

---

<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń</b> .....	<b>9</b>
<b>Przedmowa</b> .....	<b>12</b>
<b>1. Podstawowe informacje o napędzie z silnikami bezszczotkowymi</b> .....	<b>13</b>
1.1. Zasada działania i klasyfikacja silników bezszczotkowych .....	14
1.2. Moment elektromagnetyczny i siła elektromotoryczna bezszczotkowego silnika prądu stałego wzbudzanego magnesami trwałymi .....	16
1.3. Układy połączeń uzwojeń stojana silników bezszczotkowych.....	21
1.4. Porównanie bezszczotkowych silników prądu stałego i prądu przemiennego ...	21
<b>2. Idealny bezszczotkowy silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi</b> .....	<b>25</b>
2.1. Silnik idealny – założenia upraszczające .....	26
2.2. Silnik PM BLDC o trzech uzwojeniach fazowych z komutatorem w układzie mostka .....	26
2.2.1. Współpraca komutatora elektronicznego z silnikiem.....	26
2.2.2. Charakterystyka mechaniczna silnika idealnego.....	34
2.2.3. Podstawowe zależności mechaniczne .....	38
2.3. Silnik PM BLDC z komutatorem w układzie półmostka .....	39
2.3.1. Podstawowa struktura połączeń silnika PM BLDC z komutatorem o strukturze półmostka.....	39
2.3.2. Zastosowanie układów odcciążających.....	42
2.3.3. Charakterystyka mechaniczna i model stałoprądowy idealnego silnika PM BLDC z komutatorem o topologii półmostka .....	43
2.3.4. Porównanie najważniejszych właściwości silnika z komutatorem o strukturze mostka i półmostka.....	44
<b>3. Komutator elektroniczny</b> .....	<b>47</b>
3.1. Idealny komutator elektroniczny.....	48
3.1.1. Właściwości i sterowanie komutatorem elektronicznym .....	48
3.1.2. Strategie sterowania zaworami komutatora elektronicznego pracującego w układzie mostka.....	51
3.1.3. Wpływ strategii sterowania na prądy i napięcia komutatora elektronicznego.....	53
3.2. Współpraca komutatora elektronicznego z silnikiem PM BLDC .....	56
3.2.1. Wprowadzenie .....	56
3.2.2. Przelączanie uzwojeń fazowych w silniku rzeczywistym.....	56
3.2.3. Wyznaczanie wartości komutacyjnego spadku napięcia w silniku PM BLDC metodą analogiczną do stosowanej w prostownikach .....	59
3.2.4. Wyznaczanie czasu i kąta komutacji .....	62

3.2.5.	Komutacyjne tętnienia prądu obwodu zastępczego prądu stałego.....	63
3.2.6.	Wpływ modulacji na tętnienia prądu.....	64
3.3.	Właściwości rzeczywistego komutatora elektronicznego .....	66
3.3.1.	Zawory komutatora elektronicznego .....	66
3.3.2.	Straty w komutatorze elektronicznym.....	68
3.3.3.	Sprawność komutatora elektronicznego .....	69
3.3.4.	Sterowanie i wyzwalanie zaworów komutatora elektronicznego .....	72
<b>4.</b>	<b>Analiza pracy rzeczywistego silnika PM BLDC.....</b>	<b>73</b>
4.1.	Wybór metody analizy .....	74
4.2.	Zjawiska występujące w rzeczywistym silniku.....	75
4.2.1.	Wprowadzenie .....	75
4.2.2.	Opis silnika.....	78
4.2.3.	Siła elektromotoryczna i współczynnik wzbudzenia rzeczywistego silnika PM BLDC.....	80
4.2.4.	Wpływ obwodu magnetycznego na moment elektromagnetyczny, siłę elektromotoryczną i moment zaczepowy w silnikach wysokobrotowych .....	82
4.2.5.	Wpływ nieidealnej siły elektromotorycznej na właściwości silnika .....	86
4.2.6.	Wpływ przepływu stojana i harmonicznych żłobkowych na siłę elektromotoryczną .....	91
4.2.7.	Reluktancyjny moment zaczepowy .....	93
4.2.8.	Wpływ przełączania uzwojeń fazowych na prędkość i moment elektromagnetyczny silnika .....	94
4.2.9.	Wpływ tętnień prądu na prędkość i moment elektromagnetyczny silnika .....	96
4.3.	Straty w silnikach PM BLDC.....	97
4.3.1.	Podział strat .....	97
4.3.2.	Straty w uzwojeniach.....	98
4.3.3.	Straty mocy w obwodzie magnetycznym .....	99
4.3.4.	Straty mechaniczne .....	102
4.3.5.	Straty dodatkowe .....	103
4.3.6.	Łączne straty w silniku PM BLDC.....	104
4.4.	Straty i sprawność układu silnik PM BLDC – komutator elektroniczny.....	106
4.5.	Określanie położenia wirnika.....	107
4.5.1.	Metody określania położenia wirnika.....	107
4.5.2.	Ciągły pomiar kąta obrotu wirnika .....	107
4.5.3.	Metody wyznaczania kąta obrotu z rozdzielczością odpowiadającą liczbie przełączeń przypadających na jeden obrót silnika .....	108
4.5.4.	Metody pośredniego określania położenia wirnika .....	109
4.5.5.	Podsumowanie .....	115

<b>5. Modele matematyczne silników PM BLDC i układów napędowych z tymi silnikami</b> .....	<b>117</b>
5.1. Wprowadzenie.....	118
5.2. Stałoprądowe modele silnika PM BLDC.....	120
5.2.1. Wprowadzenie.....	120
5.2.2. Stałoprądowy model idealnego silnika PM BLDC.....	121
5.2.3. Wpływ rzeczywistych warunków pracy silnika PM BLDC.....	124
5.2.4. Macierzowo-wektorowy opis stałoprądowego modelu silnika PM BLDC.....	126
5.3. Zmiennoprądowe modele matematyczne silników PM BLDC.....	127
5.3.1. Ogólny opis silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi.....	127
5.3.2. Idealny silnik PM BLDC jako szczególny przypadek silnika synchronicznego.....	133
5.3.3. Model matematyczny silnika idealnego o trapezoidalnej SEM.....	136
5.3.4. Modelowanie nieidealnej siły elektromotorycznej.....	140
5.4. Zmiennoprądowy model obwodowy idealnego silnika bezszczotkowego prądu stałego wzbudzanego magnetoelektrycznie.....	141
5.4.1. Wprowadzenie.....	141
5.4.2. Stosowanie założeń upraszczających.....	143
5.4.3. Modelowanie obwodów głównych.....	143
5.5. Zmiennoprądowe modele obwodowe rzeczywistych silników bezszczotkowych prądu stałego wzbudzanych magnetoelektrycznie.....	146
5.5.1. Zjawiska występujące w rzeczywistym silniku PM BLDC.....	146
5.5.2. Modelowanie podzespołów i zjawisk występujących w rzeczywistym silniku PM BLDC.....	146
5.5.3. Modelowanie strat przez wprowadzenie dodatkowych elementów w obwodzie głównym.....	150
5.5.4. Modelowanie strat zależnych od mocy i prędkości jako moment strat.....	152
5.5.5. Modele silnika PM BLDC o różnym stopniu uproszczenia.....	153
<b>6. Sterowanie i regulacja</b> .....	<b>157</b>
6.1. Wprowadzenie.....	158
6.2. Sterowanie napięciem zasilającym silnik PM BLDC.....	160
6.2.1. Wybór źródła zasilania i sposobu sterowania napięciem.....	160
6.2.2. Układ z zewnętrznym obwodem regulacji napięcia silnika.....	161
6.2.3. Regulacja napięcia przez modulację w komutatorze elektronicznym silnika.....	162
6.2.4. Współpraca układów sterowania i wyzwiania tranzystorów.....	162
6.2.5. Zwiększanie wartości napięcia zasilającego.....	163
6.3. Regulacja prądu i momentu elektromagnetycznego.....	164
6.3.1. Sterowanie prądem w przypadku regulatora proporcjonalno-całkującego.....	164
6.3.2. Układy regulacji ze śledzeniem prądu.....	165
6.3.3. Ograniczenie prądu.....	169

6.4.	Sterowanie i regulacja prędkości silnika bezszczotkowego z komutatorem elektronicznym.....	170
6.4.1.	Sposoby pomiaru prędkości w silnikach bezszczotkowych.....	170
6.4.2.	Sterowanie prędkością w przypadku regulatora proporcjonalno-całkującego .....	172
6.4.3.	Śledzenie prędkości i/lub kąta obrotu.....	172
6.4.4.	Wstępne zadawanie prędkości kątowej.....	173
6.4.5.	Bezczujnikowe i cyfrowe układy pomiaru, sterowania i regulacji prędkości kątowej.....	174
6.5.	Sterowanie dwustrefowe napędem z silnikiem PM BLDC.....	175
6.5.1.	Wprowadzenie .....	175
6.5.2.	Zwiększanie napięcia zasilania. Układ z regulatorem podwyższającym.....	176
6.5.3.	Zwiększanie strumienia rozproszenia.....	177
6.5.4.	Przełączanie uzwojeń stojana.....	177
6.5.5.	Układ o zmiennej strukturze komutatora elektronicznego.....	179
6.5.5.1.	Zasada działania.....	179
6.5.5.2.	Praca silnika w przypadku komutatora o strukturze mostka lub półmostka.....	181
6.5.5.3.	Hamowanie ze zwrotem energii silnika w przypadku pracy komutatora w strukturze półmostka.....	182
6.5.5.4.	Określenie momentu hamującego.....	187
6.5.5.5.	Podsumowanie .....	188
6.6.	Sterowanie wysokoobrotowych silników PM BLDC.....	188
6.6.1.	Wymagania stawiane układom sterowania i pomiarów .....	188
6.6.2.	Tor zasilania i regulacji napięcia .....	189
6.6.3.	Ogólna struktura układu sterowania .....	190
6.6.4.	Sterowanie bezczujnikowe .....	191
<b>7.</b>	<b>Bezczujnikowe sterowanie silnika PM BLDC.....</b>	<b>193</b>
7.1.	Techniki sterowania bezczujnikowego silnika PM BLDC.....	194
7.2.	Bezczujnikowe metody sterowania, wykorzystujące wielkości mierzone i ich przetwarzanie .....	194
7.3.	Struktury sterowania bezczujnikowego wykorzystujące siłę elektromotoryczną .....	195
7.3.1.	Podział metod wykorzystujących siłę elektromotoryczną.....	195
7.3.2.	Określenie potencjału punktu środkowego silnika .....	196
7.3.3.	Metody wykorzystujące napięcia na zaciskach silnika.....	197
7.3.4.	Metody wykorzystujące trzecią harmoniczną siły elektromotorycznej.....	198
7.3.5.	Metody wykorzystujące diodę zerową.....	199
7.3.6.	Całkowanie siły elektromotorycznej .....	199
7.4.	Rozruch i określanie położenia wirnika .....	199
7.4.1.	Wprowadzenie .....	199
7.4.2.	Rozruch w układzie pętli otwartej.....	200

---

7.4.3.	Metody rozruchu wykorzystujące znajomość położenia początkowego .....	200
7.4.4.	Przepytujące techniki rozruchu.....	204
7.4.4.1.	Wprowadzenie .....	204
7.4.4.2.	Określanie położenia wirnika na podstawie pomiaru szpilek prądu.....	204
7.4.4.3.	Określanie położenia wirnika na podstawie pomiaru napięcia .....	209
7.4.5.	Sposoby sterowania układem podczas rozruchu .....	209
7.5.	Nowoczesne metody sterowania (sterowanie rozmyte, sieci neuronowe itp.) ..	210
7.5.1.	Możliwości stosowania metod sztucznej inteligencji.....	210
7.5.2.	Sterowanie rozmyte .....	210
7.5.2.1.	Ogólne zasady sterowania rozmytego.....	210
7.5.2.2.	Rozmyty predykcyjny regulator PI dla napędu z silnikiem PM BLDC .....	211
7.5.2.3.	Poprawa sterowania bezczujnikowego silnika PM BLDC przez zastosowanie logiki rozmytej w estymatorze siły elektromotorycznej .....	214
7.5.2.4.	Sterownik rozmyty w napędzie bezczujnikowym .....	217
7.5.3.	Metody wykorzystujące obserwatory .....	219
7.5.4.	Zastosowanie sieci neuronowych.....	220
7.6.	Inne techniki sterowania bezczujnikowego .....	221
7.7.	Sterowanie cyfrowe silników PM BLDC .....	222
7.7.1.	Wprowadzenie .....	222
7.7.2.	Podzespoły cyfrowe występujące w cyfrowych i hybrydowych układach sterowania silników PM BLDC .....	224
7.7.3.	Podstawowa struktura sterowania cyfrowego silnika PM BLDC, wykorzystująca procesor sygnałowy .....	224
7.7.4.	Sterowanie bezczujnikowe silnika PM BLDC przy użyciu funkcji większości do filtrowania SEM.....	225
7.8.	Sterowniki bezczujnikowe.....	227
<b>8.</b>	<b>Modelowanie komputerowe silnika i napędu elektrycznego .....</b>	<b>231</b>
8.1.	Wybór programu komputerowego do modelowania i symulacji napędów z silnikami bezzszczotkowymi.....	232
8.2.	Modele komputerowe własne i biblioteczne .....	234
8.2.1.	Wprowadzenie .....	234
8.2.2.	Stałoprądowe obwodowe i funkcjonalne modele silnika PM BLDC.....	234
8.2.3.	Zwiększenie dokładności modeli obwodowych.....	236
8.3.	Model biblioteczny silnika PM BLDC z komutatorem elektronicznym w programie Matlab/Simulink .....	236
8.3.1.	Ogólny opis modelu silnika.....	236
8.3.2.	Analiza podzespołów modelu silnika oraz wybór wielkości wyjściowych .....	239
8.3.3.	Model silnika z komutatorem elektronicznym i regulatorem prędkości.....	241
8.3.4.	Regulacja prądu i prędkości .....	243
8.3.5.	Zwiększanie dokładności modelu bibliotecznego silnika.....	244

---

8.4.	Model biblioteczny napędu z silnikiem PM BLDC w programie Matlab/Simulink .....	245
8.4.1.	Opis modelu .....	245
8.4.2.	Ważniejsze bloki w modelu napędu z silnikiem PM BLDC .....	247
8.4.3.	Modelowanie układów sterowania i obciążenia .....	248
8.4.4.	Możliwości aplikacji .....	248
8.5.	Modele komputerowe własne silnika PM BLDC .....	249
8.5.1.	Wykorzystanie podzespołów bibliotecznych do budowy własnych modeli .....	249
8.5.2.	Model o nietrapezowej sile elektromotorycznej .....	251
8.6.	Podsumowanie .....	254
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>256</b>