

Aleksander Bodora, Arkadiusz Domoracki, Tomasz Biskup, Pol. Śląska, Gliwice
Henryk Kołodziej, ENEL, Gliwice
Zdzisław Budzyński, KOMAG, Gliwice

BADANIA UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM BEZSZCZOTKOWYM (PMSM) O MOCY 20 kW

20 kW BRUSHLESS AC MOTOR (PMSM) DRIVE SYSTEM RESEARCH

Abstract: In the article the results of research into 20kW PMSM drive system are presented. Tested system has consisted of brushless AC motor prototype driven by frequency converter. Control system has been built with the help of specialized DS1104 card being part of PC. The simulation research has been done using drive model, which had been worked out using Matlab-Simulink. The results of computer simulation research as well as of experimental tests are presented in the article. Obtained waveforms turn out to be satisfactory and will be starting point for research into drive system designed for traction vehicle in the future.

1. Wstęp

Silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi i komutacją elektroniczną są obiektem zainteresowań producentów i użytkowników napędów elektrycznych. Wynika to z faktu, że silniki te mają najwyższą sprawność energetyczną ze wszystkich maszyn elektrycznych, a ich właściwości napędowe są zbliżone do silników prądu stałego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Nie bez znaczenia jest również fakt, że silniki te posiadają bardzo korzystny stosunek rozwijanego momentu do masy i wymiarów gabarytowych.

Do niedawna silniki z magnesami trwałymi stosowano w układach napędowych o mocach nie przekraczających 1 kW. Fakt ten był spowodowany stosunkowo wysoką ceną magnesów trwałych. W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost mocy tych maszyn elektrycznych. Panuje przekonanie, że silniki z magnesami trwałymi staną się w przyszłości konkurencyjne do powszechnie używanych obecnie silników indukcyjnych klatkowych [2]

Opisane w pracy badania przeprowadzono na prototypowym silniku o mocy około 20 kW, czterech parach biegunów i znamionowej prędkości obrotowej 750obr/min. Doświadczenia zdobyte w czasie tych prac będą stanowiły punkt wyjścia do badań układu napędowego pojazdu trakcyjnego z silnikiem o mocy ok. 60 kW.

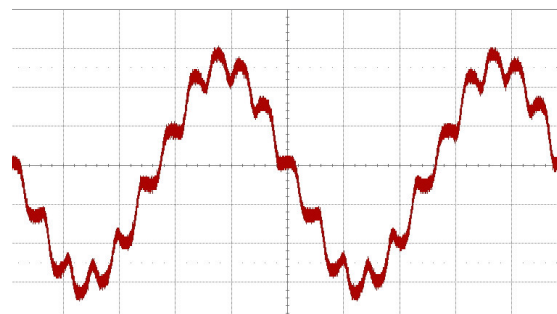
2. Cel pracy

Celem pracy było uruchomienie i przeprowadzenie wstępnych badań prototypowego silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi typu

PMSg 180L-8. Silnik został wykonany w BOBRME Komel.

3. Silnik bezszczotkowy

Na rys. 1 przedstawiono przebieg fazowej siły elektromotorycznej badanej maszyny. Przebieg zarejestrowano dla pracy prądnicowej maszyny nieobciążonej.



Rys. 1. Przebieg fazowej SEM badanego silnika bezszczotkowego

W badanym silniku magnesy trwałe rozmieszczone zostały na powierzchni wirnika. Maszyny o takiej konstrukcji obwodu magnetycznego charakteryzują się porównywalnymi wartościami reaktancji w osi podłużnej i poprzecznej. Sposób sterowania silnikami bezszczotkowymi jest najistotniejszym wyznacznikiem podziału tych maszyn na silniki prądu stałego (PM BDCM) oraz silniki prądu przemiennego (PMSM). W przypadku silników prądu stałego stosuje się sterowanie dyskretne w taki sposób, aby wektor pola pochodzący od uzwojeń twornika zmieniał swój kierunek i położenie skokowo. Prądy fazowe płynące przez uzwojenia

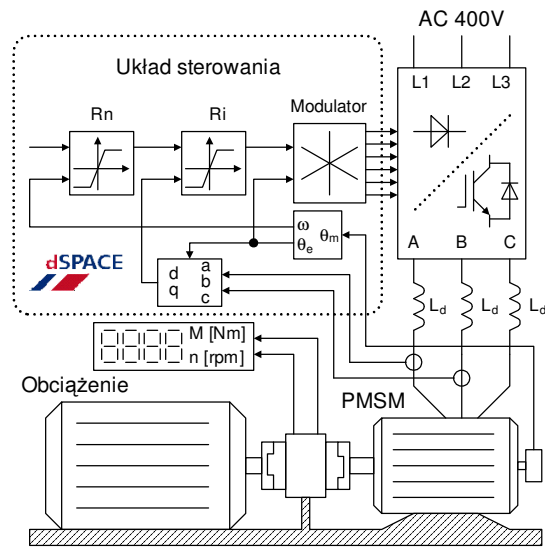
silnika mają wówczas w przybliżeniu kształt prostokątny, natomiast przekształtnik zasilający nazywa się komutatorem elektronicznym. W przypadku silników prądu przemiennego sterowanie zaworami zapewnia sinusoidalny rozkład prądów fazowych silnika, w wyniku czego wektor pola pochodzący od uzwojeń twornika wiruje z prędkością synchroniczną [1].

4. Układ sterowania silnika

W celu obniżenia kosztów oraz ze względu na stosunkowo krótki czas realizacji projektu do zasilania silnika zastosowano standardowy przemiennik częstotliwości firmy ENEL. Przekształtnik został przystosowany do wymogów pracy badawczej. Przemiennik częstotliwości pokazano na zdjęciu układu laboratoryjnego przedstawionym na rys. 7.

Układ sterowania zrealizowano przy zastosowaniu karty DS1104 firmy dSpace® z procesorem PowerPC [4]. Karta ta przystosowana jest do zabudowy w komputerze PC i umożliwia realizację algorytmów sterowania oraz akwizycję danych. Karta pozwala na współpracę ze środowiskiem Matlab-Simulink.

Do sterowania silnikiem przyjęto metodę modulacji wektora przestrzennego. Zasadę zastosowanej modulacji szczegółowo opisano w [3]. Zamknięty obwód regulacji składał się z regulatora prądu R_i oraz nadrzędnego regulatora prędkości R_n . Regulator prądu składał się z dwóch równoległych torów regulacji, odpowiednio dla składowych prądu w osi q oraz d . Składową prądu w osi d utrzymywano na poziomie 0A, zaś zadawana wartość składowej prądu w osi q wynikała z obwodu regulatora prędkości. Z uwagi na fakt, że badano silnik prototypowy, zdecydowano się na zastosowanie regulatorów PI z dużą wartością czasu zdwojenia. Wiązało się to z możliwością występowania spadku prędkości obrotowej w stosunku do prędkości zadanej podczas obciążania silnika momentem. Za satysfakcjonujący uznano stan, gdy spadek ten wahał się na poziomie 10%.

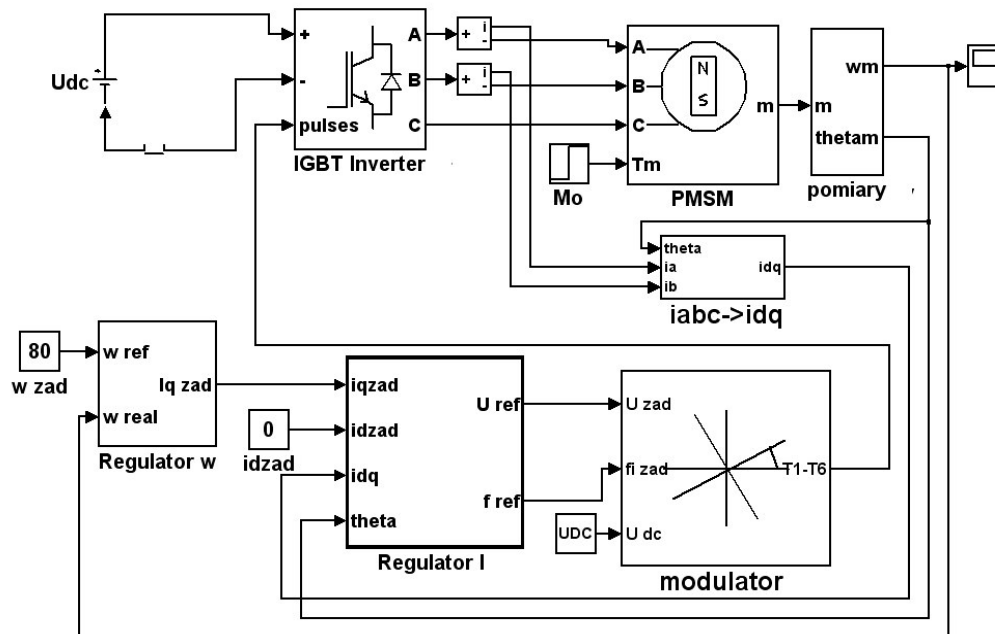


Rys.2. Schemat układu napędowego z silnikiem bezszczotkowym

Pomiar prądów fazowych silnika zrealizowano za pomocą przetworników firmy LEM. Sygnały proporcjonalne do prądów fazy a i b wprowadzone zostały do wejść analogowych karty dSpace i są sygnałami sprzężenia dla obwodu regulacji prądu.

Pomiar położenia wirnika zrealizowano za pomocą przetwornika optoelektronicznego zamocowanego na wale maszyny. Przetwornik zapewniał pomiar kąta elektrycznego z dokładnością do ok. $1,4^0$. Sygnał z przetwornika położenia wprowadzono do układu modulatora oraz jako sygnał sprzężenia do układu regulacji prędkości.

Z uwagi na fakt, że na stanowisku badawczym dostępne było napięcie o wartości $U_{dc}=400V$ - ponad dwukrotnie przekraczającej wartość napięcia znamionowego silnika - zdecydowano się na zastosowanie dodatkowego dławika L_d , który zapewniał ograniczanie stromości narastania prądu.



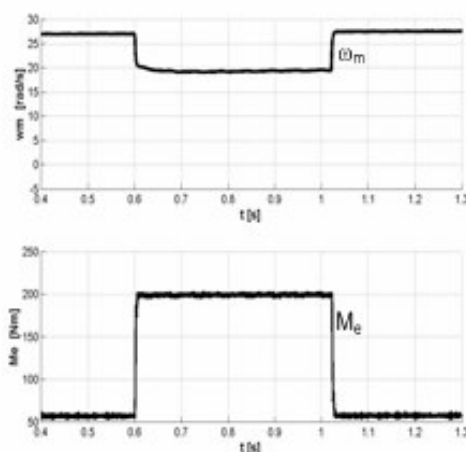
Rys.3 Model komputerowy napędu z silnikiem bezszczotkowym (Matlab-Simulink)

5. Badania symulacyjne

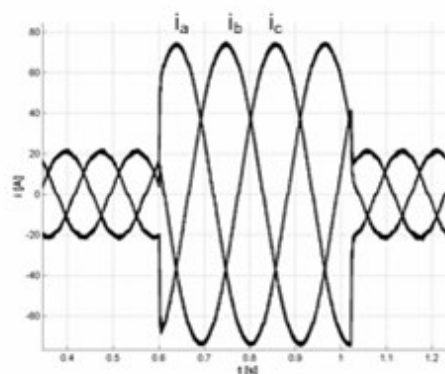
Badania symulacyjne umożliwiły wstępną weryfikację poprawności założeń przyjętych dla obwodów sterowania. Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem opracowanego komputerowego modelu napędu w środowisku Matlab-Simulink. Model komputerowy wykorzystywany w trakcie symulacji przedstawiono na rysunku 3.

W trakcie przygotowań do prób w laboratorium przeprowadzono szereg symulacji komputerowych, a przykładowe wyniki zamieszczono na rys. 4-6. W chwili $t=0.6$ s silnik pracujący na biegu jałowym z prędkością ok. 28 rad/sek, obciążono momentem $M_0=180$ Nm. Po czasie $t=1.1$ s obciążenie zdjęto.

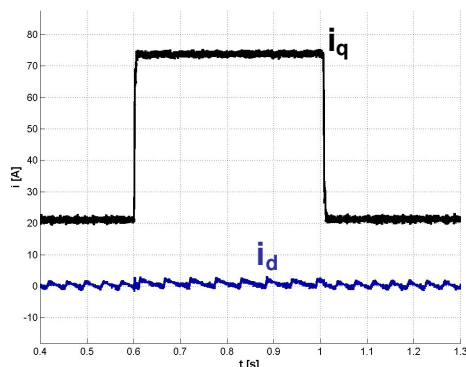
W czasie symulacji zarejestrowano przebiegi prędkości obrotowej ω_m oraz momentu elektromagnetycznego M_e rozwijanego przez silnik (rys.4), prądów fazowych silnika (rys.5) oraz składowych qd prądów (rys.6).



Rys.4. Przebiegi prędkości obrotowej silnika oraz momentu elektromagnetycznego



Rys.5. Przebiegi prądów fazowych silnika

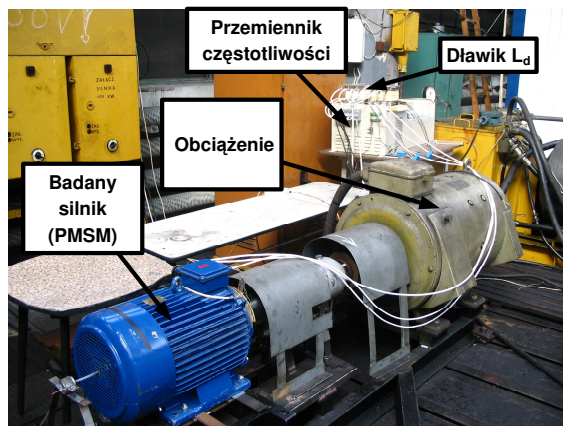


Rys.6. Przebiegi składowych qd prądów

6. Badania laboratoryjne

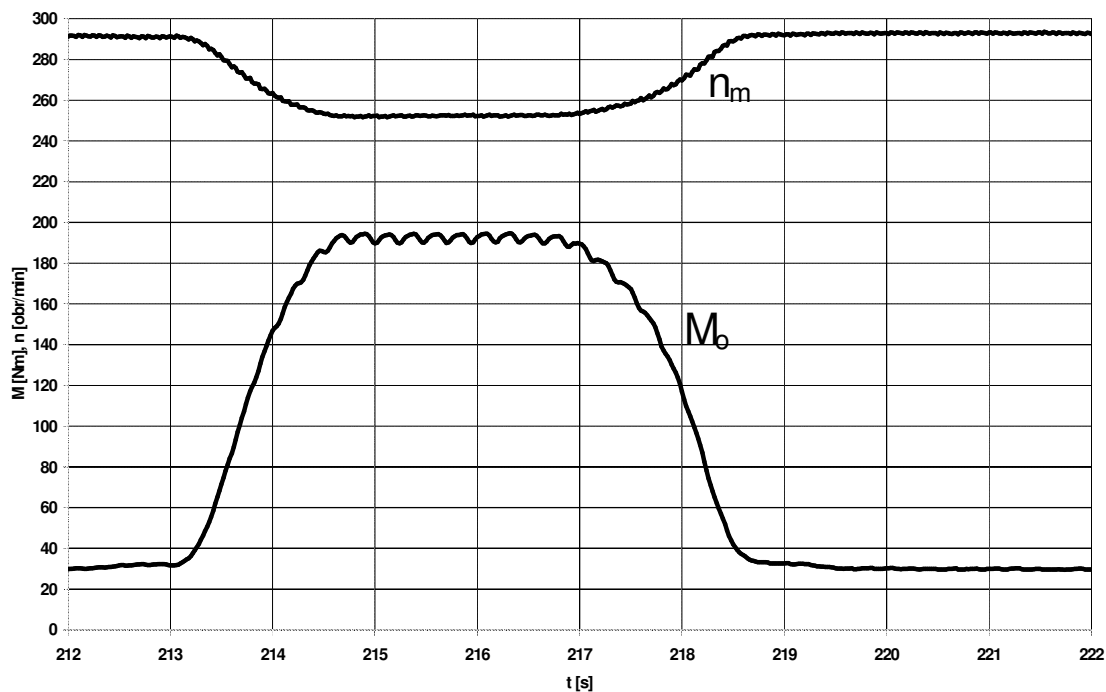
Próby układu napędowego zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 7

W trakcie badań w laboratorium wykonano szereg prób pracy układu. Silnik pracował poprawnie na biegu jałowym oraz pod obciążeniem. Na rysunkach 8-10 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów zarejestrowane w czasie badań laboratoryjnych.

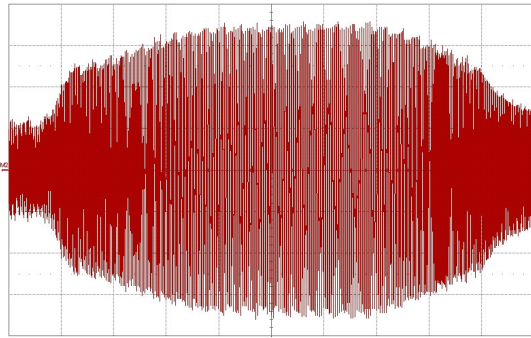


Rys.7. Stanowisko laboratoryjne

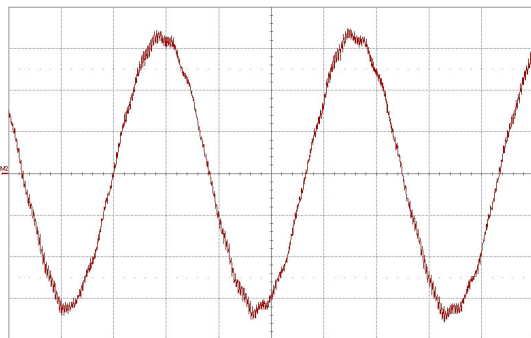
Oscylogramy przedstawiają przebiegi wybranych wielkości: prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego (rys.8) oraz prądu fazowego silnika (rys. 9 i 10) w trakcie obciążania maszyny momentem o wartości ok. 180Nm. Widoczny na rys. 8 spadek prędkości obrotowej silnika wynosił ok. 10% prędkości zadanej, co uznano za wynik zgodny z przyjętymi założeniami.



Rys. 8. Przebieg momentu obciążenia i prędkości obrotowej silnika



Rys.9. Przebieg prądu fazowego silnika (20 A/div, 1s/div) w czasie obciążenia momentem 180 Nm



Rys.10. Przebieg prądu fazowego silnika (20 A/div) - powiększenie

7. Podsumowanie

Przeprowadzone badania w pełni potwierdziły słuszność przyjętych założeń. Prototypowy silnik bezszczotkowy został uruchomiony i wstępnie przebadano jego właściwości. Przyjęty w pracy układ badawczy umożliwił znaczne skrócenie czasu realizacji projektu. Wyniki badań laboratoryjnych wydają się być obiecujące i będą stanowiły punkt wyjścia do badań nad silnikiem o mocy ok. 60 kW, przeznaczonym do napędu pojazdu trakcyjnego. Mimo faktu, że badania prowadzono na prototypowym silniku, którego konstrukcja odbiegała od optymalnej, w trakcie prac rozruchowych i badawczych nie napotkano znacznych trudności technicznych.

Autorzy pragną podziękować dyrekcji BORME Komel za udostępnienie silnika, Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG z Gliwic za udostępnienie stanowiska badawczego, w szczególności Panu mgr inż. Marcinowi Talarowskiemu za współpracę w trakcie przeprowadzania pomiarów oraz firmie ENEL z Gliwic za udostępnienie przemiennika częstotliwości.

8. Literatura

- [1]. Hendershot J.R., Miller T.J.E.: *Design of brushless permanent magnet motors*. Magna physics publishing and Clarendon Press. Oxford 1994
- [2]. Koczara W.: *Rewolucyjne zmiany w technice napędu i w wytwarzaniu energii elektrycznej*, VI Konferencja. Napędy przemysłowe i specjalne, NP2001, Warszawa, 2001
- [3]. Nowacki Z.: *Modulacja szerokości impulsów w napędach przekształtnikowych prądu przemiennego*. PWN, Warszawa 1991.
- [4]. DS1104 R&D Controller Board *Instalation and configuration guide*, materiały firmy dSpace

Autorzy

Dr inż. Aleksander Bodora

Dr inż. Tomasz Biskup

Mgr inż. Arkadiusz Domoracki

Politechnika Śląska w Gliwicach

Katedra Energoelektroniki, Napędu i Robotyki

44-100 Gliwice, ul. B. Krzywoustego 2

Dr inż. Henryk Kołodziej

ENEL Spółka z o.o.

44-101 Gliwice, ul. Gen. J. Sowińskiego 3

Mgr inż. Zdzisław Budzyński

Centrum Mechanizacji Górnictwa

KOMAG

44-101 Gliwice, ul. Pszczyńska 37