



Bezszczotkowe silniki prądu stałego – konstrukcje i sterowanie

prof. dr hab. inż. Zbigniew Goryca,
Politechnika Radomska, e-mail: Z.Goryca@pr.radom.pl

BLDC motors – construction and control

Abstract: The paper presents basic constructions of BLDC motors and their main advantages in comparison with other motors. Their efficiency is higher about 10% than the efficiency of others in the group of motors powered up to 5kW. These motors are highly durable and reliable and are characterized by noiseless work. The structure of simple and cheap controlling device allowing for the change of rotational speed, the direction of rotation, braking and limitation of the current has been presented. The controlling circuit exploits information coming from hall and optic sensors to determine the position of the rotor. The manner of the placement of sensors and the influence of their position on the work of the whole system has been described at the end of this paper.

Streszczenie: W artykule pokazano podstawowe konstrukcje bezszczotkowych silników prądu stałego i określono ich główne zalety w porównaniu z innymi silnikami. W grupie silników o mocy do 5 kW silniki te mają sprawność wyższą o około 10% niż wszystkie inne silniki i jest to główny argument do ich stosowania. Ponadto silniki te mają dużą trwałość, pracują cicho i są niezawodne. Pokazano strukturę prostego i taniego układu sterowania zapewniającego regulację prędkości obrotowej, zmianę kierunku wirowania, hamowanie i ograniczanie wartości prądu na określonym poziomie. Układ sterowania realizujący te zadania wykorzystuje informację o położeniu wirnika pochodzącą z czujników hallotronowych lub optycznych. Sposoby umieszczania takich czujników i wpływ miejsca ich umieszczenia na pracę napędu omówiono w końcowej części pracy.

Keywords: BLDC motor, construction, control

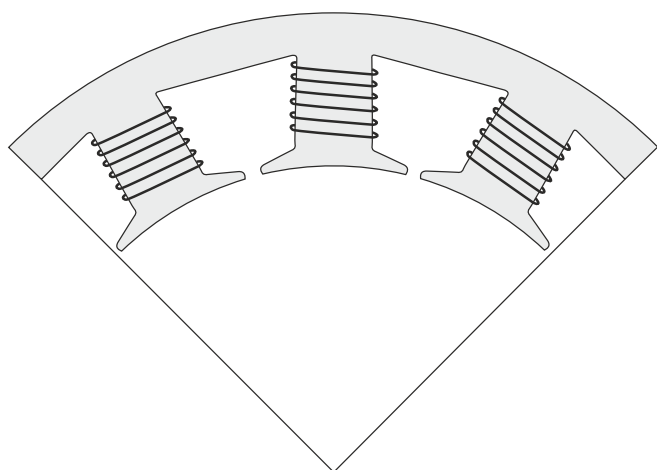
Słowa kluczowe: bezszczotkowy silnik prądu stałego, konstrukcja, sterowanie

1. WSTĘP

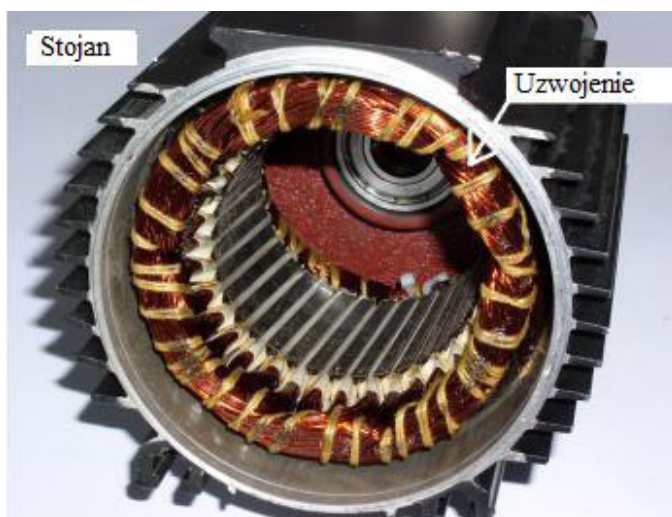
Układy napędowe z bezszczotkowymi silnikami prądu stałego znajdują coraz szersze zastosowanie głównie ze względu na swoje liczne zalety [1], [3], [7]. Przy pracy ciągłej silnika ważnym argumentem ich użycia jest wysoka sprawność. W układach przenośnych argumentem tym jest mała masa i gabaryty silnika. Do tych zalet dochodzi duża trwałość i cicha praca układu napędowego. Prosta konstrukcja układu sterowania do bezszczotkowego silnika prądu stałego [3], [4], [5], [6] przyczynia się w znacznym stopniu do zmniejszenia ceny układu napędowego i z powodzeniem może on cenowo konkurować z układami napędowymi wyposażonymi w silniki asynchroniczne, nad którymi góruje pod względem sprawności i dynamiki. Dodatkowo w wirnikach tych silników prawie nie ma strat, gdyż wykonane są one na ogół z wysokorezystancyjnych magnesów spiekanych lub wiązanych [1], [7]. Większość strat występuje w stojanie, który łatwo schłodzić. Zatem uzwojenia stojana mogą być obciążone większą gęstością prądu, co wpływa na minimalizację wymiarów maszyny. Silniki te nie mają kłopotliwego i wymagającego konserwacji komutatora, pracują cicho, a ich trwałość zależy praktycznie od trwałości zastosowanych łożysk. Główną barierą w stosowaniu napędów z tego typu silnikami jest wysoki koszt związany z ceną magnesów trwałych oraz z ceną elektronicznego układu sterującego pracą silnika [4].

2. KONSTRUKCJE SILNIKÓW

Bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi dzielą się na silniki prądu stałego – BLDC i silniki prądu przemiennego (synchroniczne) BLSM. Miarą tego dość dyskusyjnego podziału jest kształt napięcia rotacji uzależniony od geometrii obwodu magnetycznego silnika i rodzaju uzwojenia [3], [7]. Przyjmuje się, że w silnikach BLDC kształt ten jest trapezoidalny, zaś w silnikach BLSM sinusoidalny. Stojan silnika BLDC może mieć uzwojenia skupione z jawnymi biegunami (–rys. 1) lub rozłożone z biegunami utajonymi – (rys. 2).



Rys. 1. Uzwojenie skupione w stojanie silnika bezszczotkowego –
Fig.1. Brushless motor stator – concentrated winding



Rys. 2. Uzwojony stojan silnika bezszczotkowego – uzwojenie rozłożone
Fig.2. Brushless motor stator – distributed winding

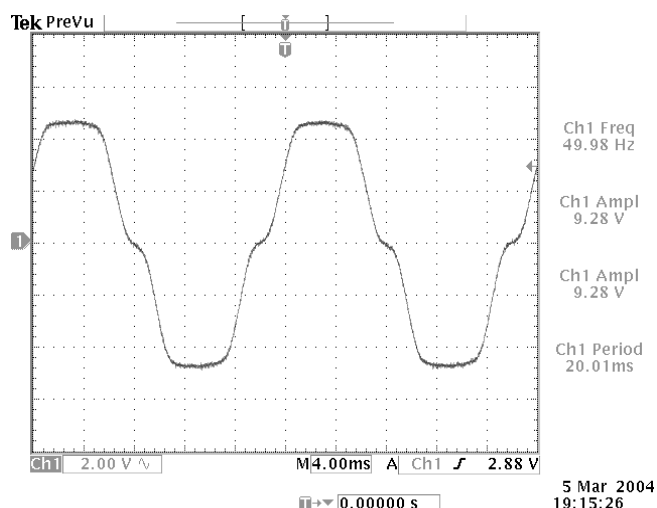
Na wirnikach silników BLDC umieszczone są magnesy trwałe o przemiennej biegunowości i jednakowej wysokości gwarantującej w przybliżeniu stałą wartość indukcji w szczeliny maszyny w zakresie rozpiętości kątowej magnesu (–rys. 3 i 4).



Rys. 3. Kompletny wirnik silnika
Fig. 3. The complete rotor



Rys. 4. Wirnik silnika BLDC
Fig. 4. Rotor of BLDC motor



Takie ukształtowanie magnesów przy szczeliny o stałej wielkości zapewnia trapezoidalny kształt napięcia rotacji w uzwojeniu silnika (rys. 5).

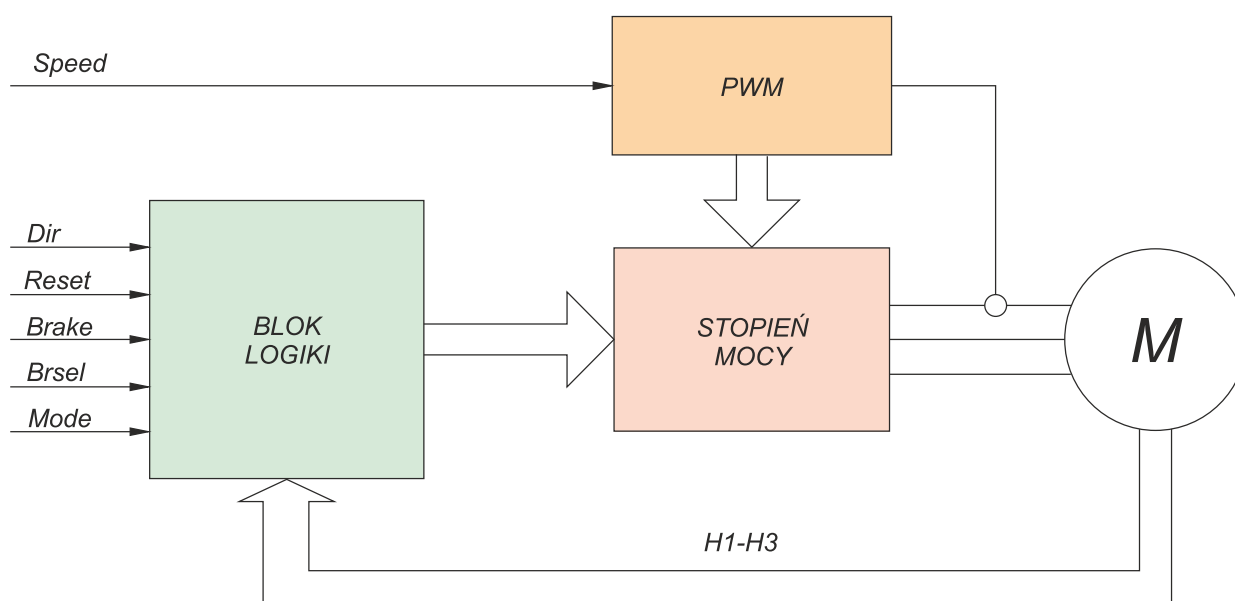
Rys. 5. Zależność napięcia fazowego od czasu – pomiar

Fig. 5. Phase voltage dependence of on time - measurement

3. STEROWANIE SILNIKA BLDC Z UŻYCIEM CZUJNIKÓW

Struktury układów sterowania, w których występują czujniki położenia wirnika względem stojana, powszechnie nazywa się klasycznymi. Najczęściej do określania położenia wirnika używane są czujniki Halla wykrywające konkretny poziom indukcji magnetycznej w pobliżu czujnika [9]. Rysunek 6 przedstawia klasyczną strukturę układu sterowania.

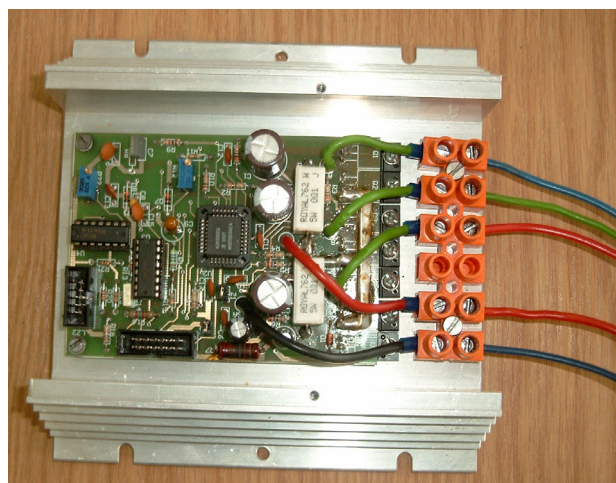
Analogowe wejście „speed” służy do zadawania żądanej prędkości silnika. W modulatorze PWM napięcie z tego wejścia porównywane jest z przebiegiem piłokształtnym i w wyniku tego porównania opracowywany jest sygnał wyjściowy modulatora dostarczany do stopnia mocy układu. Szerokość sygnału PWM i jego częstotliwość decyduje o prędkości obrotowej silnika i częstotliwości łączeń tranzystorów T1-T6. Do drugiego wejścia modulatora podłączony jest sygnał informujący o poziomie prądu w uzwojeniu silnika. W przypadku przekroczenia nastawionej wartości prądu modulator PWM zwięża impulsy wyjściowe i stabilizuje prąd w silniku. Wejście „dir” służy do zmiany kierunku wirowania silnika, zaś „reset” – do zerowania układu logiki i wyłączenia silnika. Wejście „brake” służy do hamowania.



Rys. 6. Struktura układu sterowania silnika BLDC

Fig. 6. The structure of the BLDC motor control

Przy aktywnym wejściu „brake” tranzystory zawarte w stopniu mocy znajdują się w stanie przewodzenia i wówczas uzwojenia silnika zostają zwarte. Zwarcie uzwojeń przy ruchu silnika powoduje duże prądy wywołane napięciami rotacji i szybkie hamowanie silnika. Wejście „brsel” określa zachowanie się napędu po zaniku napięcia zasilającego.

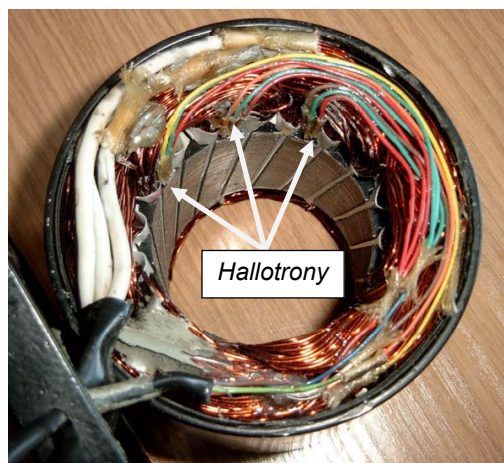


W zależności od stanu tego wejścia silnik może po zaniku zasilania zatrzymać się w sposób naturalny – z wybiegiem lub może być hamowany przez zwarcie uzwojeń. W zależności od stanu wejścia „mode” zanik prądu w wyłączanej części uzwojenia może odbywać się przez źródło zasilania lub w obwodzie zawierającym oprócz uzwojenia dwa dolne tranzystory stopnia mocy. Rysunek 7 przedstawia taki układ sterowania silnika niewielkiej mocy.

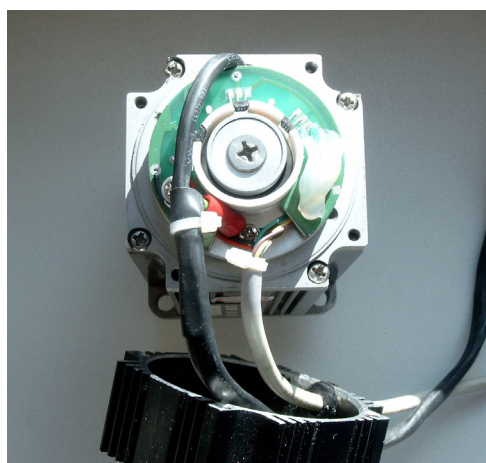
Rys. 7. Układ sterowania silnika bezszczotkowego 24 V, 30 A

Fig. 7. Brushless motor controller 24 V, 30 A

W układzie kontroli położenia wirnika najczęściej stosowane są czujniki Halla. W zależności od konstruktora silnika czujniki Halla umieszczane są wewnątrz (rys. 8) lub na zewnątrz (rys. 9) silnika.

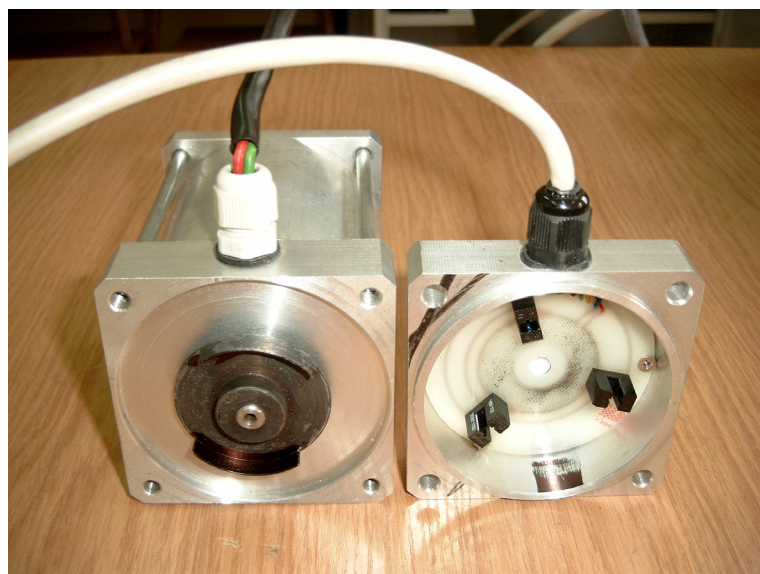


Rys. 8. Widok silnika z czujnikami Halla wewnątrz silnika
Fig. 8. Inside view of stator with Hall sensors.



Rys. 9. Widok silnika z czujnikami Halla na zewnątrz silnika
Fig. 9. View of Hall sensors outside the motor

Pierwsze z tych rozwiązań (rys. 8) jest bardzo proste, nie wymaga ustawiania położenia czujników ani dodatkowego wielobiegunowego magnesu. Jednak w tym przypadku czujniki narażone są na uszkodzenie wysoką temperaturą pochodzącą od czoł uzwojeń i na zakłócenia pochodzące od pola magnetycznego uzwojenia przy dużych prądach silnika. Znacznie lepszym rozwiązaniem jest umieszczenie czujników położenia w dodatkowej obudowie znajdującej się na zewnątrz silnika (rys. 9).



Nowym i coraz częściej stosowanym rozwiązaniem są czujniki optyczne umieszczone w ruchomej, dodatkowej pokrywie silnika (rys. 10) [6]. Rozwiązanie to jest niewrażliwe na zakłócenia od pola magnetycznego i dodatkowo umożliwia regulację położenia czujników w trakcie pracy silnika. Ponadto czujniki optyczne nie są narażone na rozmagnesowanie i precyzyjnie określają położenie wirnika niezależnie od okresu eksploatacji silnika.

Rys. 10. Widok optycznych czujników położenia wirnika
Fig. 10. View of optical sensor of rotor position

W prostych napędach z silnikami BLDC nie stosuje się prędkościowego sprzężenia zwrotnego, a zmiana prędkości realizowana jest przez zmianę szerokości impulsów PWM (zmiana napięcia zasilania). W napędach tych nie stosuje się także regulacji, a jedynie ograniczenie maksymalnej wartości prądu podyktowane potrzebą ochrony tranzystorów trójfazowego mostka. Przy wyższych wymaganiach stawianych napędowi można wprowadzać sprzężenia prędkościowe do określenia prędkości z sygnałów czujników położenia.

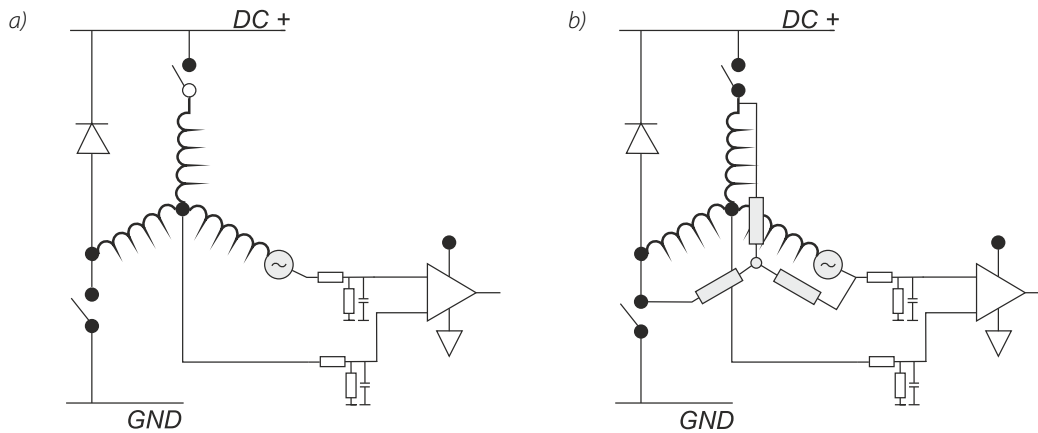
4. STEROWANIE BEZCZUJNIKOWE

Stosowanie czujników w silnikach BLDC powoduje zwiększenie liczby połączeń silnika z komutatorem i zmniejsza niezawodność układu napędowego [16]. Dlatego też ostatnio często rezygnuje się z bezpośredniego pomiaru położenia i prędkości i wielkości te wyznacza się na podstawie pomiarów prądów i napięć. Bezcujnikowe metody sterowania można podzielić na kilka grup:

1. Wykorzystujące siłę elektromotoryczną
2. Wykorzystujące pomiary prądów i napięć oraz równania opisujące maszynę

3. Wykorzystujące sterowanie rozmyte i sieci neuronowe

W metodach wykorzystujących SEM pomiaru tej siły, a właściwie określenia chwili przejścia przez zero dokonuje się w aktualnie niezasilanej fazie uzwojenia – rys. 11. W przypadku, gdy nie ma wyprowadzonego punktu neutralnego można wykorzystać potencjał sztucznie wykonanego punktu neutralnego [9], [12], [13].



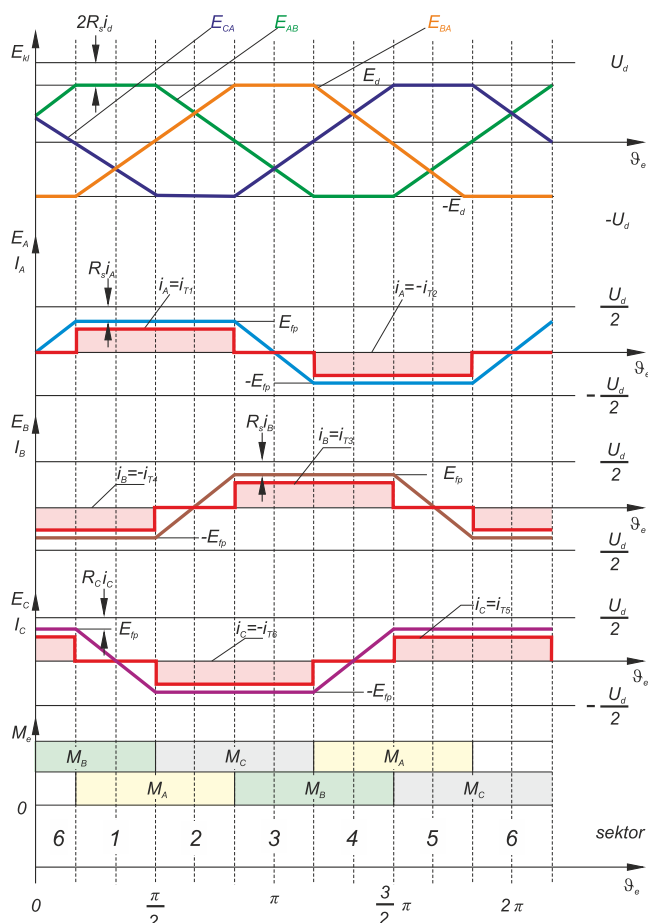
Rys.11. Układ detekcji SEM: (a) z dostępem do punktu neutralnego, (b) z wykorzystaniem sztucznego punktu neutralnego

Fig. 11. BEMF detection circuit: (a) with access to neutral point, (b) without access to neutral point

Rysunek nr 12 przedstawia idealizowane przebiegi napięć, prądów i sygnałów pochodzących z czujników Halla występujące w napędzie

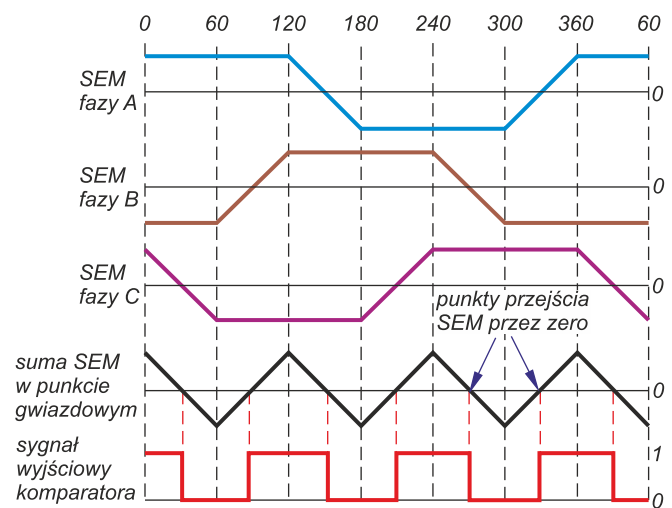
Z rysunku tego wynika że:

- chwila załączenia fazy A następuje gdy międzyfazowa SEM EAC przechodzi przez zero i chwila ta jest opóźniona o 30o względem przejścia przez zero fazowej SEM
- w pozostałych fazach występuje podobna zależność
- trapezowa SEM zawiera trzecią harmoniczną i harmoniczna ta występuje w punkcie neutralnym – rys. 13.



Rys.12. Idealizowane przebiegi napięć, prądów i sygnałów z czujników Halla

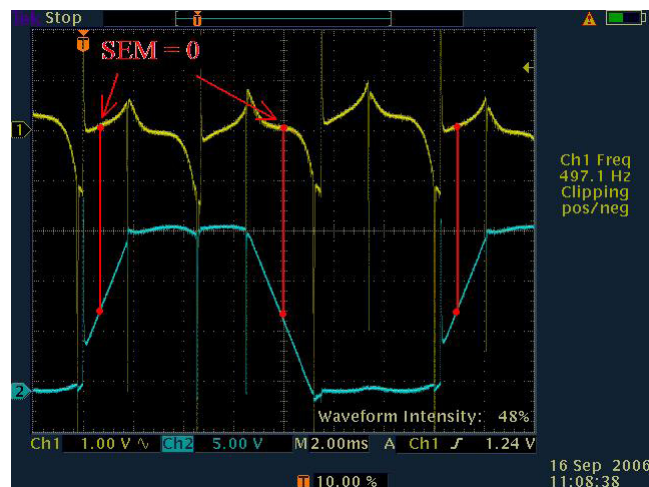
Fig.12. Ideal voltage and current waveforms from Hall sensors



Rys. 13. Idealizowane przebiegi fazowych SEM i ich suma w punkcie gwiazdowym (neutralnym)

Fig. 13. Ideal waveforms of BEMF and their sum in neutral point.

Określając punkt przejścia przez zero międzyfazowej SEM można w prosty sposób sterować pracą silnika. Najprostszym sposobem sterowania przy wykorzystaniu SEM jest obserwacja napięcia punktu neutralnego. Idealizowane przebiegi napięcia w tym punkcie pokazuje rys. 13, a przebiegi rzeczywiste rys. 14.



Rys. 14. Rzeczywisty przebieg napięcia w punkcie gwiazdowym (żółty), oraz przebieg SEM jednej z faz (niebieski) z zaznaczonymi punktami przejścia przez 0.

Fig. 14. Actual voltage waveform in neutral point (yellow) and BEMF of a phase (blue) with marked zero points

Chwila przejścia przez zero SEM w niezasilanej fazie nie jest równoznaczna z włączeniem kolejnych tranzystorów mostka. Aby wyznaczyć chwilę komutacji zaworów należy zastosować opóźnienie zależne od prędkości wirnika takie, w którym wirnik przebędzie drogę równą 30° elektrycznych. Metody oparte na obserwacji SEM można stosować w zakresie prędkości obrotowych od 10 do 100%. Poniżej tych wartości SEM jest zbyt mała, aby na jej podstawie poprawnie określać położenie wirnika [10], [12], [19].

Do określania położenia i prędkości obrotowej wirnika można wykorzystać metody bazujące na pomiarach prądów i napięć oraz na modelu matematycznym silnika [7], [14], [20]. Metody te mają największe wymagania dotyczące mikroprocesora, gdyż do sterowania maszynami z elektroniczną komutacją wykorzystuje się modele matematyczne. Sposób ten oprócz szybkiego mikroprocesora wymaga dokładnego opisu matematycznego zjawisk zachodzących w maszynie oraz stałych fizycznych charakteryzujących dany silnik takich jak rezystancja stojana, indukcyjność poszczególnych faz, strumień magnetyczny od magnesów trwałych, moment bezwładności itp.

Mikroprocesor w czasie rzeczywistym na podstawie napięć i prądów zasilających wyznacza położenie wirnika i oblicza pozostałe zmienne niezbędne do prawidłowego sterowania silnikiem. Sterowanie za pomocą modelu matematycznego cieszy się coraz większym zainteresowaniem za sprawą rozwoju techniki mikroprocesorowej. Pojawienie się bardzo szybkich procesorów sygnałowych, które potrafią wyliczyć wszystkie niezbędne zmienne w odpowiednio krótkim czasie, umożliwiło szerokie stosowanie tych metod.

W przypadkach, gdy modele matematyczne są trudne do określenia można stosować regulatory rozmyte bazujące na tabelach reguł postępowania w określonych sytuacjach [17], [18]. Są one mniej wrażliwe na zakłócenia i mają dobrą dynamikę.

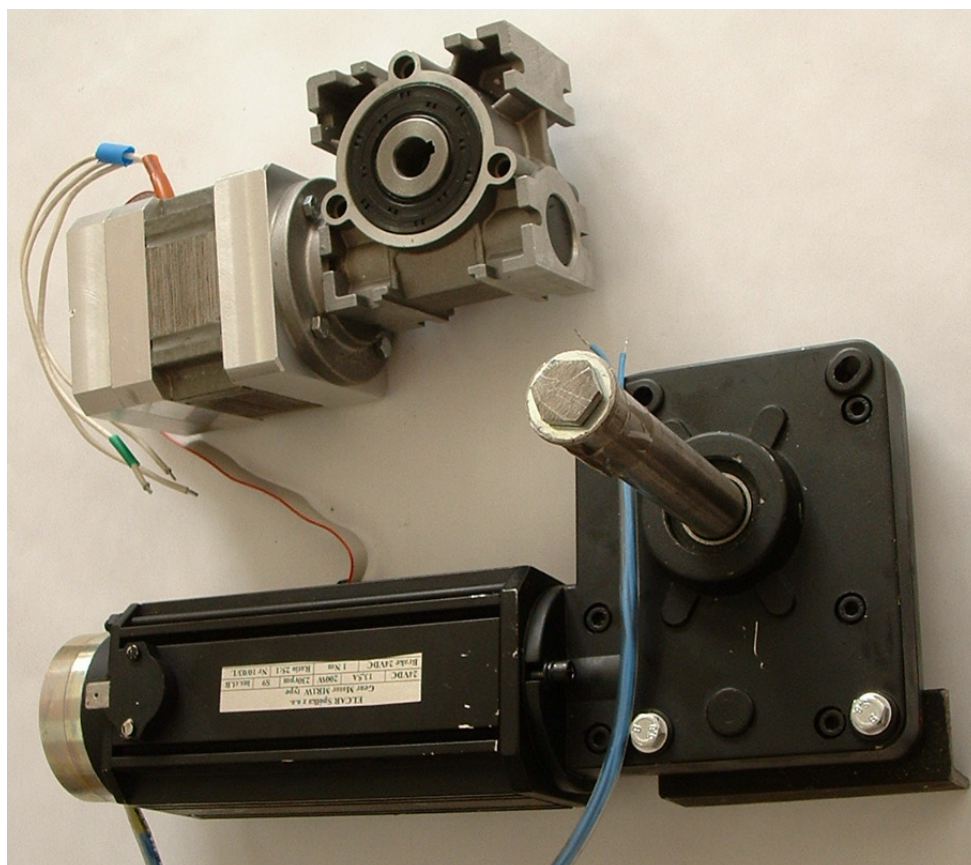
W przypadkach, gdy dysponujemy dużą liczbą przykładów zachowania się napędu w określonych sytuacjach możemy do określania położenia wirnika zastosować sieci neuronowe [15]. Do wejść sieci dostarczamy sygnały informujące o napięciach na zaciskach silnika, a wyjściem sieci jest informacja o położeniu wirnika. Struktura sieci i liczba jej warstw zależna jest od projektanta i stopnia skomplikowania rozwiązywanego problemu. Duża liczba przykładów zachowania się napędu jest niezbędna do prawidłowego nauczenia sieci [15].

Wszystkie wymienione sposoby sterowania bezczujnikowego wymagają znajomości położenia początkowego wirnika i odpowiedniej procedury startowej.

5. WNIOSKI

Zainteresowanie napędami z bezszczotkowymi silnikami prądu stałego (BLDC) stale rośnie, głównie za sprawą wzrostu cen energii elektrycznej. Wysoka sprawność tych silników powoduje, że przy długotrwałej eksploatacji oszczędzamy energię i napędy wyposażone w silniki bezszczotkowe są konkurencyjne cenowo w stosunku do innych rozwiązań.

Szacuje się, że w grupie silników do 5 kW silniki bezszczotkowe mają sprawność wyższą średnio o 10% w porównaniu z innymi silnikami. W przypadku silników wyposażonych w czujniki położenia układ sterujący pracą silnika jest prosty, niezawodny i tani. Korzyści z zastosowania tych silników ukazuje obrazowo przedstawia poniższe zdjęcie, na którym przedstawiono silnik komutatorowy i silnik BLDC o tych samych parametrach.



Rys. 15. Porównanie silnika komutatorowego DC z silnikiem BLDC

Fig. 15. Comparison of DC commutator motor with BLDC motor.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Wiak, H. Welfle: *Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź (2001)
- [2] Z. Goryca: *Układ napędowy z silnikiem bezszczotkowym*, XIII Sympozjum Mikromaszyny i Serwonapędy, Krasiczyn (2002), 347-352
- [3] Z. Goryca, J. Szczypior: *Układ napędowy skutera elektrycznego*, X Konferencja Naukowa trakcji Elektrycznej SEMTRAK, Zakopane (2002), 183-192
- [4] Z. Goryca, J. Szczypior: *Napęd skutera elektrycznego bezszczotkowym silnikiem z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi*, Conference MET, Pułtusk (2003), 156-160
- [5] Z. Goryca: *Niskonapięciowy układ napędowy z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, X Konferencja Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych, Ustroń (2003), 59-61
- [6] T. Glinka: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002
- [7] Z. Goryca, M. Ziółek: *Moment zaczepowy w silniku z cylindrycznym uzwojeniem*, Przegląd Elektrotechniczny, 84 (2008), n. 6, 169-171
- [8] I. Dudzikowski, L. Pawlaczyk: *Maszyny prądu stałego o magnesach trwałych i ich sterowanie - stan aktualny i perspektywy rozwoju*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Elektryka z. 176, Gliwice 2001
- [9] H. Chen, C. Liaw: *Current-mode control for sensorless BLDC drive with intelligent commutation tuning*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No 5, 2002, p. 747-756.
- [10] N. Ertugrul, P. Acarnley: *A New algorithm for sensor less operations of permanent magnet motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No 3, 1994, p. 126-133.
- [11] Z. Goryca: *Ocena dokładności pozycjonowania reluktancyjnego silnika skokowego na podstawie pomiaru prądu*, Międzynarodowe XII Sympozjum Mikromaszyny i Serwonapędy, Kamień Śląski, 10- 14 września 2000, s. 520-525.

- [12] Z. Goryca: *Napęd z bezczujnikowym, bezszczotkowym silnikiem prądu stałego*, XLII International Symposium on Electrical Machines SME2006, Cracow, Poland, July 3-6, 2006, s. 359-362.
- [13] Z. Goryca, A. Pakosz: *Bezczujnikowe sterowanie bezszczotkowego silnika prądu stałego*, Przegląd Elektrotechniczny nr 6, 2008, s. 172-174.
- [14] D. Janiszewski: *Nowy obserwator oparty na filtrze Kalmana dla bezczujnikowego napędu z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, SENE, Łódź 2007, s. 181-186.
- [15] R. Kumar, S.V. Padmanaban: *An Artificial neural network based rotor position estimation for sensorless permanent magnet brushless motor drive*, 32 Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IECON 06, 2006, p. 649-654.
- [16] K. Krykowski: *Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym analiza, właściwości, modelowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [17] B. Mrozek: *Projektowanie regulatorów rozmytych w środowisku MATLAB/Simulink*, Pomiary, Automatyka i Robotyka, nr 11 2006, s. 5-12.
- [18] B.G. Park, T.S. Kim, J.S. Ryu, D.S. Huyn: *Fuzzy back EMF observer for improving performance of sensor less brushless DC motor drive*, Power Electronics Conference and Exposition 2006, APEC 06, p. 674-678.
- [19] T. Siostrzonek: *Bezczujnikowy układ napędowy z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego z magnesami trwałymi sterowany systemem proporcjonalnym do momentu*, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 2008.
- [20] K. Zawirski: *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.