

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 połowo zorientowane – IFOC | 222 |
| 4.5.3. | Sterowanie połowo 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{L} | 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 |