

**Andrzej Dzikowski, Tomasz Gąsior, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice
Zdzisław Budzyński, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice**

PORÓWNANIE PARAMETRÓW TRAKCYJNYCH LOKOMOTYWY KOPALNIANEJ WYPOSAŻONEJ W RÓŻNE TYPY NAPĘDU Z SILNIKAMI PRĄDU STAŁEGO I ZMIENNEGO

COMPARISON OF TRACTION PARAMETERS OF MINE LOCOMOTIVE EQUIPPED WITH VARIOUS TYPES OF DRIVE MOTOR DC AND AC

Abstract: The paper presents the electrical and timing characteristics of drive systems of battery locomotive weighing 12 tons, equipped with electric drive motors of various types. Analysis is done using the DC motor drive, used commonly in today locomotives and AC motors, asynchronous squirrel-cage and synchronous with permanent magnets. Presented results obtained by simulation of trains equipped with these types of drives, and energy balance was made on the sample transport route. Presented in this paper simulation results of different types of drives, the propulsion engines allow to choose the drive when upgrading mine locomotives.

1. Wstęp

Obecnie w Polsce nie są produkowane lokomotywy elektryczne akumulatorowe, a używane obecnie w kopalniach lokomotywy są już bardzo przestarzałe technologicznie, mocno wyeksploatowane, a tym samym awaryjne i wymagające częstych napraw i remontów. W najbliższym czasie będzie konieczna gruntowna modernizacja układów napędowych obecnie używanych lokomotyw, które są wyposażone w silniki szeregowy prądu stałego. Charakterystyka momentu napędowego silnika szeregowy prądu stałego pozwala na stosowanie układów napędowych bez skrzyni biegów. Jest to najważniejsza zaleta, dzięki której do dnia dzisiejszego w układach napędowych lokomotyw są stosowane silniki szeregowy, pomimo istnienia szeregu ich wad. W przemysłowych układach napędowych, gdzie nie jest wymagana tak szeroka regulacja prędkości obrotowej już dawno silnik prądu stałego został zastąpiony silnikami asynchronicznymi klatkowymi zasilanymi z przekształtników częstotliwości ze sterowaniem wektorowym. Z kolei w układach napędowych samochodów elektrycznych silnik szeregowy prądu stałego jest często zastępowany silnikiem synchronicznym prądu zmiennego z magnesami trwałymi zasilanym poprzez falownik napięcia ze sterowaniem wektorowym [1]. Rodzi się więc pytanie dlaczego w napędach lokomotyw nadal stosowany jest napęd silnikiem szeregowym prądu stałego? Odpowiedź na to pytanie powinna umożliwić symulacja układów napędowych lokomotywy wypo-

sażonej w powyższe trzy typy silników elektrycznych.

Niniejszy artykuł prezentuje charakterystyczne parametry trakcyjne możliwe do uzyskania w wyniku modernizacji napędu lokomotyw. Przedstawione wyniki symulacji nowych układów napędowych porównano ze zmodernizowanym napędem lokomotyw typu Lea BM-12 stosowanym w końcowym okresie produkcji, gdzie do regulacji prądu silnika napędowego zastosowano łącznik tyrystorowy.

2. Parametry modelu symulacyjnego składu pociągu i trasy transportowej

Symulowano jazdę składów pociągów zestawionych z lokomotywy typu Lea BM-12 o masie 12,5 Mg oraz 40 wozów o masie własnej 960 kg oraz ładowności 1700 kg. Masa składu pociągu pustego wynosiła więc 50,9 Mg, a pociągu pełnego 118,9 Mg. Założono trasę transportową o długości 3000 m i średnim nachyleniu 0,4%.

Symulacje komputerowe prowadzono przy użyciu programu symulacyjnego PSIM v.7.1, będącego symulatorem układów energoelektronicznych [2].

Symulacje prowadzono dla dwóch różnych warunków obciążenia lokomotywy:

1. Rozpędzanie lokomotywy obciążonej pustymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 50,9 Mg i jazda na trasie transportowej o łącznej długości 3000 m pod górę o nachyleniu 0,4%,

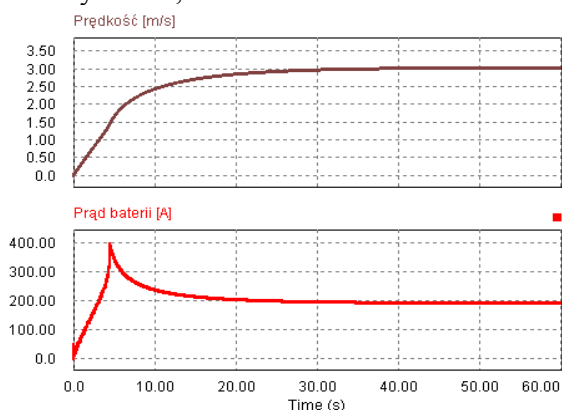
2. Rozpędzanie lokomotywy obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 118,9 Mg i jazda na trasie transportowej o łącznej długości 3000 m z góry o nachyleniu 0,4%.

Maksymalne dopuszczalne nachylenie torowiska w podziemiach kopalń wynosi 0,5%.

Dopuszczalna maksymalna prędkość składów pociągów w podziemiach kopalń wynosi 6 m/s.

3. Symulacja klasycznego układu napędowego lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 245

Jako pierwszą przeprowadzono symulację komputerową klasycznego napędu lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12 z silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 245 zasilanym poprzez łącznik tyrystorowy [3]. W powyższym układzie klasycznym w czasie rozruchu wartość prądu pobieranego przez silnik szeregowy z baterii akumulatorów jest ograniczana przez obwód łącznika tyrystorowego do wartości średniej równej 295 A, będącej wartością prądu jednogodzinnego zastosowanego silnika trakcyjnego. Dla takich warunków zasilania na rys.1 został przedstawiony wynik symulacji rozpędzania składu pociągu złożonego z lokomotywy Lea BM-12 i 40 pustych wagonów o parametrach podanych w pkt.2 pod górę o nachyleniu 0,4%.

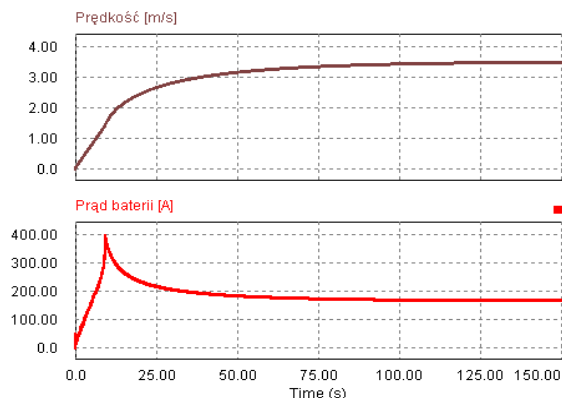


Rys. 1. Rozpędzanie pustego składu pociągu lokomotywa z silnikiem LDs 245

Jak wynika z rys.1 rozpędzanie składu pociągu do prędkości ustalonej wynoszącej 3 m/s trwa około 40 sekund. W tym czasie prąd pobierany z baterii akumulatorów maleje i stabilizuje się na wartości 191 A. W czasie jazdy pociągu pustego od punktu wyładowniczego do punktu załadowniczego po wzniosie 0,4% na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów

ładunek 53,1 Ah. Czas jazdy na tej trasie wynosi 995 sekund.

Na rys.2 został przedstawiony wynik symulacji rozpędzania składu pociągu złożonego z lokomotywy Lea BM-12 i 40 pełnych wagonów o parametrach podanych w pkt.2 z góry o nachyleniu 0,4%.



Rys. 2. Rozpędzanie pełnego składu pociągu lokomotywa z silnikiem LDs 245

Jak wynika z rys.2 rozpędzanie składu pociągu do prędkości ustalonej wynoszącej 3,5 m/s trwa około 120 sekund. W tym czasie prąd pobierany z baterii akumulatorów maleje i stabilizuje się na wartości 165 A. W czasie transportu urobku od punktu załadowniczego do punktu wyładowniczego po upadzie 0,4% na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 40,86 Ah. Transport ładunku na tej trasie trwa 873 sekundy.

Łącznie zatem czas przejazdu pełnej pętli transportowej wynosi 31 minut i 8 sekund oraz zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 93,96 Ah. Pojemność zastosowanej baterii akumulatorów wynosi 840 Ah. Jeśli przyjmiemy, że dopuszczalne rozładowanie baterii akumulatorów wynosi 80% jej pojemności, to ładunek ten wystarczy na pokonanie 7 pełnych tras transportowych.

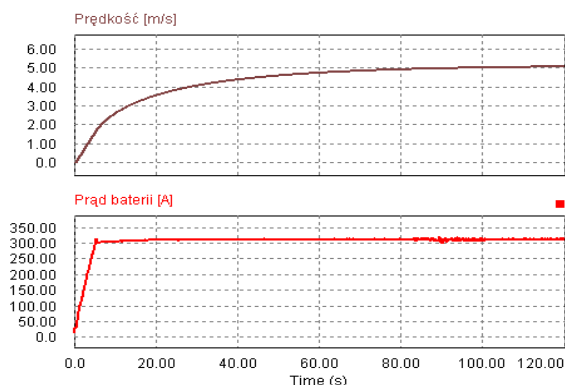
4. Symulacja układu napędowego lokomotywy z dwoma silnikami asynchronicznymi klatkowymi prądu zmiennego

Jedną z możliwych typów modernizacji akumulatorowych lokomotyw kopalnianych jest zastosowanie do ich napędu silników asynchronicznych klatkowych zasilanych poprzez falownik [3]. Silniki asynchroniczne klatkowe zasilane poprzez falownik napięcia są obecnie powszechnie używane do napędu tramwajów miejskich i trolejbusów w miejsce klasycznego

napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego [4,5].

Lokomotywa Lea BM-12 posiada dwie osie napędowe, więc ze względów mechanicznych lepiej jest zastosować dwa niezależne układy napędowe dla każdej osi. Silniki asynchroniczne klatkowe mają mniejszą przeciążalność momentem niż silniki szeregowo prądu stałego. Ponieważ moc jednogodzinna silnika szeregowo prądu stałego typu LDs 245 wynosi 38 kW zdecydowano się zastosować silniki asynchroniczne klatkowe o podobnej mocy, czyli około 19 kW każdy. Z szeregu produkowanych silników asynchronicznych klatkowych wybrano silniki o mocy 22 kW [6].

Na rys.3 przedstawiony jest wynik symulacji rozpędzania składu pociągu złożonego z lokomotywy, wyposażonej w napęd z silnikami asynchronicznymi klatkowymi o mocy 22 kW każdy i 40 pustych wagonów o parametrach podanych w pkt.2 pod górę o nachyleniu 0,4%.

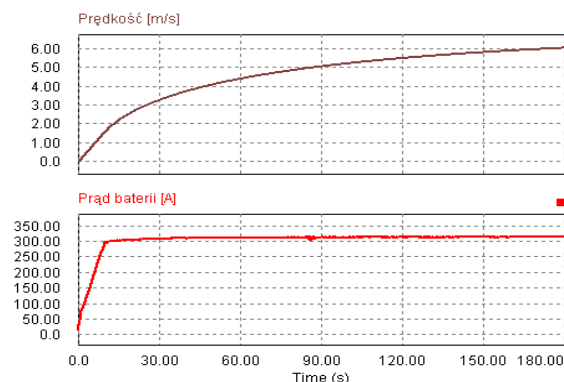


Rys. 3. Rozpędzanie pustego składu pociągu, lokomotywa z silnikami klatkowymi

Jak wynika z rys. 3, napęd z silnikami asynchronicznymi klatkowymi pozwala na rozpędzenie składu pociągu do prędkości ustalonej wynoszącej około 5,1 m/s, a więc wyższej niż napęd klasyczny o 70% w czasie około 120 sekund. Napęd z silnikami asynchronicznymi klatkowymi pobiera jednak przy tak wysokiej prędkości wyższy o 60% prąd z baterii akumulatorów, który stabilizuje się na wartości 310 A. W czasie jazdy pociągu pustego od punktu wyładowniczego do punktu załadowniczego po wzniesie 0,4% na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 52,32 Ah. Czas jazdy na tej trasie wynosi 606 sekund.

Na rys.4 został przedstawiony wynik symulacji rozpędzania składu pociągu złożonego z lokomotywy, wyposażonej w napęd z silnikami asynchronicznymi klatkowymi o mocy 22 kW

każdy i 40 pełnych wagonów o parametrach podanych w pkt.2 z góry o nachyleniu 0,4% .



Rys. 4. Rozpędzanie pełnego składu pociągu lokomotywa z silnikami klatkowymi

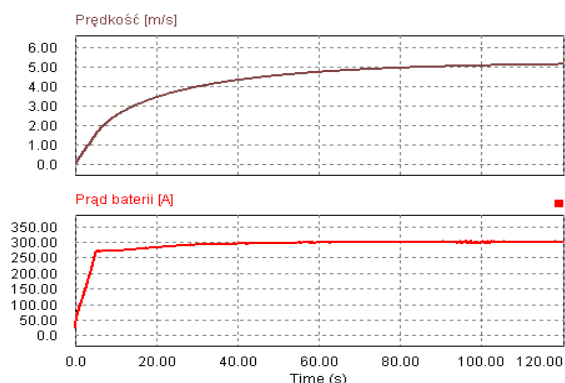
Jak wynika z rys.4 napęd z silnikami asynchronicznymi klatkowymi pozwala na rozpędzenie składu pociągu do maksymalnej dopuszczalnej w podziemiach kopalni prędkości wynoszącej 6 m/s, a więc wyższej niż napęd klasyczny o 70% w czasie około 180 sekund. Napęd z silnikami asynchronicznymi klatkowymi pobiera jednak przy tak wysokiej prędkości wyższy o 70% prąd z baterii akumulatorów, który stabilizuje się na wartości 285 A. W czasie transportu urobku od punktu załadowniczego do punktu wyładowniczego po upadzie 0,4% na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 42,82 Ah. Transport ładunku na tej trasie trwa 538 sekund.

Łącznie zatem czas przejazdu pełnej pętli transportowej wynosi 19 minut i 4 sekundy oraz zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 95,14 Ah. Czyli trasa transportowa jest pokonywana o 39% szybciej, przy podobnym bo tylko o 1% wyższym zużyciu ładunku z baterii akumulatorów w stosunku do napędu klasycznego. Zużycie ładunku pozwala również na pokonanie 7 pełnych tras transportowych.

5. Symulacja układu napędowego lokomotywy z dwoma silnikami synchronicznymi prądu zmiennego z magnesami trwałymi

Modernizację napędu lokomotyw kopalnianych można wykonać stosując nowoczesne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi typu PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). Silniki z magnesami trwałymi posiadają bardzo wysoką sprawność, nieosiągalną dla innych typów silników. Wynika to z faktu braku uzwojenia w wirniku maszyny, a tym samym

braku strat z tym związanych. Silniki PMSM posiadają bardzo dużą dynamikę oraz dużą przeciążalność. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi posiada również wady. Główną wadą jest konieczność stosowania falownika do zasilania silnika. Z tego względu silniki z magnesami nie są obecnie powszechnie dostępne jako uniwersalne silniki, gdyż bez falownika nie jest możliwy ich rozruch. Drugą poważną wadą silnika z magnesami trwałymi są trudności z pracą powyżej prędkości bazowej. Prędkość bazowa silnika to taka prędkość przy której pole magnetyczne wytworzone przez magnesy trwale indukuje w stojanie siłę elektromotoryczną (SEM) równą napięciu znamionowemu silnika. Praca powyżej prędkości bazowej jest możliwa, ale wymaga osłabienia pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwale. Aby uzyskać efekt osłabienia pola falownik zasilający musi wytworzyć składową prądu w osi d (płaszczyzna d-q związana z wirnikiem maszyny elektrycznej) skierowaną przeciwnie do pola magnesów. Dzięki osłabieniu pola silnik wytwarza mniejszą SEM i jest możliwy wzrost prędkości obrotowej silnika zasilanego napięciem znamionowym [7,8]. Ponieważ moc jednogodzinna silnika szeregowego prądu stałego typu LDs 245 wynosi 38 kW to zdecydowano zastosować dwa silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o mocy 19 kW każdy. Na rys.5 jest przedstawiony wynik symulacji rozpędzania składu pociągu złożonego z lokomotywy i 40 pustych wagonów o parametrach podanych w pkt.2 pod górę o nachyleniu 0,4% wyposażonej w napęd z silnikami PMSM.

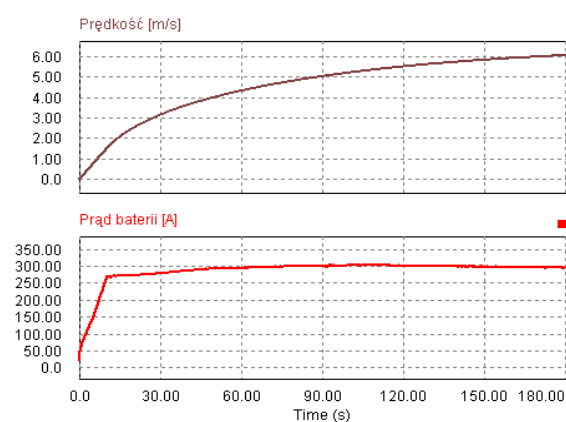


Rys. 5. Rozpędzanie pustego składu pociągu lokomotywa z silnikami PMSM

Jak wynika z rys.5 napęd z silnikami PMSM pozwala na rozpędzenie składu pociągu do prędkości ustalonej wynoszącej 5,25 m/s w czasie około 120 sekund. Napęd z silnikami

PMSM pobiera przy tak wysokiej prędkości nieco niższą w stosunku do napędu z silnikami asynchronicznymi klatkowymi wartość prądu z baterii akumulatorów, która stabilizuje się na wartości 300 A. W czasie jazdy pociągu pustego od punktu wyładowczego do punktu załadowczego po wzniosie 0,4% na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 49,48 Ah. Czas jazdy na tej trasie wynosi 594 sekundy.

Na rys.6 został przedstawiony wynik symulacji rozpędzania składu pociągu złożonego z lokomotywy i 40 pełnych wagonów o parametrach podanych w pkt.2 z góry o nachyleniu 0,4% wyposażonej w napęd z silnikami PMSM.



Rys. 6. Rozpędzanie pełnego składu pociągu lokomotywa z silnikami PMSM

Jak wynika z rys.6 napęd z silnikami PMSM pozwala na rozpędzenie składu pociągu do maksymalnej dopuszczalnej w podziemiach kopalń prędkości wynoszącej 6 m/s, w czasie około 180 sekund. Napęd z silnikami PMSM pobiera przy tak wysokiej prędkości nieco mniejszy w stosunku do napędu z silnikami asynchronicznymi klatkowymi, prąd z baterii akumulatorów, który stabilizuje się na wartości 270 A. W czasie transportu urobku od punktu załadowczego do punktu wyładowczego po upadzie 0,4% na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 40,79 Ah. Transport ładunku na tej trasie trwa 538 sekund.

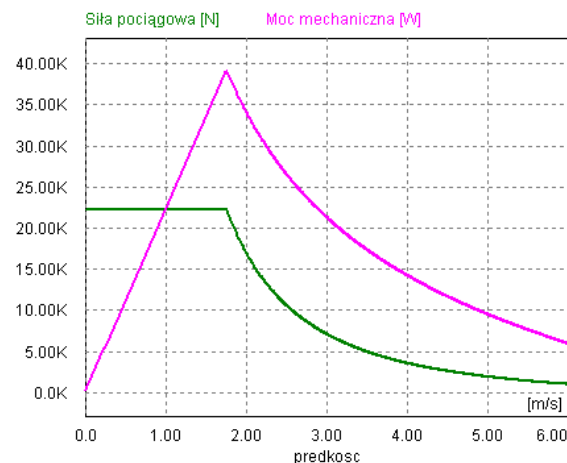
Łącznie zatem czas przejazdu pełnej pętli transportowej wynosi 18 minut i 52 sekundy oraz zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 90,27 Ah. Czyli trasa transportowa jest pokonywana o 39% szybciej i to przy zużyciu ładunku o 4% mniejszego z baterii akumulatorów w stosunku do napędu klasycznego. Zuży-

cie ładunku pozwala również na pokonanie 7 pełnych tras transportowych.

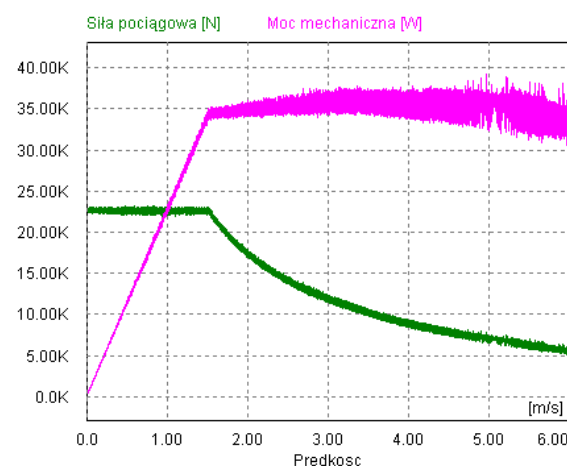
Zużycie ładunku na całej trasie transportowej przy napędzie z silnikami PMSM jest zbliżone do zużycia ładunku przy napędzie z silnikami asynchronicznymi klatkowymi. Wynika to z powodu wysokiej prędkości obrotowej silników PMSM i głębokiego wejścia do drugiej strefy a tym samym konieczności wytworzenia dużej składowej prądu i_d silnika koniecznej do dużego osłabienia pola magnetycznego. Gdyby ograniczyć prędkość jazdy pociągu to zużycie ładunku na trasie transportowej byłoby niższe z powodu obniżenia składowej prądu i_d silnika i tym samym niższego całkowitego prądu silnika. Przeprowadzona symulacja jazdy pociągu z prędkością ograniczoną do prędkości jaką osiąga skład z napędem konwencjonalnym wykazała zużycie ładunku na całej trasie transportowej wynoszące 84 Ah. Łączny czas przejazdu trasy transportowej wynosi 31 minut i 8 sekund. Uzyskano więc zużycie ładunku o 7% niższe w stosunku do przejazdu z pełną prędkością oraz możliwość pokonania 8 pełnych tras transportowych.

6. Podsumowanie

Porównując symulowane układy napędowe można stwierdzić, że układy napędowe z silnikami prądu zmiennego zasilane poprzez falowniki napięcia pozwalają na uzyskiwanie znacząco (średnio o 70%) wyższych prędkości transportowych składów pociągów w stosunku do napędu klasycznego z silnikiem szeregowym prądu stałego przy podobnym zużyciu ładunku elektrycznego z baterii akumulatorów. Wyższa prędkość transportowa lokomotywy z napędem z silnikami prądu zmiennego jest uzyskiwana dzięki utrzymywaniu stałej mocy napędu pomimo zwiększania prędkości, co jest niemożliwe dla napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego. Na rys.7 jest przedstawiona charakterystyka siły pociągowej i mocy napędu lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem szeregowym typu LDs 245, a na rys.8 jest przedstawiona charakterystyka siły pociągowej i mocy napędu lokomotywy z silnikami PMSM.



Rys. 7. Siła pociągowa i moc mechaniczna lokomotywy z silnikiem prądu stałego



Rys. 8. Siła pociągowa i moc mechaniczna lokomotywy z silnikami PMSM

Jak wynika z rys.7 lokomotywa z napędem za pomocą silnika prądu stałego charakteryzuje się stałą siłą pociągową do prędkości 1,7 m/s. Powyżej tej prędkości siła pociągowa szybko maleje, podobnie jak moc mechaniczna. Napęd lokomotywy z silnikami prądu zmiennego PMSM charakteryzuje się innymi własnościami, co przedstawia rys.8. Do prędkości 1,5 m/s lokomotywa dysponuje stałą siłą pociągową, a powyżej tej prędkości lokomotywa dysponuje stałą mocą mechaniczną i wolniej zmniejszającą się siłą pociągową w stosunku do napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego.

Podobne zużycie ładunku elektrycznego z baterii akumulatorów dla napędu z silnikami asynchronicznymi prądu zmiennego o wyższej sprawności ($\eta_n = 91,5\%$) w stosunku do napędu z silnikiem prądu stałego ($\eta_n = 87,7\%$) jest związane z dodatkowymi stratami mocy w tranzystorowym falowniku napięcia. W układzie klasycznego napędu z silnikiem szerego-

wym prądu stałego przy średnich i wyższych prędkościach, przy których silnik pracuje na swojej charakterystyce naturalnej następuje mostkowanie łącznika tyrystorowego i tym samym eliminacja występujących podczas jego pracy strat energii. W układzie napędowym z silnikami prądu zmiennego falownik napięcia musi pracować cały czas, poza tym 6-cio tranzystorowy mostek falownika napięcia charakteryzują się większą mocą strat niż łącznik tyrystorowy. Tak więc pomimo wyższej sprawności silników prądu zmiennego sprawność całego układu napędowego jest podobna.

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że modernizacja układu napędowego lokomotywy elektrycznej kopalnianej typu Lea BM-12 przy pomocy zarówno silników asynchronicznych klatkowych jak i silników z magnesami trwałymi zasilanymi poprzez falownik napięcia daje podobne rezultaty. Przy czym silniki asynchroniczne klatkowe są ogólnie dostępne, natomiast silniki z magnesami trwałymi są obecnie wytwarzane tylko na zamówienie. Zastosowanie silników z magnesami trwałymi ma również dodatkowe wady, a mianowicie potrzeba głębokiego wejścia do drugiej strefy sterowania, konieczna w napędach lokomotyw, wiąże się z pewnymi konsekwencjami, a nawet zagrożeniami. Głębokie osłabienie pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe wiąże się z koniecznością wytworzenia dużej składowej i_d prądu. Składowa i_d prądu pozostaje w drugiej strefie stała, aby uzyskać stałą wartość mocy mechanicznej. To powoduje wzrost prądu całkowitego silnika, a tym samym zwiększone straty i zwiększone nagrzewanie się stojana. Dodatkowe zagrożenie występuje, gdy nastąpi awaryjne wyłączenie falownika zasilającego silnik w czasie jazdy lokomotywy z dużą prędkością. Wtedy na zaciskach silnika pojawia się dużo większe od napięcia zasilania napięcie sil-

nika pracującego prądnicowo z pełnym polem wzbudzenia od magnesów trwałych.

Literatura

- [1]. Strony internetowe poświęcone samochodom elektrycznym: <http://www.auto-elektryczne.pl/sam.html>.
- [2]. Symulator układów energoelektronicznych PSIM v. 7.1: <http://www.powersimtech.com/download.html>.
- [3]. Kalus M., Skoczkowski T.: „Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego”, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2003.
- [4]. Materiały o napędach tramwajów i trolejbusów na stronach internetowych firmy MEDCOM: http://www.medcom.com.pl/main/produkty_trakeja_kolejowa.php.
- [5]. Materiały o zmodernizowanych napędach tramwajów i trolejbusów na stronach internetowych Zakładu Elektroniki Przemysłowej ENIKA Sp. z o.o.: <http://www.enika.pl/tresc/9/>.
- [6]. Strony internetowe producenta silników elektrycznych firmy CELMA S.A.: <http://www.cantonigroup.com/pl/motors/celma/series/109/trójfazowe-silniki-klatkowe-przeciwybuchowe-dla-przemysłu-górniczego/>.
- [7]. Rossa R., Król E.: „Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, s.125-129.
- [8]. Strony internetowe Branżowego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Maszyn Elektrycznych KOMEL: http://www.komel.katowice.pl/pm_maszyny.html

Autorzy

dr inż. Andrzej Dzikowski
a.dzikowski@emag.pl
 mgr inż. Tomasz Gąsior
t.gasior@emag.pl
 Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
 mgr inż. Zdzisław Budzyński
zbudzynski@komag.eu
 Instytut Techniki Górniczej KOMAG