Spis rzeczy

1. Wstęp **9**

2. Opisy liniowych systemów dynamicznych **11**
2.1. Wprowadzenie 11
2.2. Równanie różniczkowe 11
2.2.1. Liniowe równanie różniczkowe 11
2.2.2. Równanie liniowe jako rezultat linearyzacji 14
2.2.3. Proces, system, opis 16
2.3. Transmitancja 18
2.3.1. Definicja. Liniowość systemu 18
2.3.2. Transmitancja systemów złożonych 19
2.4. Odpowiedzi na standardowe pobudzenia 20
2.4.1. Odpowiedź impulsowa 20
2.4.2. Odpowiedź skokowa 22
2.4.3. Odpowiedzi systemu a bieguny transmitancji 25
2.5. Transmitancja widmowa 26
2.5.1. Definicja 27
2.5.2. Charakterystyki częstotliwościowe 27
2.6. Splot 29
2.7. Równanie fazowe 29
2.8. Związki między opisami 31
2.9. Uwagi końcowe 32

3. Człony dynamiczne **33**
3.1. Człon proporcjonalny 33
3.2. Człony inercyjne 34
3.2.1. Człon inercyjny pierwszego rzędu 34
3.2.2. Człon inercyjny drugiego rzędu 35
3.2.3. Człony inercyjne wyższych rzędów 36
3.3. Człon oscylacyjny 37

3.4. Człony całkujące . . . 39
3.4.1. Człon całkujący . . . 39
3.4.2. Człon całkujący z inercją . . . 39
3.5. Człony różniczkujące . . . 41
3.5.1. Człon różniczkujący . . . 41
3.5.2. Człon różniczkujący z inercją . . . 41
3.6. Przybliżone charakterystyki logarytmiczne . . . 42
3.7. Uwagi końcowe . . . 45

4. Stabilność . . . 47
4.1. Definicja . . . 47
4.2. Twierdzenie o stabilności . . . 48
4.3. Własności systemów stabilnych . . . 52
4.3.1. Odpowiedź impulsowa . . . 52
4.3.2. Odpowiedź skokowa . . . 53
4.3.3. Transmitancja widmowa . . . 54
4.3.4. Równanie fazowe . . . 56
4.3.5. Ograniczone wejście – ograniczone wyjście . . . 58
4.4. Własności systemów niestabilnych . . . 59

5. Kryteria stabilności . . . 61
5.1. Systemy o dowolnej strukturze . . . 62
5.1.1. Twierdzenie o znaku współczynników . . . 62
5.1.2. Kryterium Routha–Hurwitza . . . 63
5.1.3. Kryterium Hurwitza . . . 66
5.1.4. Kryterium Michajłowa . . . 67
5.2. Systemy ze sprzężeniem zwrotnym . . . 72
5.2.1. Wprowadzenie . . . 72
5.2.2. Kryterium Nyquista . . . 74

6. Równanie stanu . . . 83
6.1. Wprowadzenie . . . 83
6.2. System sterowalny . . . 85
6.3. System obserwowalny . . . 88
6.4. Struktura systemu . . . 91
6.4.1. Struktura a sterowalność . . . 91
6.4.2. Struktura a obserwowalność . . . 93
6.4.3. Pełna struktura systemu . . . 95
6.5. Równanie stanu, równanie różniczkowe, transmitancja . . . 97
6.5.1. Równanie stanu, równanie różniczkowe . . . 97
6.5.2. Dowody równoważności opisów . . . 100
6.5.3. Równanie różniczkowe, transmitancja . . . 104
6.6. Stabilność względem stanu . . . 108

7. Regulacja automatyczna 111
7.1. Wstęp 111
7.2. Wymagania 113
7.2.1. Stabilność 113
7.2.2. Uchyb w stanie ustalonym 113
7.2.3. Szybkość regulacji 113
7.2.4. Podsumowanie 114
7.3. Regulacja statyczna, czyli P 114
7.3.1. Własności 114
7.3.2. Regulacja z obiektem inercyjnym 116
7.4. Regulacja astatyczna 118
7.4.1. Własności 118
7.4.2. Regulacja I 118
7.4.3. Regulacja PI 120
7.4.4. Regulacja PID 121
7.4.5. Porównanie regulacji P, PI oraz PID 122
7.5. Inne sygnały wartości zadanej 123

8. Sygnały losowe w systemach ciągłych 125
8.1. Wprowadzenie 125
8.2. System pobudzany białym szumem 126
8.3. System przy pobudzeniu skorelowanym 129
8.4. Regulacja w obecności sygnału losowego 130
8.4.1. Wartość zadana procesem stochastycznym 131
8.4.2. Zaszumiony sygnał wartości zadanej 132

9. Opisy systemów dyskretnych 135
9.1. Równanie różnicowe 135
9.2. Transmitancja 140
9.2.1. Definicja. Liniowość systemu 140
9.2.2. Systemy z opóźnieniem 141
9.2.3. Transmitancja systemów złożonych 141
9.3. Transmitancja widmowa 142
9.4. Odpowiedzi na standardowe pobudzenia 143
9.4.1. Odpowiedź impulsowa 143
9.4.2. Odpowiedź skokowa 146
9.5. Splot dyskretny 148
9.6. Równanie fazowe 148
9.7. System ciągły sterowany dyskretnie 149
9.7.1. Impulsator, ekstrapolator 149
9.7.2. Transmitancja 150
9.8. Związki między opisami 154

10. Stabilność systemów dyskretnych . . . 155
10.1. Definicja . . . 155
10.2. Twierdzenie o stabilności . . . 156
10.3. Własności systemów stabilnych . . . 158
10.3.1. Odpowiedź impulsowa i skokowa . . . 159
10.3.2. Transmitancja widmowa . . . 160
10.3.3. Równanie fazowe . . . 161
10.3.4. Ograniczone wejście – ograniczone wyjście . . . 162
10.4. Własności systemów niestabilnych . . . 163

11. Kryteria stabilności systemów dyskretnych . . . 165
11.1. Kryterium Schura–Cohna . . . 165
11.2. Kryterium Jury'ego . . . 171
11.3. Kryterium Michajłowa . . . 172
11.4. Przekształcenie półpłaszczyzny w koło . . . 175
11.5. Inne kryteria . . . 180
11.6. System ze sprzężeniem zwrotnym, kryterium Nyquista . . . 181

12. Równanie stanu systemu dyskretnego . . . 187
12.1. Wprowadzenie . . . 187
12.2. System sterowalny . . . 188
12.2.1. System obserwowalny . . . 189
12.3. Struktura systemu . . . 190
12.3.1. Struktura a sterowalność . . . 190
12.3.2. Struktura a obserwowalność . . . 191
12.3.3. Pełna struktura systemu . . . 192
12.4. Równanie stanu, równanie różnicowe, transmitancja . . . 194
12.4.1. Równoważne równania stanu . . . 194
12.4.2. Dowody równoważności opisów . . . 195
12.4.3. Równanie różnicowe, transmitancja . . . 198
12.5. Stabilność względem stanu . . . 201
12.6. System ciągły sterowany dyskretnie . . . 203

13. Dyskretna regulacja automatyczna . . . 205
13.1. System automatycznej regulacji . . . 205
13.2. Regulacja statyczna, czyli P . . . 207
13.3. Regulacja astatyczna . . . 207
13.3.1. Regulacja I . . . 207
13.3.2. Regulacja PI . . . 208
13.4. Regulacja z obiektem ciągłym . . . 209

14. Sygnały losowe w systemach dyskretnych . . . 213
14.1. Wprowadzenie . . . 213
14.2. System pobudzany białym szumem . . . 213

14.3. System przy pobudzeniu skorelowanym . . . 215
14.4. Regulacja w obecności sygnału losowego . . . 216
14.4.1. Wartość zadana procesem stochastycznym . . . 216
14.4.2. Zaszumiony sygnał wartości zadanej . . . 217

Dodatek A. Transformacja Laplace'a . . . 219
A.1. Skok jednostkowy i impuls Diraca . . . 219
A.2. Definicja i własności . . . 222
A.2.1. Definicja . . . 222
A.2.2. Podstawowe własności . . . 223
A.2.3. Transformata pochodnej . . . 224
A.3. Transformaty wybranych funkcji . . . 225
A.4. Rozkład na ułamki proste, funkcja oryginalna . . . 228
A.4.1. Rozkład na ułamki proste . . . 228
A.4.2. Twierdzenia o funkcji oryginalnej . . . 232
A.5. Własności graniczne . . . 236
A.6. Równanie różniczkowe . . . 238
A.7. Transformacja Fouriera . . . 240

Dodatek B. Transformacja $\mathcal{Z}$ . . . 243
B.1. Definicja i własności . . . 243
B.1.1. Definicja . . . 243
B.1.2. Transformaty wybranych ciągów . . . 245
B.2. Oryginały funkcji wymiernych . . . 247
B.3. Własności graniczne . . . 250
B.4. Dyskretna transformacja Fouriera . . . 251
B.5. Równanie różnicowe . . . 252
B.6. Transformacja $\mathcal{Z}$ a transformacja Laplace'a . . . 255

Dodatek C. Wektory, macierze, funkcje macierzowe . . . 257
C.1. Wektory, macierze . . . 257
C.2. Wektor własny, wartość własna . . . 261
C.3. Macierze podobne, diagonalizacja . . . 262
C.4. Wielomiany macierzowe . . . 264
C.5. Macierz fazowa . . . 265
C.6. Funkcja $e^{\mathbf{A}t}$ . . . 269
C.6.1. Definicja . . . 269
C.6.2. Własności . . . 270
C.7. Ciąg $\mathbf{A}^n$ . . . 273

Dodatek D. Sterowalność, obserwowalność . . . 275
D.1. Systemy ciągłe . . . 275
D.1.1. Sterowalność . . . 275
D.1.2. Obserwowalność . . . 277

D.2. Systemy dyskretne 279
D.2.1. Sterowalność 279
D.2.2. Obserwowalność 280

Dodatek E. Procesy stochastyczne drugiego rzędu 281
E.1. Procesy z czasem ciągłym 281
E.1.1. Funkcja korelacji, gęstość widmowa 281
E.1.2. Biały szum 283
E.1.3. Całka i pochodna procesu 283
E.2. Procesy z czasem dyskretnym 284

Dodatek F. Tablice transformat 287
F.1. Transformacja Laplace'a 287
F.2. Transformacja $\mathcal{Z}$ 289

Bibliografia 291

Indeks 293