

Andrzej Dzikowski, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice
Piotr Dukalski, Robert Rossa
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

SYMULACJE PRACY NAPĘDU Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM WZBUDZANYM MAGNESAMI TRWAŁYMI PRZEZNACZONEGO DO ZASTOSOWANIA W LOKOMOTYWIE AKUMULATOROWEJ TYPU LEA BM-12

SIMULATION OF OPERATION OF DRIVE WITH PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MOTOR INTENDED FOR USE IN BATTERY LOCOMOTIVE LEA BM-12

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych napędu lokomotywy akumulatorowej typu Lea BM-12, w której zastąpiono silnik szeregowy prądu stałego silnikiem synchronicznym wzbudzany magnesami trwałymi typu IPMSM. W artykule przedstawiona została również analiza zalet zastosowania silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi w napędzie lokomotywy górniczej z przedstawieniem możliwych do uzyskania parametrów pracy lokomotywy oraz możliwych do uzyskania parametrów trakcyjnych składów pociągów kopalnianych przy zastosowaniu nowego napędu w stosunku do napędu oryginalnego.

Abstract: The article presents the results of simulation battery locomotives type Lea BM-12, which was replaced serial DC motor by a permanent magnet synchronous motor type IPMSM. The article also presents the analysis of the possible to get an advantages of the use of permanent magnet synchronous motor to drive mining locomotives. Operating parameters and possible to achieve traction parameters of the mine trains using the new drive in relation to the original drive the article presented too.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi IPMSM, przemiennik częstotliwości, lokomotywa akumulatorowa

Keywords: Interior mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, inverter, battery locomotive

1. Wstęp

Węgiel kamienny jest obecnie wydobywany z coraz to głębszych pokładów. Im głębszy pokład tym zwykle pogarszają się warunki środowiskowe poprzez wzrost temperatury i wilgotności. Zwiększa się także występujące stężenie metanu i w związku z tym wzrasta zagrożenie wybuchem. W takich warunkach do transportu urobku na duże odległości są stosowane lokomotywy akumulatorowe.

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 (niska sprawność, szybko malejący moment napędowy ze wzrostem prędkości). W układach napędowych samochodów elektrycznych najpowszechniej są obecnie stosowane silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi typu IPMSM zasilane poprzez falowniki napięcia ze sterowaniem wektorowym [8]. Rodzi się więc pytanie dlaczego w napędach lokomotyw nadal stosowany jest napęd silnikiem szeregowy prądu stałego? Być może lepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie takich silników jak w samochodach, oczywiście przystosowanych do ciężkich warunków pracy panujących w podziemiach kopalń [7]. Odpowiedź na to pytanie powinna umożliwić symulacja układów napędowych lokomotywy wyposażonej w powyższe dwa typy silników elektrycznych.

Niniejszy artykuł prezentuje charakterystyczne parametry trakcyjne możliwe do uzyskania w wyniku takiej modernizacji napędu lokomotywy typu Lea BM-12.

2. Parametry modelu symulacyjnego składu pociągu i trasy transportowej

Symulowano jazdę składów pociągów ciągniętych lokomotywą typu Lea BM-12 o masie własnej 12,5 Mg, średnicy kół napędowych 560 mm oraz przełożeniu przekładni głównej 1:19,26.

Symulacje komputerowe prowadzono przy użyciu programu symulacyjnego PSIM będącego symulatorem układów energoelektronicznych [9].

Symulacje prowadzono dla dwóch różnych warunków obciążenia lokomotywy, wynikających z transportu urobku od punktu załadowczego do punktu wyładowczego:

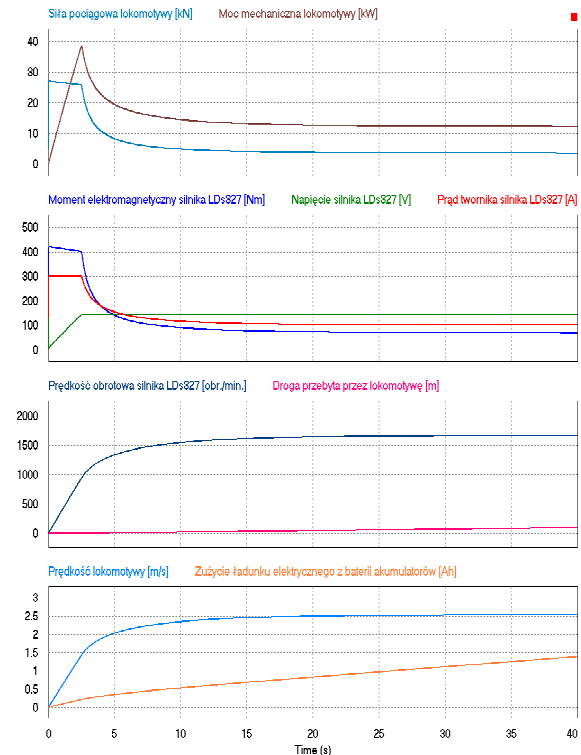
1. Rozpędzanie lokomotywy obciążonej pustymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 40 Mg i jazda na trasie transportowej o łącznej długości 1000 m pod górę o nachyleniu 0,4%.
2. Rozpędzanie lokomotywy obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 100 Mg i jazda na trasie transportowej o łącznej długości 1000 m z góry o nachyleniu 0,4%.

Maksymalne nachylenie torowiska w podziemiach kopalń wynosi 0,5%, a dopuszczalna prędkość składów pociągów wynosi 6 m/s.

3. Badania symulacyjne klasycznego układu napędowego lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 327

Jako pierwszą przeprowadzono symulację komputerową klasycznego napędu lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12 z silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 327 zasilanym poprzez łącznik tyrystorowy [1][6]. W powyższym układzie w czasie rozruchu wartość prądu pobieranego przez silnik szeregowy z baterii akumulatorów jest ograniczana przez obwód łącznika tyrystorowego do wartości średniej równej 300 A, będącej wartością prądu jednogodzinnego zastosowanego silnika trakcyjnego. Prąd rozruchowy silnika został ograniczony do wartości 300 A, aby nie przeciążyć silnika i przekładni mechanicznych. Przy tej wartości prądu silnik dysponuje na tyle dużym momentem, że zrywa przyczepność kół napę-

dowych lokomotywy przy współczynniku tarcia kół o szyny wynoszącym 0,2. Dla takich warunków zasilania na rys.1 są przedstawione wyniki symulacji rozpędzania i jazdy lokomotywy pod górę o nachyleniu 0,4% obciążonej pustymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 40 Mg.

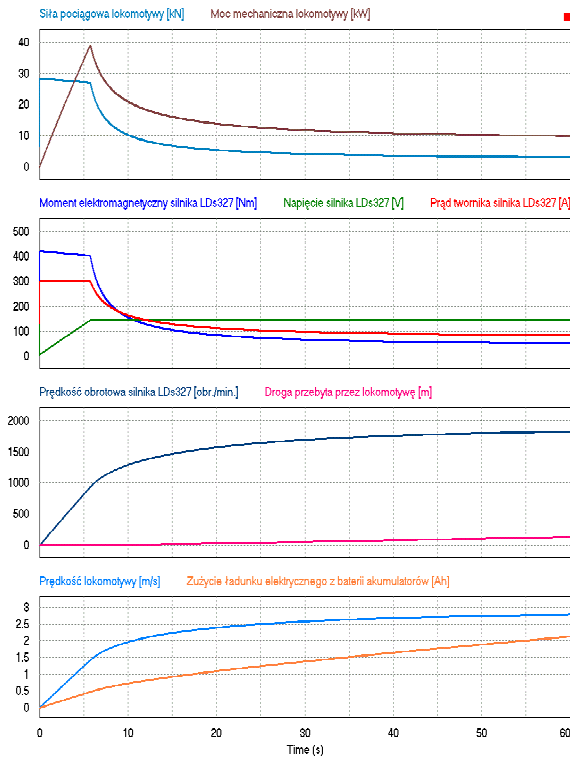


Rys. 1. Rozpędzanie pustego składu pociągu o masie całkowitej 40 Mg lokomotywą Lea BM-12 z silnikiem LDs 327 po wzniosie 0,4%

W tym przypadku skład pociągu osiąga maksymalną prędkość 2,54 m/s, przy której silnik napędowy uzyskuje prędkość obrotową 1666 obr./min, która jest znacznie niższa od dopuszczalnej, określonej przez producenta na 2490 obr./min. Na trasie transportowej o długości 1000 m lokomotywa zużywa z baterii akumulatorów 11,34 Ah.

Na rys.2 są przedstawione wyniki symulacji rozpędzania i jazdy lokomotywy typu Lea BM-12 napędzanej silnikiem LDs 327 obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 100 Mg z góry o nachyleniu 0,4%.

W tym przypadku skład pociągu osiąga maksymalną prędkość 3,01 m/s, przy której silnik napędowy uzyskuje prędkość obrotową 1976 obr./min, czyli niższą od dopuszczalnej. Na trasie transportowej o długości 1000 m lokomotywa zużywa z baterii akumulatorów 7,79 Ah.



Rys. 2. Rozpędzanie pełnego składu pociągu o masie całkowitej 100 Mg lokomotywą Lea BM-12 z silnikiem LDs 327 po upadzie 0,4%

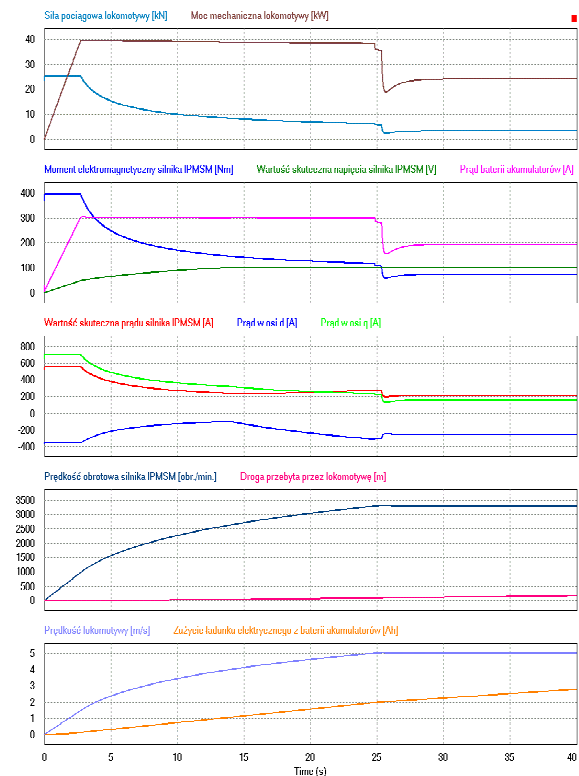
Rysunek 1 i 2 szczegółowo przedstawiają zależności siły pociągowej, mocy mechanicznej, drogi przebytej, prędkości i zużycia Ah przez lokomotywę, a także momentu elektromagnetycznego, napięcia i prądu twornika oraz prędkości obrotowej silnika napędowego lokomotywy.

4. Badania symulacyjne układu napędowego lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem synchronicznym wzbudzanym magnesami trwałymi typu IPMSM

Dla potrzeb symulacji napędu z silnikiem IPMSM założono, że w strefie regulacji prędkości obrotowej silnika bez osłabiania strumienia magnetycznego, silnik jest sterowany przy zachowaniu optymalnego stosunku wartości momentu do prądu silnika, tzn. że w tej strefie regulacji prędkości obrotowej utrzymywany jest optymalny kąt fazowy wskazu prądu silnika względem strumienia [4].

Moment maksymalny silnika napędowego został ograniczony do wartości 396 Nm poprzez ograniczenie maksymalnej wartości tzw. prądu poprzecznego silnika (prąd w osi q po transformacji trójfazowych, symetrycznych prądów zasilania silnika i_a , i_b , i_c do

dwufazowego układu odniesienia $dq0$) do wartości $I_q = 700$ A. Przy powyższym ograniczeniu model silnika napędowego wytwarza na tyle duży moment napędowy na kołach lokomotywy, że znajdują się one na granicy przyczepności przy założonym współczynniku tarcia kół o suche szyny wynoszącym 0,2. Dodatkowo, ze względu na to, że podczas zwiększania prędkości falownik sterujący silnikiem pobiera z baterii akumulatorów coraz to większy prąd, to aby nie przeciążać baterii akumulatorów, które są zabezpieczone bezpiecznikiem topikowym o prądzie znamionowym 350 A to maksymalny prąd pobierany przez falownik zasilający silnik, przy założonej sprawności falownika wynoszącej 95% został ograniczony do wartości 300 A. Na rys.3 zostały przedstawione wyniki symulacji rozpędzania i jazdy lokomotywy Lea BM-12 napędzanej modelem silnika IPMSM obciążonej pustymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 40 Mg pod górę o nachyleniu 0,4%.



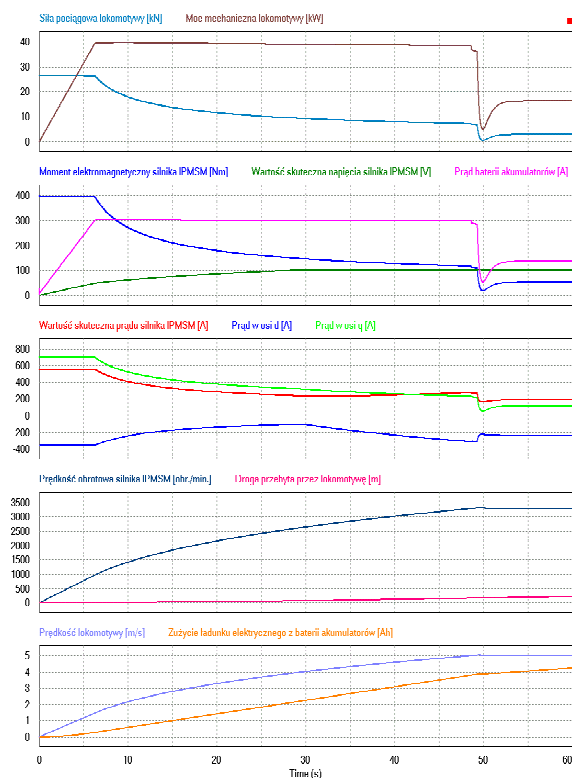
Rys. 3. Rozpędzanie pustego składu pociągu o masie całkowitej 40 Mg lokomotywą Lea BM-12 z silnikiem IPMSM po wzniosie 0,4%

Rysunek 3 szczegółowo przedstawia zależności siły pociągowej, mocy mechanicznej, prądu obciążenia baterii akumulatorów, drogi przebytej, prędkości i zużycia Ah przez lokomotywę,

a także momentu elektromagnetycznego, wartości skutecznej napięcia, wartości skutecznej prądu, prądu w osi d i prądu w osi q oraz prędkości obrotowej silnika napędowego lokomotywy.

W wyniku rozpędzania, po nieco ponad 25-ciu sekundach, silniki osiągają prędkość obrotową wynoszącą 3285 obr./min i mogłyby dalej zwiększać swoją prędkość, jednak przy tej prędkości lokomotywa uzyskuje już prędkość liniową wynoszącą 5 m/s, która jest, jak przyjęto maksymalną, bezpieczną prędkością lokomotywy. Na trasie transportowej o długości 1000 m lokomotywa zużywa z baterii akumulatorów 11,82 Ah.

Na rys.4 zostały przedstawione wyniki symulacji rozpędzania i jazdy lokomotywy typu Lea BM-12 z góry o nachyleniu 0,4% napędzanej modelem silnika IPMSM obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 100 Mg.



Rys. 4. Rozpędzanie pełnego składu pociągu o masie całkowitej 100 Mg lokomotywą Lea BM-12 z silnikiem IPMSM po upadzie 0,4%

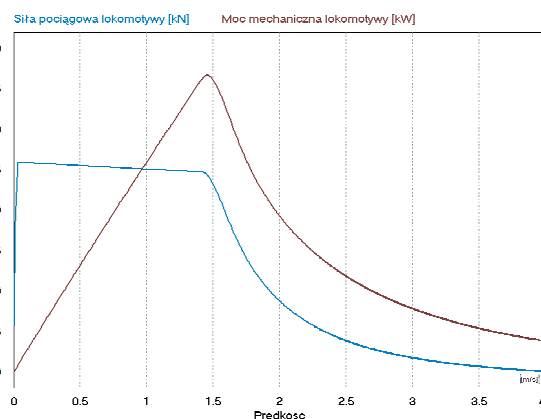
Rysunek 4 szczegółowo przedstawia te same zależności co rys.3. W wyniku rozpędzania po niecałych 50-ciu sekundach silniki osiągają prędkość obrotową wynoszącą 3285 obr./min i mogłyby dalej zwiększać swoją prędkość, jed-

nak przy tej prędkości lokomotywa uzyskuje już prędkość liniową wynoszącą 5 m/s, która jest, jak przyjęto maksymalną, bezpieczną prędkością lokomotywy. Na trasie transportowej o długości 1000 m lokomotywa zużywa z baterii akumulatorów 10,22 Ah.

Analizując poszczególne parametry przedstawione na rysunku 3 i 4 można sformułować następujące wnioski. Ograniczenie prądu w osi q do wartości $I_q = 700$ A powoduje ograniczenie wartości skutecznej prądu silnika sterowanego przy optymalnym kącie β w pierwszej strefie do wartości $I_{sk} = 554$ A. Jest to wartość niższa od prądu godzinowego modelu silnika IPMSM wynoszącego $I_{Ihsk} = 620$ A. Ponieważ rozpędzanie nawet pełnego składu pociągu trwa niecałe 50 sek. (rys.4) to nie ma możliwości przegrzania się silnika. Ograniczenie wartości prądu obciążenia baterii akumulatorów do wartości $I_{DC} = 300$ A spowodowało, że moc mechaniczna lokomotywy jest ograniczona do wartości $P_m = 40$ kW.

5. Porównanie układów napędowych lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem typu LDs 327 oraz z silnikiem IPMSM

Na rys.5 przedstawione zostały przebiegi siły pociągowej i mocy mechanicznej lokomotywy Lea BM-12 wyposażonej w napęd za pomocą silnika prądu stałego typu LDs 327.

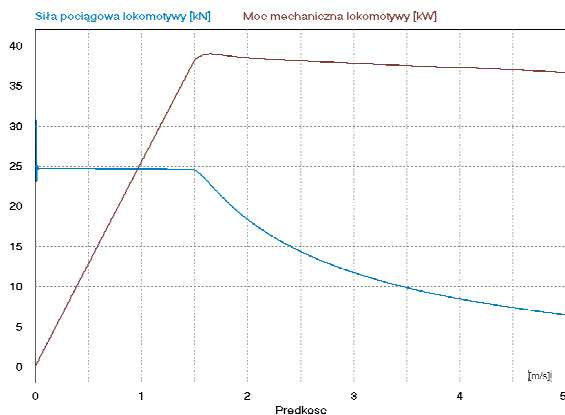


Rys. 5. Siła pociągowa i moc mechaniczna lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 327

Jak wynika z rys.5 lokomotywa z napędem za pomocą silnika prądu stałego charakteryzuje się stałą siłą pociągową do prędkości 1,4 m/s. Powyżej tej prędkości siła pociągowa szybko maleje, podobnie jak moc mechaniczna.

Na rys.6 przedstawione zostały przebiegi siły pociągowej i mocy mechanicznej lokomotywy

Lea BM-12 wyposażonej w napęd za pomocą silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi typu IPMSM.



Rys. 6. Siła pociągowa i moc mechaniczna lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem synchronicznym wzbudzanym magnesami trwałymi typu IPMSM

Napęd lokomotywy z silnikiem typu IPMSM charakteryzuje się innymi własnościami, co przedstawia rys.6. Do prędkości 1,5 m/s lokomotywa dysponuje stałą siłą pociągową, a powyżej tej prędkości lokomotywa dysponuje w miarę stałą mocą mechaniczną, a tym samym i wolniej zmniejszającą się siłą pociągową w stosunku do napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego [3][5].

W przypadku lokomotyw akumulatorowych bardzo ważnym parametrem jest zużycie amperogodzin z baterii akumulatorów na trasie transportowej. Poniżej w tab.1 są zamieszczone parametry zużycia amperogodzin z baterii akumulatorów przez lokomotywę na trasie transportowej w zależności od zastosowanego silnika napędowego.

Jak przedstawia tab.1 lokomotywa z silnikiem IPMSM jadąc z pustymi wagonami o masie całkowitej składu wynoszącej 40 Mg na trasie transportowej o długości 1000 m w kierunku punktu załadunkowego przy średnim nachyleniu torowiska 0,4% pod górę zużywa z baterii akumulatorów niewiele więcej amperogodzin (11,82 Ah w stosunku do 11,34 Ah), przy znacznie większej prędkości transportowej (5 m/s w stosunku do 2,54 m/s).

W przypadku natomiast jazdy lokomotywy z pełnymi wagonami o masie całkowitej składu wynoszącej 100 Mg, na trasie transportowej o długości 1000 m w kierunku punktu wyładunkowego, przy średnim nachyleniu torowiska 0,4% z góry lokomotywa zużywa z baterii

akumulatorów znacznie więcej amperogodzin (10,22 Ah w stosunku do 7,79 Ah), przy znacznie większej prędkości transportowej (5 m/s w stosunku do 3,01 m/s).

Tab. 1. Porównanie parametrów transportowych lokomotywy Lea BM-12 z dwoma typami silników napędowych

| Warunki transportowe | Skład 40 Mg po wzniosie 0,4% na trasie 1000 m | | Skład 100 Mg po upadzie 0,4% na trasie 1000 m | |
|---------------------------|---|-----------|---|-----------|
| | LDs327 | IPMSM 180 | LDs327 | IPMSM 180 |
| Typ silnika napędowego | LDs327 | IPMSM 180 | LDs327 | IPMSM 180 |
| Maksymalna prędkość [m/s] | 2,54 | 5 | 3,01 | 5 |
| Zużycie amperogodzin [Ah] | 11,34 | 11,82 | 7,79 | 10,22 |

6. Podsumowanie

Porównując symulowane układy napędowe można stwierdzić, że układ napędowy lokomotywy z silnikiem synchronicznym wzbudzanym magnesami trwałymi typu IPMSM pozwala na uzyskiwanie znacząco (średnio o 80%) wyższych prędkości transportowych składów pociągów w stosunku do napędu klasycznego z silnikiem szeregowym prądu stałego. Wyższa prędkość transportowa lokomotywy z napędem z silnikiem IPMSM uzyskiwana jest dzięki utrzymywaniu w miarę stałej mocy napędu pomimo zwiększania prędkości, co nie jest możliwe dla napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego (rys.5 i rys.6). Zwiększone zużycie amperogodzin na trasie transportowej przez lokomotywę wyposażoną w silnik IPMSM średnio o 15% wymaga zwiększenia pojemności baterii akumulatorów o co najmniej 15% w stosunku do używanej obecnie, aby nie zmniejszyła się całkowita długość transportu urobku na jednym ładowaniu baterii akumulatorów. Przy obecnie stosowanej w lokomotywie typu Lea BM-12 baterii akumulatorów o pojemności 840 Ah nowa bateria musiałaby mieć pojemność rzędu 1000 Ah, ogniwa o takiej pojemności są już obecnie dostępne [2].

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że modernizacja układu napędowego lokomotywy typu Lea BM-12 z zastosowaniem silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi pozwala na uzyskanie lepszych parametrów transportowych, przede wszystkim znacznie wyższych prędkości transportowych.

Zastosowanie silników z magnesami trwałymi ma również niestety wady, a mianowicie potrzeba głębokiego wejścia do drugiej strefy sterowania, konieczna w napędach lokomotyw, wiąże się z zagrożeniem wystąpienia napięcia wyższego od napięcia zasilania silnika pracującego prądnicowo z pełnym polem wzbudzenia od magnesów trwałych w czasie awaryjnego wyłączenia falownika zasilającego silnik podczas jazdy lokomotywy z dużą prędkością. W takim przypadku rozwiązaniem jest zastosowanie styczników rozłączających.

W kolejnej publikacji z tej serii autorzy przedstawiają analizę i wyniki symulacji lokomotywy Lea BM-12 z silnikiem typu IPMSM wyposażoną w nowoczesną baterię akumulatorów, z większą wydajnością prądową, co pozwoli zobrazować pełny potencjał silnika typu IPMSM w napędzie lokomotywy.

Praca współfinansowana ze środków NCBiR zgodnie z umową PBS2/B4/10/2014 jako projekt badawczy pt.: „Wprowadzenie wysokosprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu dołowych maszyn górniczych”.

Literatura

- [1]. A. Dzikowski: „Parametry układów napędowych z silnikami prądu stałego i zmiennego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej”, Czasopismo Naukowo-Techniczne – Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa MIAG, nr 3/2011, s.13-20.
- [2]. Z. Budzyński, S. Gąsior, A. Niedworok, B. Polnik: „Badania wybranych rozwiązań napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 91/2011, str. 9-14.
- [3]. A. Dzikowski, T. Gąsior, Z. Budzyński: „Porównanie parametrów trakcyjnych lokomotywy kopalnianej wyposażonej w różne typy napędu z silnikami prądu stałego i zmiennego”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 92/2011, str. 157-162.
- [4]. R. Rossa, E. Król: „Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „e-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 4/2012 (97).
- [5]. A. Dzikowski, M. Hefczyc, A. Kozłowski: „Badania symulacyjne wybranych napędów maszyn górniczych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi”, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 1/2014, str. 51-59.
- [6]. A. Dzikowski: „Badanie wpływu stopnia wzbudzenia silnika trakcyjnego na parametry użytkowe

lokomotywy i składu pociągu”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 101/2014, str. 13-18.

[7]. P. Dukalski, S. Gawron, A. Dzikowski: „Wysokosprawne silniki z magnesami trwałymi w napędach górniczych”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 102/2014, str. 77-83.

[8]. R. Rossa: „Zaawansowane rozwiązania techniczne w napędzie elektrycznym „e-Kit” dla miejskiego samochodu osobowego”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 102/2014, str. 145-149.

[9]. Symulator układów energoelektronicznych PSIM: <http://www.powersimtech.com/download.html>

Autorzy

dr inż. Andrzej Dzikowski
 a.dzikowski@emag.pl
 Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
 dr inż. Robert Rossa
 r.rossa@komel.katowice.pl
 mgr inż. Piotr Dukalski
 p.dukalski@komel.katowice.pl
 Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
 KOMEL