Riccatiego	265
8.4.2. Wpływ elementów macierzy R i Q	267
8.5. Sterowanie wyjścia układu w przypadku nieskończonego czasu sterowania . .	270
8.5.1. Interpretacja częstotliwościowa	271
8.5.2. Projektowanie za pomocą metod częstotliwościowych	274

9. Metody rekonstrukcji wektora stanu

9.1. Wstęp	276
9.2. Obserwator Luenbergera	277
9.2.1. Zasadnicza idea	277
9.2.2. Postać kanonicznie obserwowalna równań stanu	279
9.2.3. Projektowanie obserwatora dla układu jednowyjściowego	283
9.2.4. Projektowanie obserwatora dla układu wielowyjściowego	284
9.2.5. Projektowanie obserwatora rekonstruującego funkcję $a^T x(t)$	285
9.2.6. Stabilność układów sterowania modalnego i optymalnego z obserwatorami	286
9.3. Filtr Kalmana-Bucy	288
9.3.1. Sformułowanie problemu i założenia	288
9.3.2. Pewne twierdzenia pomocnicze	289
9.3.3. Równanie Wienera-Hopfa	291
9.3.4. Równanie filtru Kalmana-Bucy	292
9.3.5. Obliczenie macierzy $K_f(t)$	294
9.3.6. Obliczenie macierzy $V_c(t)$	295
9.3.7. Przypadek stacjonarności zakłóceń	296
9.3.8. Estymacja optymalna i sterowanie optymalne a zasada dualności	297
9.3.9. Dekompozycja sterowania optymalnego w przypadku zakłóceń stocha- stycznych	299
9.3.10. Interpretacja częstotliwościowa filtru stacjonarnego Kalmana-Bucy przy zakłóceniach stacjonarnych	300
9.4. Filtr Kalmana a obserwator Luenbergera	302
Wykaz literatury	303
Skorowidz	311