

Bezczujnikowe sterowanie silnika wysokoobrotowego PM BLDC przy pomocy metody bazującej na napięciach międzyfazowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę bezczujnikowego sterowania wysokoobrotowego silnika PM BLDC bazującą na napięciach międzyprzewodowych silnika. Ponadto w artykule porównano niniejszą metodę z innymi bezczujnikowymi metodami sterowania pod kątem możliwości implementacji w silniku wysokoobrotowym. W szczególności zwrócono również uwagę na możliwość implementacji w zależności od kąta komutacji.

Abstract. The paper presents a sensorless control method based on phase-to-phase voltages of a high-speed PM BLDC motor. In addition, the paper compares this method with other sensorless control methods considering the possibilities of implementation in a high-speed motor. In particular, also highlighted the possibility of implementation depending on the commutation angle. (*Sensorless control of high-speed PM BLDC motor using method based on phase-to-phase voltages*).

Słowa kluczowe: sterowanie bezczujnikowe, silnik bezszczotkowy, BLDC, silnik wysokoobrotowy, napięcia międzyfazowe.

Keywords: sensorless control, brushless motor, BLDC, high-speed motor, phase-to-phase voltages.

doi:10.12915/pe.2014.04.20

1. Prototyp silnika wysokoobrotowego

Nowe technologie oraz nowe materiały charakteryzujące się coraz lepszymi właściwościami elektrycznymi, magnetycznymi oraz mechanicznymi, postęp w technologii łożysk oraz w technologii materiałów wytrzymałych mechanicznie dają coraz większe możliwości w konstrukcji maszyn, pozwalając tym samym na przekraczanie kolejnych granic, które dotychczas pozostawały poza zasięgiem konstruktorów oraz projektantów. Technologia materiałów charakteryzujących się niską stratnością, pozwala na obniżenie nagrzewania się magnetowodu, a w związku z tym strat potocznie określanych jako straty w żelazie. Materiały ceramiczne oraz nowoczesne smary stosowane w elementach tocznych łożysk, pozwalają ograniczyć przede wszystkim straty tarcia, dzięki czemu możliwe jest osiągnięcie dużych prędkości obrotowych. Ponadto zastosowanie łożysk z ceramicznymi elementami tocznymi, pozwala ograniczyć straty pochodzące od prądów wirowych indukowanych w kulkach i co najważniejsze w tym przypadku zmniejszyć ilość ciepła wydzielanego w łożyskach, zmniejszając tym samym możliwość wytopienia smaru i uszkodzenia łożysk. Rozważając nowe technologie, nie sposób nie wspomnieć o nowoczesnych nieżelaznych materiałach o dużej wytrzymałości mechanicznej. Materiały te mogą być użyte przy konstrukcji elementów narażonych na duże przeciążenia, które powinny charakteryzować się jak najmniejszą masą.



Rys.1. Jeden z wykonanych prototypów bezszczotkowego silnika wysokoobrotowego

Dzięki ograniczeniu strat, zastosowaniu nowoczesnych łożysk wysokoobrotowych, użyciu lekkich materiałów

wytrzymałych mechanicznie, możliwym stało się wykonanie wysokoobrotowego silnika o maksymalnej prędkości obrotowej 100 000 obr/min. Silnik został zaprojektowany w Katedrze Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki KENER na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej [1]. Prototyp zaprojektowanego silnika przedstawia rysunek 1.

2. Problemy związane z czujnikami położenia wirnika w wysokoobrotowym silniku PM BLDC

Przy czujnikowym sterowaniu wysokoobrotowego silnika PM BLDC występuje szereg problemów, które negatywnie wpływają na pracę silnika powodując znaczne zwiększenie strat przez niepoprawne wysterowanie zaworów komutatora elektronicznego. Jednym z najważniejszych problemów przy sterowaniu czujnikowym jest pętla histerezy hallotronów w zależności od położenia wirnika. Pętla w szczególności jest obserwowalna w silnikach z jedną parą biegunów i ma niekorzystny wpływ na pracę tych silników. Dzieje się tak ponieważ na wycinku obwodu wirnika pomiędzy dwoma biegunami indukcja magnetyczna jest zbyt mała aby poprawnie wysterować hallotron, wskutek tego w obszarze tym występuje pętla histerezy hallotronów! W celu eliminacji niekorzystnego zjawiska można umieścić na wirniku dodatkowy pierścień magnetyczny, który miałby jednoznacznie określić bieguny na całym obwodzie, jednakże umieszczenie dodatkowego pierścienia wiąże się z koniecznością wydłużenia wału, co przy dużych prędkościach obrotowych może zwiększyć drgania poprzeczne lub uginanie się wirnika [2].

Z użyciem hallotronów związanych jest jeszcze kilka innych niedogodności, jak na przykład niedokładność rozłożenia czujników [3], [4]. O ile dla niskich prędkości niewielkie przesunięcia nie mają większego wpływu na pracę maszyny, to przy prędkościach rzędu 100 000 obr/min nawet niewielkie asymetrie powodują znaczny wzrost strat.

Kolejnym problemem, znanym również dla silników niskoobrotowych jest większa ilość przewodów niezbędna do poprawnej pracy silnika. O ile w warunkach laboratoryjnych duża ilość przewodów nie nastręcza problemów, to już w warunkach przemysłowych, gdzie wymagana jest przede wszystkim niezawodność, stosowanie dodatkowych przewodów sygnałowych może znacznie wpłynąć na awaryjność całego układu napędowego. Ponadto znane są przypadki wystąpienia zjawisk linii długiej na liniach sygnałowych przy sterowaniu czujnikowym, co jest jeszcze bardziej prawdopodobne dla

silników wysokoobrotowych, ze względu na większą częstotliwość pracy.

Ze względu na liczne problemy związane z czujnikami położenia wirnika zdecydowano się wykonać bezczujnikowy układ sterowania wysokoobrotowego silnika PM BLDC.

3. Bezczujnikowy układ sterowania wysokoobrotowym silnikiem PM BLDC

Znanych jest wiele rozwiązań bezczujnikowych układów sterowania silnikami PM BLDC, na przykład:

- sterowniki bazujące na podstawowych równaniach maszyny oraz pomiarach napięć i prądów,
- sterowniki bazujące na logice rozmytej oraz sieciach neuronowych i sztucznej inteligencji,
- sterowniki bazujące na pomiarach siły elektromotorycznej,

ale tylko niektóre nadają się do silników wysokoobrotowych.

Dwie pierwsze metody bazują na skomplikowanych równaniach matematycznych. O ile możliwe jest zaimplementowanie tych metod sterowania w klasycznych silnikach, to już w silnikach wysokoobrotowych, ze względu na wymaganą dużą szybkość działania ich implementacja jest albo ekonomicznie nieopłacalna albo nawet niemożliwa ze względu na niewystarczającą moc obliczeniową większości jednostek obliczeniowych. Kolejnym problemem jest konieczność stosowania bardzo szybkich i dokładnych przetworników analogowo cyfrowych. Przedstawione argumenty eliminują metody sterowania bezczujnikowego bazujące na złożonych obliczeniach oraz dokładnych pomiarach wartości napięć czy też prądów.

Najczęściej używanymi metodami sterowania bezczujnikowego są metody bazujące na napięciach silnika [5], [6]. Wśród nich można wyróżnić:

- metodę bazującą na siłach elektromotorycznych silnika,
- metodę bazującą na trzeciej harmonicznej napięcia,
- metodę bazującą na całce siły elektromotorycznej.

3.1. Metoda bazująca na siłach elektromotorycznych silnika

Jeżeli przyjąć, że nie występują komutacyjne spadki napięć, to w każdym momencie pracy silnika przewodzą tylko dwie fazy. W związku z tym trzecia faza pozostaje niezasilona. Napięcie na zaciskach niezasilonej fazy jest równe sile elektromotorycznej, gdyż spadek napięcia na rezystancji oraz indukcyjności uzwojeń, ze względu na brak przepływu prądu przez uzwojenie jest równy zero. Wykrywając chwile przejścia przez zero siły elektromotorycznej i wprowadzając przesunięcie o kąt 30° można wyznaczyć chwile przełączeń zaworów. Aby wprowadzić przesunięcie o 30° konieczna jest znajomość prędkości obrotowej. Jednakże w przypadku sterowania bezczujnikowego informację o prędkości uzyskuje z rozdzielczością co 60° , analizując czas pomiędzy przełączeniami tranzystorów. Brak ciągłej informacji o prędkości niekorzystnie wpływa na dynamikę układu.

Na początku podrozdziału założono, że komutacyjne spadki napięcia nie występują, co oczywiście jest tylko przybliżeniem. Po ich uwzględnieniu, okazuje się, że metoda bazująca na siłach elektromotorycznych teoretycznie może działać z maksymalnym kątem komutacji wynoszącym 30° , a w praktyce kilka stopni mniejszym. W przypadku, gdy kąt komutacji jest większy niż 30° , przejście przez zero siły elektromotorycznej nie zostanie wykryte, przez co zawory nie zostaną przełączone w odpowiednim czasie, co spowoduje niepoprawną pracę silnika lub nawet jego zatrzymanie.

W metodzie tej w celu uniknięcia wpływu zakłóceń stosuje się filtry dolnoprzepustowe, jednakże wprowadzają one przesunięcie fazowe, które jest funkcją częstotliwości, w związku z tym metoda ta nie jest zalecana dla silników wysokoobrotowych, gdyż wprowadzone opóźnienie byłoby zbyt duże.

Kolejną wadą metody jest konieczność korzystania z punktu neutralnego, który nie jest dostępny w większości komercyjnie sprzedawanych silników.

3.2. Metoda bazująca na trzeciej harmonicznej napięcia

Trzecią harmoniczną można wyznaczyć mierząc napięcie między punktem neutralnym silnika, a ujemnym zaciskiem zasilania. Warunkiem użycia tej metody jest wykonanie uzwojenia stojana o podziałce większej niż $2/3$. Inną metodą odtworzenia trzeciej harmonicznej jest zsumowanie napięć fazowych. Po zsumowaniu przebieg pozbawiony jest wpływu spadków napięć na rezystancjach uzwojeń (spadki napięć odejmują się przy założeniu symetrii uzwojeń).

Na podstawie przebiegu trzeciej harmonicznej można wyznaczyć chwile przełączeń zaworów, które mają miejsce, gdy przebieg trzeciej harmonicznej osiąga wartość maksymalną. Ponieważ wykrywanie ekstremów jest kłopotliwe, dlatego stosuje się dodatkowy integrator, którego sygnałem wyjściowym jest trzecia harmoniczna strumienia skojarzonego. Wystarczy wówczas wykryć punkt przejścia sygnału scałkowanego przez zero. Problem nasycenia wzmacniacza operacyjnego pracującego jako integrator nie jest istotny, ponieważ proporcjonalnie ze wzrostem częstotliwości (zweźnaniem przebiegu) rośnie wartość siły elektromotorycznej, dzięki czemu pole pod przebiegiem trzeciej harmonicznej jest stałe. Należy jeszcze wspomnieć, że w rzeczywistości przebieg trzeciej harmonicznej ma kształt zbliżony do trójkątnego, co świadczy o udziale wyższych harmonicznych [7].

Opisana metoda wymaga wyprowadzonego punktu neutralnego silnika, co jest niewątpliwie wadą, gdyż ogranicza możliwość jej stosowania tylko do bardzo wąskiej grupy silników z wyprowadzonym punktem zerowym. Ponadto w opisanej metodzie widoczny jest znaczny wpływ zjawisk komutacyjnych na opóźnienie przełączania zaworów elektronicznych, co nasila się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.

3.3. Metoda bazująca na całce siły elektromotorycznej

Kolejną metodą sterowania bezczujnikowego jest całkowanie siły elektromotorycznej nieprzewodzącej fazy. Integrator powinien rozpocząć całkowanie w chwili przejścia przez zero siły elektromotorycznej. Chwile przełączania zaworów komutatora elektronicznego mają miejsce, gdy wartość całkowanego przebiegu osiągnie określony poziom, zależny od parametrów silnika. W momencie osiągnięcia przez integrator zadanej wartości powinno nastąpić jego zerowanie, które z kolei musi trwać tak długo, aż ustaną zjawiska komutacyjne. Kolejne całkowanie powinno rozpoczynać się od przejścia siły SEM przez zero.

Ponieważ metoda opiera się o całkowanie przebiegów, dlatego jej zaletą jest odporność na szumy. Do wad należy zaliczyć konieczność doboru odpowiedniego napięcia progowego integratora [5], [6], konieczność znajomości potencjału punktu neutralnego silnika oraz możliwość pracy z maksymalnym kątem komutacji nieprzekraczającym 30° .

4. Metoda sterowania bezczujnikowego bazująca na napięciach międzyfazowych

Dotychczas w skrócie scharakteryzowano metody sterowania bezczujnikowego, których działanie opiera się o napięcia na zaciskach silnika. Dwie z trzech przedstawionych metod są w stanie pracować z maksymalnym kątem komutacji dochodzącym do 30° . Taka wartość jest wystarczająca do pracy wentylatorowej lub pracy przy niewielkich obciążeniach. Jednakże korzystne byłoby zwiększenie zakresu kąta komutacji, w celu zwiększenia zakresu obciążalności silnika przy pracy

bezcujnikowej. Ciekawym rozwiązaniem wydaje się metoda bazująca na napięciach międzyfazowych, gdyż pozwala ona na pracę z kątem komutacji dochodzącym do 60° [6]. Jest to niewątpliwą zaletą tej metody, ponieważ możliwa jest praca przy znacznie większym obciążeniu.

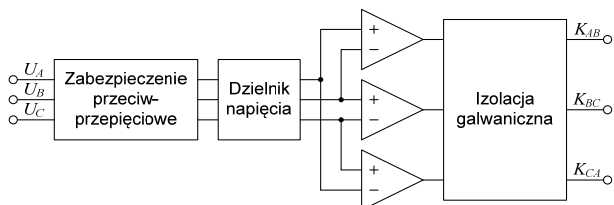
Kolejną zaletą metody jest prostota implementacji, co niewątpliwie ma znaczenie dla silników wysokoobrotowych, gdzie wymagana jest duża szybkość działania. Chwile przełączania zaworów wyznaczone są bezpośrednio z przebiegów napięć międzyfazowych. Zawory przełączane są dokładnie w chwili, gdy napięcie międzyfazowe przechodzi przez zero, dzięki czemu nie ma potrzeby przesuwania sygnałów sterujących tranzystorami o 30° , jak to ma miejsce na przykład w metodzie bazującej na siłach elektromotorycznych.

Wadą wybranej metody jest wpływ spadku napięcia na rezystancji uzwojeń na opóźnienie przełączania zaworów. Jednakże rezystancja uzwojeń w projektowanych silnikach wysokoobrotowych wynosi $7,5\text{ m}\Omega$. Przyjmując, że maksymalny prąd silnika wynosi około 100 A , wówczas spadek napięcia wyniesie $0,75\text{ V}$. Dla napięcia zasilania 24 V spadek napięcia na poziomie $0,75\text{ V}$ w niewielkim stopniu wpłynie na opóźnienie przełączania komutatora.

Podstawą działania bezcujnikowego układu sterowania są zależności (1)-(3).

- (1) **Jeżeli $U_{AB} > 0$, to $K_{AB} = 1$, inaczej $K_{AB} = 0$**
- (2) **Jeżeli $U_{BC} > 0$, to $K_{BC} = 1$, inaczej $K_{BC} = 0$**
- (3) **Jeżeli $U_{CA} > 0$, to $K_{CA} = 1$, inaczej $K_{CA} = 0$**

Zależności (1)–(3) można w prosty sposób zaimplementować w mikroprocesorowym układzie sterowania za pomocą instrukcji warunkowych if, else, jednakże ze względu na to, że wymagana jest duża szybkość pracy układu, zaszła konieczność implementacji powyższych równań w postaci układu analogowego. Układ wykonano w oparciu o komparatory. Ideę działania układu przedstawiono na rysunku 2.



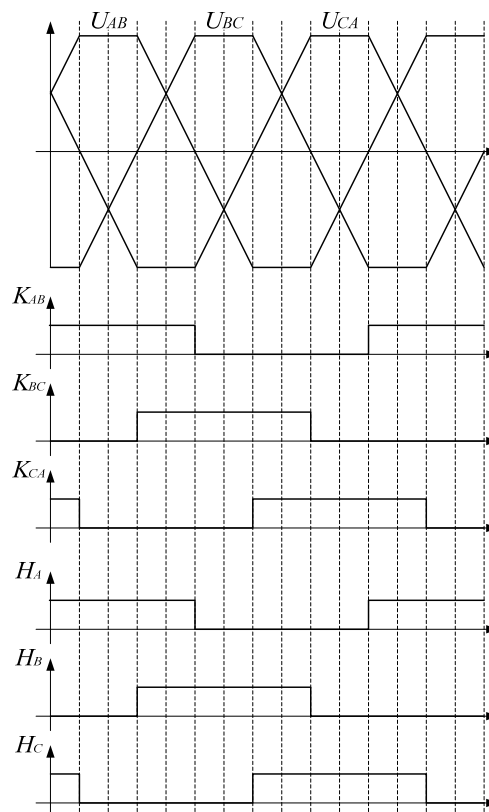
Rys.2. Schemat blokowy układu komparatorów realizujący zależności (1)-(3)

Jeżeli założyć, zerowy czas komutacji, wówczas przebiegi generowane z układu komparatorów są tożsame z przebiegami z czujników hallotronowych (rys. 3). Ponieważ przebiegi K_{AB} , K_{BC} , K_{CA} są tożsame z sygnałami z hallotronów, w związku z tym na ich podstawie można wygenerować sygnały sterujące odpowiednie tranzystory komutatora elektronicznego.

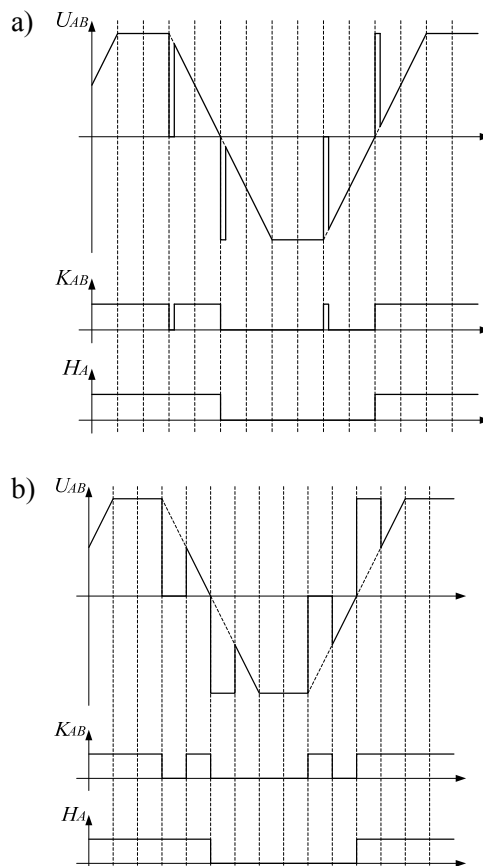
Ponieważ w rzeczywistym silniku czas trwania komutacji jest niezerowy i najczęściej wzrasta wraz z obciążeniem, dlatego rzeczywiste przebiegi generowane przez układ komparatorów mają postać jak na rysunku 4. Rzeczywiste przebiegi sygnałów K_{AB} , K_{BC} , K_{CA} z układu komparatorów dla małego kąta komutacji przedstawiono na rysunku 5.

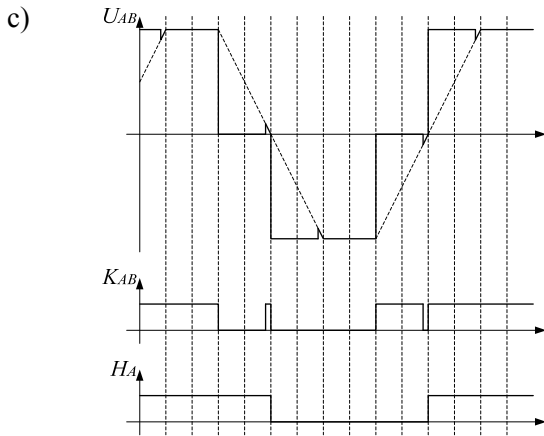
W związku z występowaniem zjawiska komutacji, odczyt sygnałów z komparatorów powinien rozpoczynać się blisko kąta 60° (rys. 6). Jednakże należy również wziąć pod uwagę dynamikę maszyny, gdyż szybkie zmiany prędkości, zwłaszcza przyspieszanie, mogą spowodować odczyt sygnałów z komparatorów z poza zakresu 60° . Jednakże w projektowanym silniku wysokoobrotowym, zakłada się,

pracę przy stałej prędkości obrotowej oraz niewielkie zmiany momentu obciążenia.

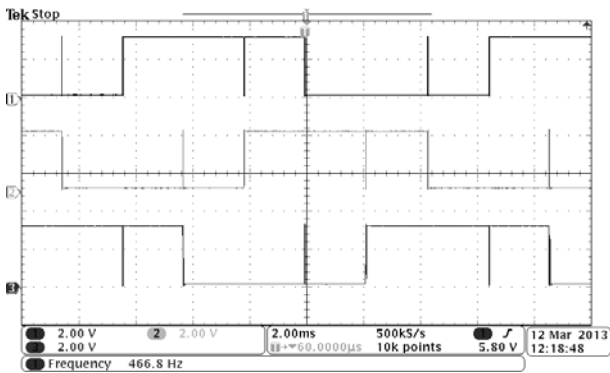


Rys.3. Przebiegi wygenerowane przez układ komparatorów K_{AB} , K_{BC} , K_{CA} na podstawie napięć międzyfazowych U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} oraz ich porównanie z sygnałami z czujników hallotronowych H_A , H_B , H_C

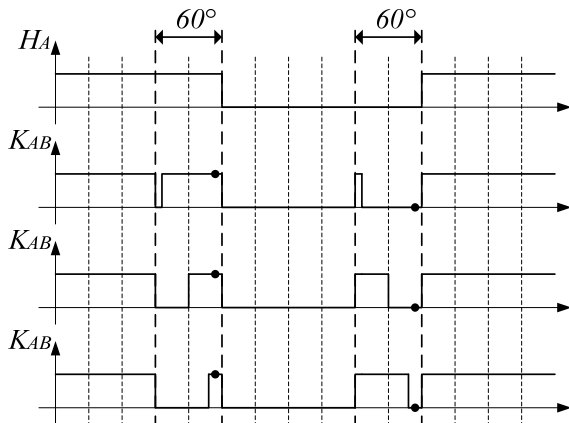




Rys.4. Przebiegi generowane przez układ komparatorów K_{AB} , K_{BC} , K_{CA} z uwzględnieniem niezerowej komutacji a) dla małego kąta komutacji, b) dla kąta komutacji 30° , c) dla kąta komutacji dochodzącego do 60°



Rys.5. Rzeczywiste przebiegi sygnałów K_{AB} , K_{BC} , K_{CA} dla małego kąta komutacji [8]



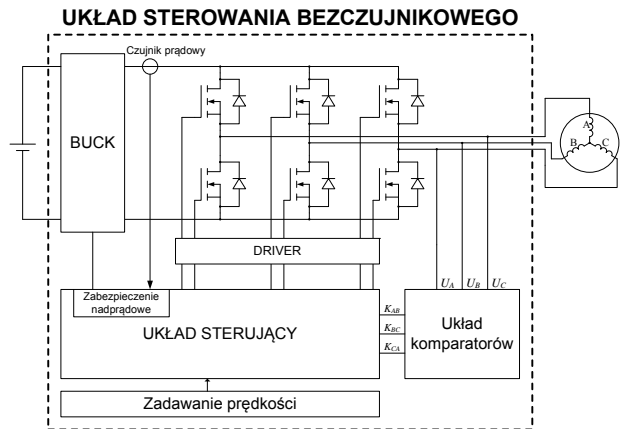
Rys.6. Wizualizacja punktu, od którego powinien rozpocząć się odczyt komparatorów

5. Jednostka sterowania bezczujnikowego

Schemat układu sterowania bezczujnikowego przedstawiono na rysunku 7.

Układ sterowania bezczujnikowego zasilany jest ze źródła napięcia stałego. Ponieważ w silnikach prądu stałego, prędkość obrotowa jest w przybliżeniu proporcjonalna do napięcia zasilania, dlatego w celu regulacji prędkości obrotowej zaimplementowano układ przekształtnika DC/DC obniżającego napięcie typu BUCK. Zrezygnowano tym samym z metody PWM, ze względu na dużą częstotliwość pracy silnika i w związku z tym konieczność kluczkowania tranzystorów komutatora

elektronicznego z dużą częstotliwością. Znajdujący się za komutorem czujnik prądowy połączony z zabezpieczeniem nadprądowym, ma za zadanie ograniczyć prąd rozruchowy silnika. Układ komparatorów został opisany w punkcie 4. Układ sterowania odpowiada za wyznaczenie punktu odczytu sygnałów z komparatorów oraz za regulację prędkości. Prędkość obrotowa szacowana jest na podstawie sygnałów kluczujących tranzystory, natomiast zadawanie prędkości odbywa się poprzez zmianę wypełnienia sygnału załączającego tranzystor przekształtnika układ DC/DC typu BUCK.

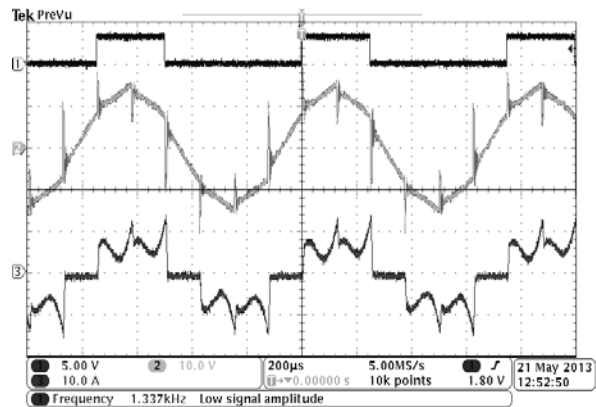


Rys.7. Schemat blokowy bezczujnikowego układu sterowania

6. Badania laboratoryjne

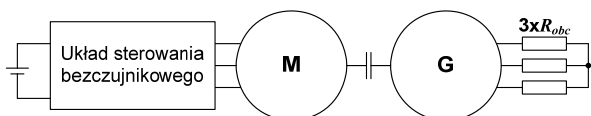
Badania wykonanego układu sterowania przeprowadzono zarówno dla silnika wysokoobrotowego i niskoobrotowego. Jako silnik niskoobrotowy użyto silnik typu BG75x50 firmy Dunkermotoren. Jako silnik wysokoobrotowy użyto prototyp z magnetowodem bezżłobkowym [9], [6].

Na rysunku 8 [8] przedstawiono przebiegi wysokoobrotowego silnika PM BLDC pracującego na biegu jałowym z prędkością 80220 obr/min, sterowanego za pomocą bezczujnikowego układu sterowania.



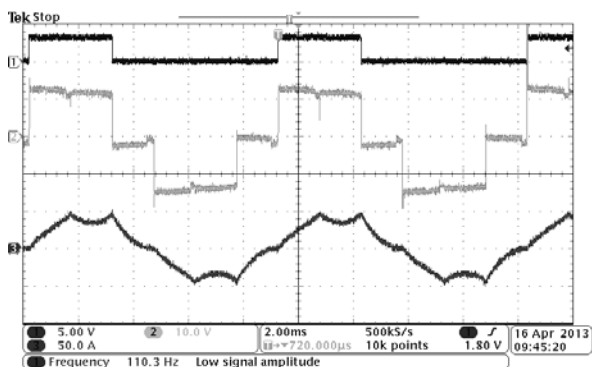
Rys.8. Przebiegi silnika wysokoobrotowego pracującego na biegu jałowym z prędkością 80220 obr/min. 1) przebieg sygnału sterującego tranzystor, 2) przebieg napięcia międzyfazowego, 3) przebieg prądu fazowego

Ponieważ zastosowana metoda sterowania bezczujnikowego pozwala na pracę z kątem komutacji dochodzącym do 60° , dlatego zdecydowano się również wykonać badania przy dużym kącie komutacji. Jednak ze względu na to, iż uzyskanie kąta komutacji w przybliżeniu równego 60° w silnikach wysokoobrotowych jest bardzo trudne. Dlatego zdecydowano się przeprowadzić badania dla klasycznego silnika PM BLDC. Badania obciążonego silnika wykonano w układzie napędowym jak na rysunku 9.



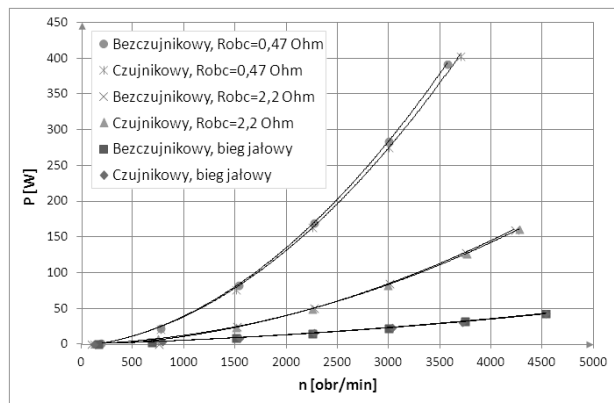
Rys.9. Układ napędowy do badania silnika PM BLDC pod obciążeniem

Na rysunku 10 [8] przedstawiono przebiegi silnika BG75x50 firmy Dunkermotoren, pracującego przy kącie komutacji około 55° i sterowanego za pomocą wykonanego układu bezczujnikowego. Przedstawiony na rysunku przebieg rzeczywisty napięcia międzyfazowego wykazuje duże podobieństwo do przebiegu teoretycznego z rysunku 4c.



Rys.10. Przebiegi silnika przy kącie komutacji wynoszącym około 55° , sterowanego za pomocą metody bezczujnikowej bazującej na napięciach międzyfazowych, pracującego z prędkością 1655 obr/min. 1) przebieg sygnału sterującego tranzystor, 2) przebieg napięcia międzyfazowego, 3) przebieg prądu fazowego

W ramach porównania wykonanego sterownika ze sterownikiem czujnikowym wykonano charakterystykę mocy pobieranej przez układ napędowy przy sterowaniu bezczujnikowym oraz czujnikowym dla różnych obciążeń (rys. 11) [8].



Rys.11. Porównanie pobieranych mocy przez układy napędowe sterowane czujnikowo oraz bezczujnikowo dla różnych obciążeń.

Większy pobór mocy w układzie bezczujnikowym wynika ze strat w dodatkowym przekształtniku DC/DC typu BUCK. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że w badaniach laboratoryjnych układu czujnikowego człon przekształtnika obniżającego napięcie nie występował. W układzie czujnikowym wartość napięcia zadawano manualnie za pomocą regulowanego źródła napięcia dołączonego do zacisków komutatora elektronicznego.

7. Podsumowanie

Opisana metoda sterowania bezczujnikowego pozwala na pracę silnika przy kącie komutacji dochodzącym do 60° . Jest to niewątpliwie zaletą tej metody, gdyż w porównaniu do metod bezczujnikowych bazujących na siłach elektromotorycznych, niniejsza metoda pozwala na pracę z kątem komutacji aż o 30° większym.

Ponadto opisana metoda sterowania bezczujnikowego nie wymaga znajomości potencjału punktu neutralnego, co niewątpliwie czyni ją bardzo użyteczną i pozwala stosować w większości komercyjnie dostępnych silników bezszczotkowych (przykład – silnik BG75x50 bez wyprowadzonego punktu zerowego).

Zaproponowana metoda sterowania pozwala na poprawną pracę silników, w których przebieg siły elektromotorycznej charakteryzuje się małą stromością w punkcie przejścia przez zero. Należy dodać, że stosowanie w takich silnikach metod bezczujnikowych bazujących na sile elektromotorycznej jest niemożliwe.

Skonstruowany układ sterowania pozwolił na bezproblemową pracę przy prędkości obrotowej wynoszącej około 80 000 obr/min.

Wszystkie badania wykonano w ramach grantu nr UDA-POIG.01.03.01-00-058/08-00 zatytułowanego "Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych", zadanie nr 5 pt. "Badania aplikacyjne", podzadanie nr 5.3 pt. "Opracowanie konstrukcji silników wysokoobrotowych wzbudzanych magnetoelektrycznie".

LITERATURA

- [1] Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Miksiewicz R., Hetmańczyk J., Wysokoobrotowy silnik PM BLDC, *Przegląd elektrotechniczny*, 86, nr 2, (2010), 160
- [2] Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Skoć A., Hetmańczyk J., Rezonans mechaniczny w wysokoobrotowym silniku PM BLDC, *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe*, (2010), nr 86, 123
- [3] Hetmańczyk J., Domoracki A., Wpływ wad czujnika położenia wirnika na własności napędu z silnikiem BLDC, *Postępy w elektrotechnice stosowanej: PES-4*, (2003)
- [4] Hetmańczyk J., Domoracki A., Krykowski K., 3,6 kW DC brushless motor control system – the influence of position sensors fault on motion properties, *Electrical Drives and Power Electronics, EDPE*, (2003)
- [5] Johnson J.P., Ehsani M., Guzelgunter Y., Review of sensorless methods for brushless DC., *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty Fourth IAS Annual Meeting*, 1, (1990), 143-150
- [6] Krykowski K., Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice, (2011)
- [7] Moreira J., Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motors operating in a wide speed range, *IEEE Trans. on Industry Applications Society*, 32, (1996), 401-407
- [8] Tomaszczyk T., Mikroprocesorowy układ sterowania komutatorem elektronicznym wysokoobrotowego silnika PM BLDC, praca magisterska, Gliwice, (2013)
- [9] Krykowski K., Hetmańczyk J., Gałuszkiewicz Z., Miksiewicz R., Computer analysis of high-speed PM BLDC motor properties, *COMPEL The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, (2011), vol. 30, nr 3, 941-956

Autorzy:

mgr inż. Dawid Makiela, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
E-mail: Dawid.Makiela@polsl.pl
mgr inż. Tomasz Tomaszczyk
E-mail: TomekTomaszczyk@gmail.com