
Wykaz ważniejszych oznaczeń	9
Przedmowa	12
1. Podstawowe informacje o napędzie z silnikami bezszczotkowymi	13
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
2. Idealny bezszczotkowy silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi	25
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 odciążających.....	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
3. Komutator elektroniczny	47
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
4.	Analiza pracy rzeczywistego silnika PM BLDC.....	73
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

5. Modele matematyczne silników PM BLDC i układów napędowych z tymi silnikami	117
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 wzbudanych 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
6. Sterowanie i regulacja	157
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
7.	Bezczujnikowe sterowanie silnika PM BLDC.....	193
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
8.	Modelowanie komputerowe silnika i napędu elektrycznego	231
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.	Staoprądowe 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
	Bibliografia	256