

Bartosz Polnik, Rafał Konsek
Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice

BADANIA SYMULACYJNE I STANOWISKOWE SILNIKA PMSM PODCZAS HAMOWANIA ELEKTRYCZNEGO Z ODZYSKIEM ENERGII

SIMULATION AND STAND TESTS OF PMSM DURING MOTOR BREAKING WITH RECOVERY OF ENERGY

Streszczenie: Efektywne wykorzystanie napędu elektrycznego zasilanego z własnego źródła energii jest zagadnieniem coraz częściej poruszonym, z uwagi na coraz to większe wymagania stawiane przez użytkowników, głównie pod kątem czasu pracy maszyny bez konieczności wymiany baterii akumulatorów. W tym celu należy maksymalnie zwiększać sprawność takich układów napędowych (np. poprzez stosowanie silników z magnesami trwałymi), aby umożliwić jak największy odzysk energii w procesie hamowania elektrycznego. W artykule autorzy skupiają się na porównaniu wyników badań układu napędowego z silnikiem PMSM uzyskanych podczas symulacji z badaniami stanowiskowymi w skali laboratoryjnej. W tym celu w środowisku Matlab/Simulink powstał model układu zasilająco-sterującego w postaci BATERIA + FALOWNIK + PMSM, realizujący hamowanie elektryczne ze zwrotem energii do baterii akumulatorów. W międzyczasie prowadzone były badania stanowiskowe quasi-rzeczywistego układu zasilająco-sterującego maszyny górniczej złożonego z baterii akumulatorów, układu sterowania oraz silnika napędowego (PMSM). Uzyskane wyniki zostały porównane i przeanalizowane, a opracowane wnioski posłużyły zweryfikowaniu poprawności przeprowadzonych symulacji modelu z zachowaniem obiektu quasi-rzeczywistego.

Abstract: Effective use of electric drive supplied from its own source of energy is an issue more and more often discussed due to increasing requirements set by the users, mainly as regards the time of machine operation with no need to change the pack of batteries. Efficiency of drive systems should be maximally increased for that purpose (e.g. by use of motors with permanent magnets) to enable the highest possible recovery of energy during electrical braking. The authors of the paper are focused on comparison of the results of simulation of drive system with PMSM motor with the results of stand tests in a laboratory scale. A model of supply-and-control system in a BATTERY + INVERTER + PMSM form, which realizes electrical braking with recuperation of energy to the pack of batteries, was created for that purpose in the Matlab/Simulink environment. In the meantime stand tests of quasi-real supply-and-control system of mining machine, consisting of pack of batteries, control system and PMSM motor, were conducted. Obtained results were compared and analyzed, and drawn conclusions were used to verify the correctness of conducted simulations of the model in almost real conditions.

Słowa kluczowe: silnik PMSM, hamowanie elektryczne, odzyskiwanie energii

Keywords: PMSM motor, motor breaking, recovery of energy

1. Wprowadzenie

Efektywne wykorzystanie napędu elektrycznego zasilanego z własnego źródła energii jest zagadnieniem coraz częściej poruszonym, z uwagi na coraz to większe wymagania stawiane przez użytkowników, głównie pod kątem czasu pracy maszyny bez konieczności wymiany baterii akumulatorów. W tym celu należy maksymalnie zwiększać sprawność takich układów napędowych (np. poprzez stosowanie silników z magnesami trwałymi), aby umożliwić jak największy odzysk energii w procesie hamowania elektrycznego [1]. Zróżnicowanie tras, po których poruszają się lokomotywy aku-

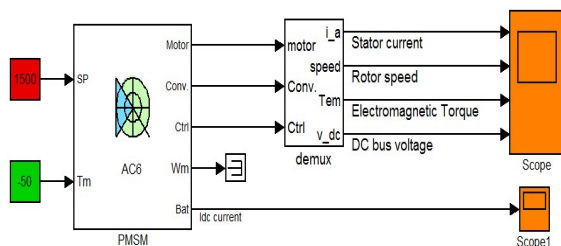
mulatorowe oraz rozwój energoelektronicznych układów sterowania w szerokim stopniu pozwolił na wykorzystanie energii traconej w procesie hamowania elektrycznego (głównie w postaci ciepła) na potrzeby doładowania baterii akumulatorów. Oczywiście jest, że zastosowanie silników z magnesami trwałymi poprawia sprawność elektryczną układu napędowego, a już wykorzystanie silnika synchronicznego pozwala w szerszym zakresie hamowania odzyskiwać prąd do baterii. Jednakże ile energii rzeczywisty układ napędowy górniczej lokomotywy akumulatorowej będzie w stanie odzyskać

podczas hamowania elektrycznego nie można w tej chwili jednoznacznie określić. W celu przybliżenia możliwie uzyskanych wartości postanowiono przeprowadzić symulacje komputerowe, a następnie badania quasi-rzeczywiste w warunkach laboratoryjnych. Parametry znamionowe badanego silnika PMSM typu SMwsa 200 S-4 są następujące [2]:

P_n - 18kW
 U_n - 88V
 I_n - 140A
 f_n - 50Hz
 n_n - 1500obr./min.
 M_n - 115Nm

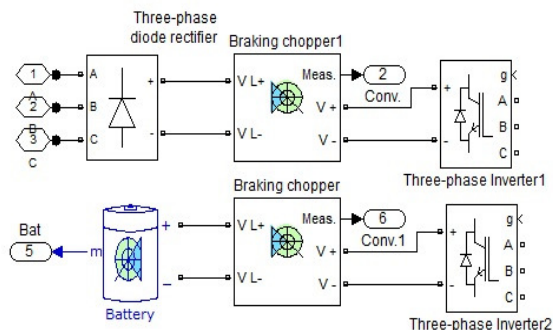
2. Badania symulacyjne

Model symulacyjny napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej zaimplementowano w środowisku Matlab-Simulink poprzez modyfikację bloku o nazwie PM Synchronous Motor Drive z biblioteki SimPowerSystems.



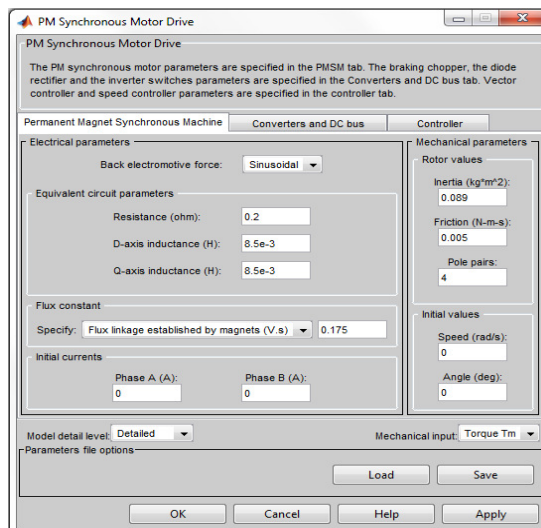
Rys.1. Postać graficzna modelu symulacyjnego w środowisku Matlab-Simulink [5]

Modyfikacja polegała na zmianie sposobu zasilania układu napędowego. Trójfazowe źródło napięcia zastąpiono baterią akumulatorów o parametrach zgodnych z baterią akumulatorów wykorzystywanych w układzie rzeczywistym.



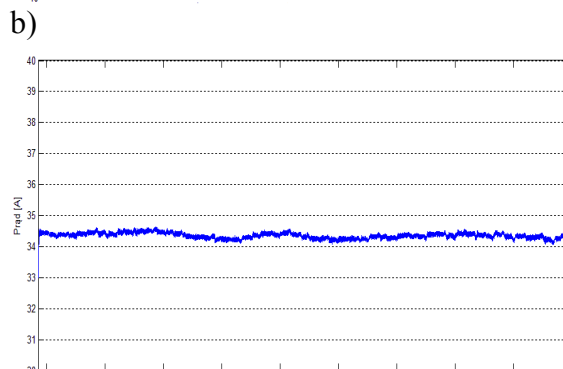
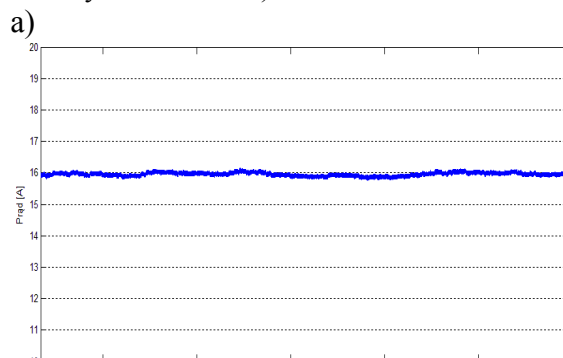
Rys. 2. Modyfikacja układu napędowego [5]

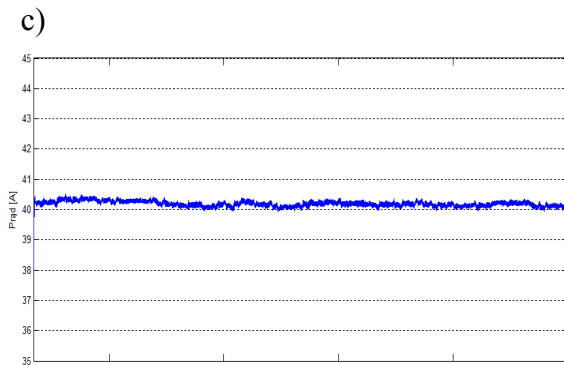
Model silnika PMSM typu SMwsd 200 S-4 został zbudowany na podstawie jego danych technicznych, wpisując jego parametry do bloku PM Synchronous Motor Drive.



Rys. 3. Okno bloku PM Synchronous Motor Drive [5]

W badaniach symulacyjnych rozpatrzono kilka przypadków realizacji hamowania z odzyskiem energii dla różnych prędkości i różnych momentów zewnętrznych. Wyniki tych badań przedstawiono na rys.4, na przykładzie trzech symulacji. Wyniki badań są następujące: dla symulacji a) wartość prądu zwracana do baterii akumulatorów wynosi 16A, dla symulacji b) 34A, a dla symulacji c) 40A. Na wykresie nie pokazano czasu, w którym następował odzysk energii z uwagi na to, iż próba była próbą statyczną, a nie dynamiczną (praca generatorowa ze stałym momentem).





Rys. 4. Przebiegi wartości prądu podczas hamowania elektrycznego [5]

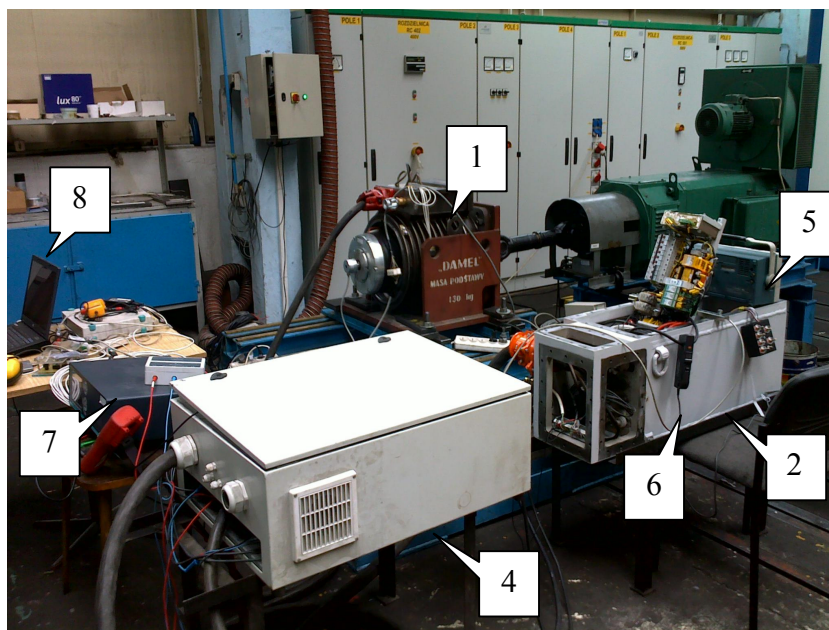
- a) $n=750$ obr./min. $M=30$ Nm
 b) $n=750$ obr./min. $M=70$ Nm
 c) $n=750$ obr./min. $M=90$ Nm

3. Badania stanowiskowe układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej

dany układ zasilająco-sterujący górniczej lokomotywy akumulatorowej oprzyrządowano specjalistyczną aparaturą pomiarową umożliwiającą przeprowadzenie badań. Należy powiedzieć, że obiekt badań był nowym rozwiązaniem napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12, mającym na celu zwiększenie efektywności pracy lokomotywy górniczej po przez poprawę sprawności zastosowanego układu napędowego.

Gdzie pod pozycją:

- 1 – silnik napędowy,
- 2 – moduł zasilająco-sterujący,
- 3 – hamownia,
- 4 – układ boczników do współpracy z analizatorem mocy,
- 5 – oscyloskop z analizatorem FFT,
- 6 – cęgi prądowe,
- 7 – analizator mocy,
- 8 – komputer do rejestracji wyników.



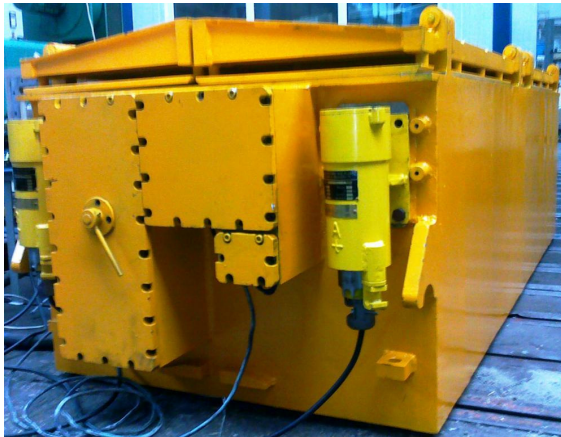
Rys. 4. Stanowisko badawcze [3]

3.1. Stanowisko badawcze

W Instytucie techniki Górniczej KOMAG prowadzone są prace w zakresie charakterystyki energii elektrycznej zwracanej do baterii akumulatorów podczas hamowania elektrycznego. W tym celu zbudowano stanowisko badawcze - rys.4. Umieszczono na nim obiekt badań, którym był układ zasilająco-sterujący, stanowiący integralną część układu napędowego górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12. Ba-

Głównym przyrządem pomiarowym na potrzeby niniejszych badań był oscyloskop wyposażony w analizator FFT, współpracujący z wysokiej klasy cęgami prądowymi. Cęgi prądowe (pozycja 6 na rys.4) zostały zainstalowane na przewodzie łączącym zacisk dodatni baterii akumulatorów z modułem zasilająco-sterującym. Analizator mocy posłużył jako dodatkowe urządzenie do zweryfikowania poprawności prowadzonych pomiarów. Na stanowisku umie-

szczono również baterię akumulatorów w wykonaniu przeciwwybuchowym – rys. 5. Bateria akumulatorów pokazana na rys.5 jest przewidziana do zastosowania w górniczych lokomotywach akumulatorowych typu Lea BM-12. Wyposażona jest w 72 ogniwa typu 8PzS1000 o pojemności 1000Ah każde, połączonych ze sobą szeregowo w celu uzyskania napięcie 144VDC.

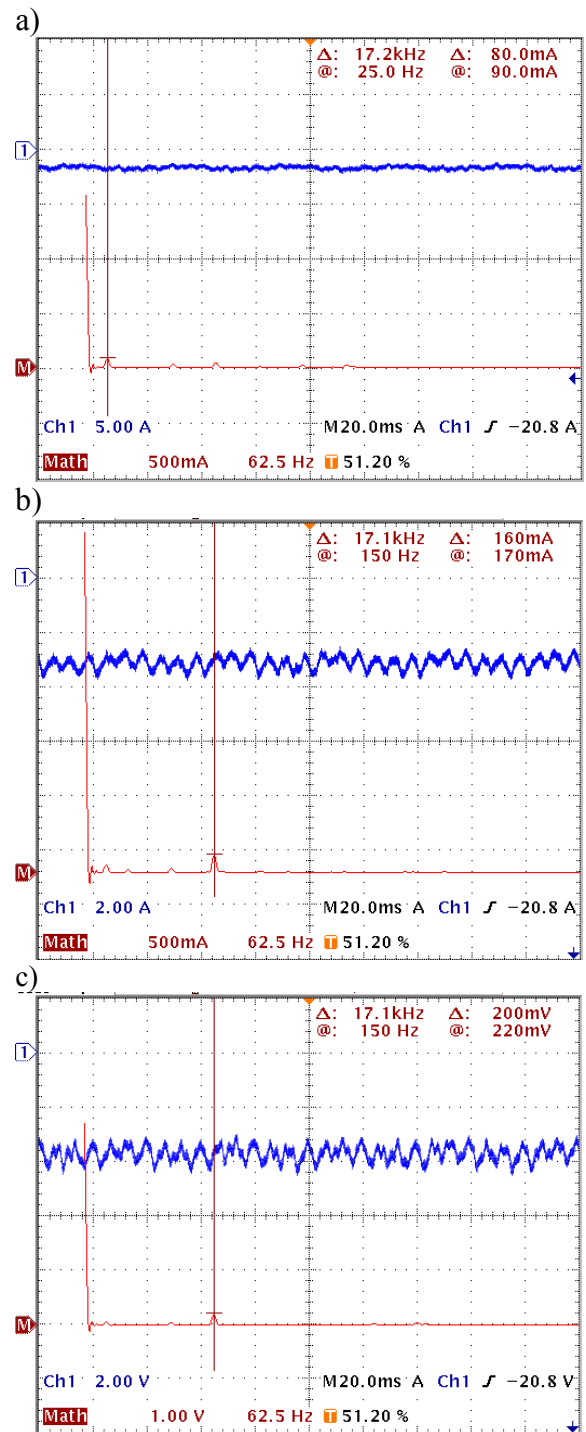


Rys. 5. Bateria akumulatorów w wykonaniu przeciwwybuchowym typu MBA-1 [4]

3.2. Przebieg badań

Badania prowadzono zgodnie z opracowaną metodą badań. Badania obejmowały rejestrację przebiegów prądu zwracanego do baterii akumulatorów podczas hamowania elektrycznego w określonych punktach pracy układu napędowego górniczej lokomotywy akumulatorowej. Pomiaru dokonywano przy prędkościach obrotowych napędu od 250 obr/min do 1500 obr/min (znamionowa prędkość obrotowa silnika PMSM) i przy wartościach momentu na wale uzyskujących 30Nm, 50Nm, 70Nm, 90Nm, oraz 115Nm (znamionowy moment silnika PMSM). Na rys. 6 zamieszczono oscylogramy z prób stanowiskowych w tych samych punktach pracy, jak wybrane wyniki symulacyjne. Pod kolorem czerwonym znajduje się przebieg prądu doładowującego baterię w wyniku hamowania elektrycznego, zaś kolorem czerwonym zaznaczono poziom odkształcenia tego też prądu w postaci wyższych harmonicznych.

Wyniki badań są następujące: dla próby a) wartość prądu zwracana do baterii akumulatorów wynosi 16A, dla próby b) 32A, a dla próby c) 42A.



Rys. 6. Oscylogram prądu podczas hamowania elektrycznego z rekuperacją energii silnika PMSM na stanowisku laboratoryjnym [5]

- a) $n=750$ obr./min. $M=30$ Nm
- b) $n=750$ obr./min. $M=70$ Nm
- c) $n=750$ obr./min. $M=90$ Nm

4. Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje komputerowe odzwierciedliły praktycznie w stu procentach przeprowadzone badania stanowiskowe. Badania same w sobie miały na celu pokazać rząd wielkości prądu zwracanego do baterii przy określonym momencie w trakcie „hamowania elektrycznego” – pracy generatorowej. Ponieważ na stanowisku laboratoryjnym nie ma możliwości przeprowadzenia hamowania elektrycznego zgodnie z układem rzeczywistym lokomotywy akumulatorowej, postanowiono posłużyć się układem pracy generatorowej z zadawaniem różnego momentu obciążenia przy różnych prędkościach obrotowych silnika PMSM. Jak wynika z przeprowadzonych symulacji oraz badań stanowiskowych badany układ napędowy wykorzystujący silnik synchroniczny z magnesami trwałymi umożliwia zwrot prądu w trakcie hamowania elektrycznego na poziomie bezpośrednio uzależnionym od momentu obciążenia. przy prędkości obrotowej równej 750 obr/min, czyli połowie prędkości znamionowej oraz momencie obciążenia również na poziomie połowy momentu znamionowego badanego silnika, uzyskuje się odzysk prądu o wartości ok 30A. Oczywiście proces hamowania jest procesem dynamicznym zanikającym, a więc wartość prądu maleje wraz z malejącą wartością prędkości, aż do zahamowania układu napędowego. Badany układ napędowy w przyszłości ma zostać zaimplementowany w górniczej lokomotywie akumulatorowej typu Lea BM-12, jednakże w ilości dwóch silników napędowych. Takie rozwiązanie umożliwi podwojenie wartości prądu doładowującego baterię, a tym samym (w zależności od kształtu tras podziemnych) odpowiednie wydłużenie czasu pracy bez konieczności zmiany baterii akumulatorów. W ramach dalszych prac przewiduje się ponowne przeprowadzenie badań po zabudowaniu nowego układu napędowego na obiekcie rzeczywistym w kopalni. Wówczas będzie można odpowiedzieć na pytanie ile prądu i w jakim czasie można odzyskać w procesie hamowania elektrycznego górniczej lokomotywy akumulatorowej wykorzystując silniki PMSM.

5. Literatura

[1]. Polnik B.: „*Inteligentne zarządzanie procesem rekuperacji energii górniczej lokomotywy akumulatorowej*”. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 12/2012r.

[2]. Polnik B.: „*Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych*”. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe nr 1/2012r.

[3]. Budzyński Z., Polnik B.: „*Jakość energii elektrycznej odzyskiwanej w procesie hamowania elektrycznego górniczej lokomotywy akumulatorowej jako jedno z kryteriów poprawy sprawności układu napędowego maszyny górniczej*”. XIV Krajowa Konferencja Elektryki Górniczej – materiały konferencyjne s.89-97.

[4]. Budzyński Z., Gąsior S., Niedworok A., Polnik B.: „*Badania wybranych rozwiązań napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej*”. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe nr 3/2011r.

[5]. Materiały własne Instytutu Techniki Górniczej KOMAG.