

Spis treści

Wprowadzenie	7
Rozdział 1. Podstawy teorii sterowania	9
1.1. Układ automatycznej regulacji	9
1.2. Dobór parametrów regulatorów o działaniu ciągłym	11
1.2.1. Kryterium modułowe	11
1.2.2. Kryteria całkowite	17
1.2.3. Kryterium symetryczne	19
1.3. Kaskadowa struktura regulacji	21
1.4. Układ próbkowany i układ dyskretny	24
1.5. Dyskretyzacja regulatorów o działaniu ciągłym	26
1.6. Właściwości dyskretnego systemu dynamicznego	30
1.6.1. Stabilność	31
1.6.2. Sterowalność i stabilizowalność	35
1.6.3. Obserwowalność i wykrywalność	40
1.6.4. Dualizm	41
1.6.5. Właściwości systemu ciągłego a systemu dyskretnego	42
1.6.6. Konwersja modeli matematycznych	43
1.7. Stałoprzecinkowa realizacja regulatorów	45
1.7.1. Liczby zmiennie- i stałoprzecinkowe	45
1.7.2. Cykl graniczny	46
1.7.3. Przykład obliczeniowo-symulacyjny	47
1.8. Statyczne sprzężenie zwrotne	51
1.8.1. Pierwiastki znormalizowanych wielomianów Bessela	51
1.8.2. Formuła Ackermanna	53
1.9. Problem liniowo-kwadratowy w dyskretnych systemach dynamicznych	58
1.9.1. Problem LQ ze skończonym horyzontem sterowania	59
1.9.2. Problem LQ z nieskończonym horyzontem sterowania	60
1.9.3. Dyskretyzacja ciągłego problemu LQ	61
1.10. Sterowanie obiektem przy ograniczeniach zmiennych stanu	64
1.11. Układy regulacji o wielu czasach próbkowania	69
1.12. Metoda programowania nieliniowego w doborze nastaw regulatorów	71
1.13. Regulacja adaptacyjna	72
1.13.1. Sterowanie adaptacyjne z modelem odniesienia	73

1.14. Sterowanie ślizgowe układami dynamicznymi	74
1.14.1. Podstawy sterowania ślizgowego	74
1.14.2. Metoda sterowania równoważnego	76
1.14.3. Nieliniowy korektor PD	80
1.14.4. Oscylacje podczas sterowania ślizgowego.	82
1.15. Obserwatory zmiennych stanu	84
1.15.1. Obserwatory pełnego rzędu	84
1.15.2. Obserwatory zredukowanego rzędu	88
1.15.3. Obserwatory zmiennych stanu o działaniu ciągłym	90
1.15.4. Obserwator zmiennych stanu z elementami całkującymi	91
1.15.5. Ślizgowy obserwator zmiennych stanu	92
1.15.6. Nieliniowy obserwator zmiennych stanu	92
Rozdział 2. Sterowanie napędami prądu stałego	94
2.1. Modele matematyczne napędu prądu stałego	94
2.1.1. Dyskretyzacja modelu matematycznego napędu prądu stałego	99
2.2. Kryteria doboru regulatorów ciągłych	102
2.2.1. Regulacja kaskadowa	102
2.2.2. Kryterium modułowe	104
2.2.3. Kryterium kształtu	105
2.2.4. Kryterium symetryczne	109
2.2.5. Proporcjonalny regulator prędkości	111
2.2.6. Rozruch obciążonego napędu prądu stałego	113
2.3. Dyskretyzacja regulatorów dla napędu prądu stałego	115
2.4. Minimalnoczasowy rozruch i hamowanie silnika	119
2.4.1. Obliczenia w jednostkach względnych	120
2.4.2. Struktura układu regulacji	124
2.4.3. Obliczenia w jednostkach naturalnych	127
2.5. Problem LQ	130
2.5.1. Optymalna stabilizacja prędkości obrotowej napędu prądu stałego	130
2.5.2. Nadrzędny regulator prędkości obrotowej	135
Rozdział 3. Sterowanie silnikami indukcyjnymi	143
3.1. Układy zasilania silników indukcyjnych	144
3.1.1. Falownik napięcia z przestrzennym wektorem PWM	145
3.1.2. Falownik napięcia z wymuszonym prądem	150
3.2. Model matematyczny silnika indukcyjnego klatkowego	151
3.2.1. Model matematyczny silnika zasilanego z falownika prądu	155
3.2.2. Model matematyczny silnika zasilanego z falownika napięcia	159
3.3. Pośrednie sterowanie polowo zorientowane – IFOC	161
3.3.1. Struktura układu sterowania	161
3.3.2. Optymalizacja parametryczna regulatora prędkości	162
3.3.3. Cyfrowa realizacja sterowania	165
3.4. Bezpośrednie sterowanie polowo zorientowane – DFOC	171
3.4.1. Struktura układu regulacji	171

3.4.2.	Optymalizacja parametryczna układu regulacji	173
3.5.	Bezpośrednie sterowanie momentem – DTC	175
3.5.1.	Struktura układu regulacji	175
3.5.2.	Wyznaczenie momentu elektrycznego i strumienia stojana	184
3.5.3.	Optymalizacja parametryczna układu regulacji	186
Rozdział 4.	Sterowanie synchronicznymi silnikami bezszczotkowymi	191
4.1.	Budowa silników bezszczotkowych	192
4.2.	Zasady sterowania silnikami	195
4.2.1.	Idealny moment elektryczny w silnikach BLDC	196
4.2.2.	Pulsacja momentu elektrycznego w silnikach BLDC	198
4.2.3.	Idealny moment elektryczny w silnikach PMSM	198
4.2.4.	Pulsacja momentu elektrycznego w silnikach PMSM	199
4.3.	Komutacja elektroniczna w silnikach z magnesem trwałym	201
4.4.	Sterowanie silnikami BLDC	204
4.4.1.	Komutacja elektroniczna przy użyciu czujników Halla	204
4.4.2.	Bezczujnikowe metody sterowania procesem komutacji	207
4.4.3.	Badanie przebiegów SEM w niezasilanym uzwojeniu	208
4.4.4.	Badanie zmian pochodnej prądu	211
4.4.5.	Struktura układu regulacji	213
4.4.6.	Model matematyczny	214
4.4.7.	Optymalizacja parametryczna	215
4.5.	Sterowanie PMSM	218
4.5.1.	Model matematyczny	218
4.5.2.	Sterowanie polowo zorientowane – IFOC	222
4.5.3.	Sterowanie polowo zorientowane – DFOC	225
4.5.4.	Bezpośrednie sterowanie momentem – DTC	227
Rozdział 5.	Bezczujnikowe układy napędowe	228
5.1.	Klasyfikacja systemów bezczujnikowych	228
5.2.	Obserwacja momentu obciążenia	230
5.2.1.	Dyskretyzacja obserwatora ciągłego	231
5.2.2.	Obserwator dyskretny	235
5.3.	Napędy prądu stałego	243
5.4.	Napędy z PMSM	244
5.5.	Napędy z silnikiem indukcyjnym	247
5.5.1.	Obserwator MRAS	247
5.5.2.	Obserwator liniowy niestacjonarny zredukowanego rzędu	249
Dodatek A.	Przykładowe parametry napędów prądu stałego	253
Dodatek B.	Przykładowe parametry silników indukcyjnych	255
Dodatek C.	Przykładowe parametry silników bezszczotkowych	256
Dodatek D.	Tablice transformat Laplace’a i $\mathcal{Z}$	257
Dodatek E.	Metody numeryczne – problem LQ	259
	Metoda równania różnicowego	259

Zdwojony algorytm rozwiązywania ARE	260
Metoda Newtona rozwiązania ARE	261
Metoda Schura rozwiązania ARE	263
Numeryczne wyznaczenie macierzy wag Q, M, R	265
Bibliografia	266
Skorowidz	270