

# Spis treści

Symbole i oznaczenia . . . . .	7
Wstęp . . . . .	11
<b>Rozdział 1. Maszyny robocze – charakterystyki mechaniczne . . . . .</b>	<b>15</b>
1.1. Mechanizmy podnoszenia i opuszczania . . . . .	15
1.2. Wciągarki . . . . .	18
1.3. Transportery . . . . .	19
1.4. Zwijarki . . . . .	21
1.5. Pompy i wentylatory odśrodkowe . . . . .	21
1.6. Maszyny tłokowe . . . . .	22
<b>Rozdział 2. Połączenie silnika z maszyną roboczą . . . . .</b>	<b>24</b>
2.1. Połączenie sztywne, sprężyste i z luzem . . . . .	24
2.2. Przekładnia pasowa, zębata i korbowa . . . . .	25
2.3. Przekładnia magnetyczna . . . . .	28
<b>Rozdział 3. Równania ruchu układu napędowego . . . . .</b>	<b>32</b>
3.1. Dynamika układu jednomasowego . . . . .	32
3.2. Moment bezwładności – masa wirująca . . . . .	33
3.3. Stan równowagi układu napędowego . . . . .	36
3.4. Dynamika układu dwumasowego . . . . .	38
3.4.1. Połączenie sprężyste . . . . .	38
3.4.2. Luz sprzęgłowy lub przekładniowy . . . . .	41
3.4.3. Modelowanie układu dwumasowego . . . . .	42
<b>Rozdział 4. Moc i obciążalność silników elektrycznych . . . . .</b>	<b>46</b>
4.1. Czynniki ograniczające moc silnika . . . . .	46
4.2. Czynniki ograniczające obciążenie silnika . . . . .	48
4.2.1. Czynniki konstrukcyjno-mechaniczne . . . . .	48
4.2.2. Czynniki elektromagnetyczne . . . . .	49
4.2.3. Czynniki termiczne . . . . .	50
4.3. Obciążalność i dobór silnika . . . . .	53
4.3.1. Warunki pracy ciągłej . . . . .	54
4.3.2. Warunki pracy dorywczej . . . . .	55

4.3.3.	Warunki pracy przerywanej . . . . .	56
4.3.4.	Warunki pracy powtarzalnej. Ograniczenie liczby załączeń . . . . .	57
<b>Rozdział 5.</b>	<b>Wytwarzanie momentu elektromagnetycznego . . . . .</b>	<b>58</b>
5.1.	Zależności ogólne . . . . .	59
5.2.	Równanie momentów . . . . .	60
5.3.	Moment elektromagnetyczny silnika prądu stałego . . . . .	61
5.4.	Moment elektromagnetyczny silnika BLDC . . . . .	62
5.5.	Moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego klatkowego . . . . .	65
5.6.	Moment elektromagnetyczny silnika synchronicznego . . . . .	70
<b>Rozdział 6.</b>	<b>Modele matematyczne napędów elektrycznych . . . . .</b>	<b>73</b>
6.1.	Transformacje układu współrzędnych w maszynie trójfazowej . . . . .	74
6.1.1.	Transformacja Clarke'a . . . . .	74
6.1.2.	Transformacja Parka . . . . .	77
6.2.	Napęd z silnikiem obcowzbudnym . . . . .	78
6.3.	Napęd z silnikiem szeregowym . . . . .	83
6.4.	Napęd z silnikiem BLDC . . . . .	85
6.5.	Napęd z silnikiem indukcyjnym klatkowym . . . . .	91
6.5.1.	Metoda RFOC . . . . .	94
6.5.2.	Metoda NFO, SFOC, DTC-SVM . . . . .	98
6.6.	Napęd z synchronicznym silnikiem bezszczotkowym – PMSM . . . . .	106
6.7.	Napęd z silnikiem synchronicznym . . . . .	110
6.8.	Schematy zastępcze silników elektrycznych . . . . .	116
6.8.1.	Silnik obcowzbudny . . . . .	116
6.8.2.	Silnik indukcyjny . . . . .	116
6.8.3.	PMSM z magnesami powierzchniowymi . . . . .	121
6.8.4.	PMSM z magnesami zagłębionymi . . . . .	123
6.8.5.	Silnik synchroniczny z wirnikiem cylindrycznym . . . . .	125
6.8.6.	Silnik synchroniczny z wirnikiem jawnobiegunowym . . . . .	126
<b>Rozdział 7.</b>	<b>Układy zasilania silników . . . . .</b>	<b>129</b>
7.1.	Tyristorowy mostek jednofazowy . . . . .	129
7.2.	Tyristorowy przekształtnik trójfazowy . . . . .	132
7.3.	Przezienniki częstotliwości pośrednie . . . . .	140
7.3.1.	Przeziennik częstotliwości z falownikiem prądu . . . . .	141
7.3.2.	Przeziennik częstotliwości z falownikiem napięcia . . . . .	143
7.3.3.	Falownik napięcia z wymuszonym prądem . . . . .	144
7.4.	Przezienniki częstotliwości bezpośrednie – cyklokonwertery . . . . .	145
7.5.	Układ łagodnego rozruchu – softstart . . . . .	146
7.6.	Sterowanie z modulacją wektora przestrzennego (SVM) . . . . .	147
<b>Rozdział 8.</b>	<b>Układy pomiarowe w napędzie elektrycznym . . . . .</b>	<b>151</b>
8.1.	Kodowanie liczb w układach kontrolno-pomiarowych . . . . .	151

---

8.2. Enkoder inkrementalny . . . . .	151
8.3. Czujniki Halla . . . . .	157
8.3.1. Komutacja w silnikach BLDC z wykorzystaniem czujników Halla . . . . .	159
8.4. Resolver . . . . .	162
8.5. Hallotronowy przekładnik prądowy . . . . .	163
8.6. Hallotronowy przekładnik napięciowy . . . . .	168
<b>Rozdział 9. Otwarte układy sterowania dla napędów elektrycznych . . . . .</b>	<b>170</b>
9.1. Silnik obcowzbudny . . . . .	170
9.1.1. Regulacja napięcia zasilania twornika . . . . .	172
9.1.2. Regulacja napięcia wzbudzenia – osłabienie pola . . . . .	173
9.2. Silnik indukcyjny . . . . .	174
9.2.1. Podstawowe zależności . . . . .	174
9.2.2. Regulacja przez zmianę poślizgu $s$ . . . . .	177
9.2.3. Regulacja przez zmianę liczby par biegunów . . . . .	178
9.2.4. Regulacja przez zmianę częstotliwości . . . . .	179
9.2.5. Regulacja przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika . . . . .	182
9.2.6. Kaskada asynchroniczna . . . . .	184
9.3. Silnik synchroniczny . . . . .	191
9.3.1. Moment elektromagnetyczny . . . . .	192
9.3.2. Charakterystyki statyczne . . . . .	194
9.3.3. Sterowanie przez zmianę częstotliwości . . . . .	198
9.3.4. Silnik przekształtnikowy . . . . .	199
<b>Rozdział 10. Wielostrefowa regulacja prędkości kątovej . . . . .</b>	<b>203</b>
10.1. Zasady ogólne . . . . .	204
10.2. Silnik obcowzbudny . . . . .	206
10.3. Silnik indukcyjny . . . . .	207
10.4. Silnik PMSM . . . . .	210
<b>Rozdział 11. Regulacja kaskadowa napędami elektrycznymi . . . . .</b>	<b>213</b>
11.1. Kaskadowa struktura regulacji . . . . .	213
11.2. Przekształtnikowy napęd prądu stałego . . . . .	215
11.2.1. Napęd nienawrotny . . . . .	215
11.2.2. Napęd nawrotny . . . . .	216
11.2.3. Dobór elementów napędu . . . . .	220
11.2.4. Dobór regulatorów dla napędu . . . . .	221
11.3. Bezpośrednie sterowanie momentem – DTC . . . . .	234
11.3.1. Zasada sterowania . . . . .	234
11.3.2. Sterowanie falownikiem napięcia . . . . .	236
11.3.3. Struktura układu regulacji . . . . .	237
11.3.4. Optymalizacja parametryczna układu regulacji . . . . .	242
11.4. Sterowanie DTC-SVM silnikiem indukcyjnym . . . . .	248
11.5. Sterowanie RFOC silnikiem indukcyjnym . . . . .	253

11.6. Napęd z silnikiem BLDC . . . . .	258
11.7. Sterowanie RFOC silnikiem PMSM . . . . .	259
<b>Rozdział 12. Wybór ekonomicznie najlepszego rozwiązania technicznego . .</b>	<b>265</b>
12.1. Rachunek ekonomicznej efektywności inwestycji . . . . .	265
12.2. Zastosowanie wskaźnika $F_{EP}$ do maksymalizacji zysku . . . . .	270
12.3. Dobór silnika synchronicznego . . . . .	270
<b>Dodatek A. Algebra wektorów . . . . .</b>	<b>273</b>
<b>Dodatek B. Transformaty Laplace'a i <math>\mathcal{Z}</math> . . . . .</b>	<b>274</b>
B.1. Przekształcenie Laplace'a . . . . .	274
B.2. Przekształcenie $\mathcal{Z}$ . . . . .	275
<b>Dodatek C. Liniowe układy automatycznej regulacji . . . . .</b>	<b>277</b>
C.1. Dobór parametrów regulatorów o działaniu ciągłym . . . . .	281
C.1.1. Kryterium modułowe . . . . .	281
C.1.2. Kryteria całkowite . . . . .	286
C.1.3. Kryterium symetryczne . . . . .	289
<b>Dodatek D. Szacowanie parametrów silników . . . . .</b>	<b>291</b>
D.1. Silnik obcowzbudny . . . . .	291
D.2. Silnik indukcyjny . . . . .	292
<b>Bibliografia . . . . .</b>	<b>293</b>
<b>Skorowidz . . . . .</b>	<b>299</b>