

Andrzej Dzikowski, Marek Hefczyc, Artur Kozłowski
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice

ENERGOOSZCZĘDNE NAPĘDY MASZYN GÓRNICZYCH Z SILNIKAMI SYNCHRONICZNYMI Z MAGNESAMI TRWAŁYMI ZASILANYMI Z PRZEMIENNIKÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

ENERGY SAVING DRIVES OF MINING MACHINERY WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR SUPPLIED FROM FREQUENCY CONVERTERS

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki przeglądu górniczych zastosowań oraz wyniki badań symulacyjnych dotyczących zastosowania silników synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu maszyn i urządzeń górniczych. Uzyskane wyniki badań porównano z wynikami jakie obecnie uzyskują układy napędowe maszyn i urządzeń górniczych przy stosowaniu silników asynchronicznych klatkowych zasilanych poprzez przemienniki częstotliwości. Obciążenia występujące w układach napędowych maszyn i urządzeń górniczych charakteryzują się dużą dynamiką i zmiennością. Uzyskane parametry mechaniczne, elektryczne, ekonomiczne i przede wszystkim termiczne napędu przy zastosowaniu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi w miejsce stosowanego obecnie powszechnie silnika asynchronicznego klatkowego zasilanego poprzez przemiennik częstotliwości przemawiają za rozpoczęciem stosowania tego typu silników w napędach maszyn i urządzeń górniczych.

Abstract: The paper presents the results of the review and results of the research the use of energy-efficient synchronous motors with permanent-magnet in drives mining machinery. The results were compared with currently used to drives mining machinery asynchronous squirrel-cage motors supplied from frequency converters. The loads occurring in the mining machinery are characterized by high dynamics and variability. The achieved dynamic and economical parameters and, most importantly, thermal parameters of the drive equipped with the permanent-magnet synchronous motor supplied from frequency converters, instead of the commonly used asynchronous squirrel-cage motor, speak for the application of permanent-magnet synchronous motors in the drives of a mining machinery.

Słowa kluczowe: PMSM, przemienniki częstotliwości, falowniki, maszyny górnicze
Keywords: PMSM, frequency converters, inverters, mining machinery

1. Wstęp

Procesy wydobywcze w kopalniach węgla kamiennego charakteryzują się dużą energochłonnością. Wskaźnik energochłonności dla naszych kopalń węgla kamiennego, w których wydobywanie jest prowadzone na głębokościach 500 ÷ 1000m wynosi średnio ok. 50 kWh/t węgla, przy czym należy zaznaczyć, że zarówno wskaźnik energochłonności, jak i struktura energii elektrycznej kształtuje się różnie w poszczególnych kopalniach [1]. Stąd istotne jest dążenie do optymalizacji układów napędowych pod kątem efektywności ekonomicznej przy uzyskiwaniu lepszej dynamiki i mniejszych gabarytów. Możliwość taką daje wprowadzenie do konwencjonalnych układów napędowych maszyn górniczych, silników synchronicznych z magnesami trwałymi. W górnictwie istnieje szereg aplikacji w których silniki z magnesami trwałymi mogą wykazać się swoimi

zaletami. W aplikacjach transportowych takich jak: napędy taśmociągów, kolejek podwieszanych i spągowych oraz lokomotyw kopalnianych najważniejsza jest duża krótkotrwała przeciążalność momentem. W aplikacjach maszynowych, takich jak: układy ciągnięcia kombajnów dominują dwie cechy, a mianowicie zmniejszone gabaryty, masa oraz wyższa sprawność i związane z tym zmniejszone straty ciepła w silniku, co pozwala stosować mniejsze oraz tańsze układy chłodzenia. Ponieważ silniki synchroniczne z magnesami trwałymi wymagają zasilania poprzez przemiennik częstotliwości, to do przeprowadzenia analiz predysponowane są układy napędowe, w których obecnie są stosowane silniki asynchroniczne klatkowe zasilane poprzez przemienniki częstotliwości. W takich przypadkach można w łatwy sposób w miejsce silników klasycznych zastosować

silniki synchroniczne z magnesami trwałymi oraz wprowadzić zmiany oprogramowania sterującego falownikiem wyjściowym przemiennika częstotliwości. Zwykle jednak w obecnie stosowanych przemiennikach częstotliwości są stosowane prostowniki diodowe, uniemożliwiające zwrotu energii do sieci zasilającej i dodatkowo obciążające sieć zasilającą zniekształconym prądem, stąd lepiej jest zastosować w przemienniku prostownik aktywny umożliwiający zwrot energii do sieci zasilającej. Dodatkowo, dzięki zastosowaniu prostownika aktywnego nie wprowadza się zniekształceń napięcia do sieci zasilającej, ponieważ prostownik aktywny może obciążać sieć prądem sinusoidalnym i na dodatek bez przesunięcia względem napięcia czyli ze współczynnikiem mocy równym jeden. Tak więc podczas wymiany silnika układu napędowego na nowoczesny energooszczędny silnik synchroniczny z magnesami trwałymi czasami konieczna jest wymiana przemiennika częstotliwości na nowoczesny sterowany wektorowo z prostownikiem aktywnym dającym znaczną poprawę własności mechanicznych całego układu napędowego, takich jak: stabilność, dynamika, przeciążalność momentem oraz poprawę parametrów elektrycznych, takich jak: energooszczędność, brak wprowadzenia zniekształceń napięcia do sieci zasilającej, brak poboru mocy biernej z sieci, zmniejszenie poboru mocy czynnej. Obecnie silniki synchroniczne z magnesami trwałymi są wytwarzane do mocy 400 kW w wykonaniu ogólnoprzemysłowym. Zatem do tej wartości mocy mechanicznej możliwe jest obecnie zastosowanie silników z magnesami trwałymi do napędu maszyn i urządzeń górniczych.

2. Zalety stosowania silników z magnesami trwałymi

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi w stosunku do powszechnie obecnie stosowanych w górnictwie silników asynchronicznych klatkowych posiadają następujące zalety:

- charakteryzują się mniejszymi gabarytami i mniejszą masą przy tej samej mocy mechanicznej,
- charakteryzują się większą krótkotrwałą przeciążalnością momentem,
- charakteryzują się wyższą sprawnością,
- charakteryzują się wyższą dynamiką.

Powyższe zalety pozwalają na uzyskanie następujących cech zbudowanych na bazie silników

z magnesami trwałymi maszyn i urządzeń górniczych:

1. Mniejsze gabaryty silników pozwalają na budowę bardziej kompaktowych urządzeń, a mniejsza masa silników pozwala ograniczyć masę całego urządzenia.
2. Wyższa krótkotrwała przeciążalność momentem pozwala stosować silniki o zredukowanej mocy ciągłej w aplikacjach, gdzie np. jest konieczny duży moment rozruchowy, a później w czasie pracy silnik pracuje już z mniejszą wartością momentu obciążenia. Przykładem takich aplikacji są napędy transportowe.
3. Wyższa sprawność silników synchronicznych z magnesami trwałymi w stosunku do obecnie powszechnie stosowanych w górnictwie silników asynchronicznych klatkowych pozwala na mniejsze zużycie energii elektrycznej, co przekłada się na mniejszą energochłonność napędów górniczych wpisującą się w ogólnoswiatowy trend ekologiczności napędów oraz pozwala uzyskać wymierne oszczędności ekonomiczne. Wyższa sprawność to mniejsze straty ciepła w silniku i łatwiejsze ich odprowadzanie z silnika napędowego oraz tańszy układ chłodzenia.
4. Wyższa dynamika silników z magnesami trwałymi pozwala na realizację bardziej dokładnych algorytmów sterowania prędkością i dokładniejszego pozycjonowania.

W związku z powyższym w wyniku zastosowania silników synchronicznych z magnesami trwałymi do budowy maszyn i urządzeń górniczych można uzyskać następujące ich cechy:

- mniejsze gabaryty niż obecnie,
- wyższa sprawność niż obecnie,
- wyższa dynamika,
- zmniejszenie mocy ciągłej, przy zwiększonej mocy chwilowej.

Istnieje zatem szerokie spektrum zastosowań silników synchronicznych z magnesami trwałymi w górnictwie. Ich budowa od strony stojana jest identyczna z budową powszechnie stosowanych silników asynchronicznych. Różnica tkwi w budowie wirnika. Wyższa sprawność silników synchronicznych z magnesami trwałymi jest osiągnięta poprzez wyeliminowanie strat występujących w wirniku maszyny indukcyjnej poprzez eliminację uzwojenia wirnika i zastąpienia go magnesami trwałymi.

Krótkotrwała przeciążalność momentem jest w silnikach z magnesami trwałymi osiągnięta na poziomie 3-krotności wartości momentu zna-

mionowego maszyny, gdzie w silnikach indukcyjnych parametr ten zwykle oscyluje wokół wartości 2. Ta cecha silników z magnesami trwałymi pozwala stosować je w napędach, gdzie jest wymagana możliwość dużego krótkotrwałego przeciążenia momentu. Przykładem takiego typu napędów są układy napędowe pojazdów, gdzie do tej pory były stosowane silniki szeregowo prądu stałego, charakteryzujące się właśnie dużą przeciążalnością momentem. Obecnie w układach napędowych pojazdów odchodzi się od stosowania silników szeregowych prądu stałego i w ich miejsce są stosowane silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Wyższa dynamika silników z magnesami wynika z ciągle wytwarzanego pola magnetycznego przez magnesy trwałe i tym samym braku potrzeby elektromagnetycznego wzbudzenia pola magnetycznego w maszynie. Dodatkowo wirnik pozbawiony uzwojenia o dużej masie na rzecz lekkich magnesów trwałych posiada mniejszy moment bezwładności. Ta zaleta silników z magnesami trwałymi spowodowała, że są one powszechnie stosowane w obrabiarkach sterowanych numerycznie oraz w serwonapędach.

Silnik z magnesami trwałymi pod względem stwarzanych zagrożeń w strefach zagrożonych wybuchem stwarza mniejsze zagrożenie, jak obecnie powszechnie stosowane silniki asynchroniczne klatkowe budowy przeciwwybuchowej. Nie ma zatem z tej strony przeszkód do ich stosowania w wyrobiskach kopalń, gdzie występują zagrożenia wybuchem metanu.

3. Wybrane napędy maszyn i urządzeń górniczych

Wśród górniczych układów napędowych, w których wymiana silnika napędowego na silnik synchroniczny z magnesami trwałymi pozwoli na poprawę parametrów napędowych można wskazać przykładowo następujące układy:

- napędy maszyn przepływowych (wentylatory, pompy),
- napędy przenośników taśmowych,
- napędy lokomotyw dołowych,
- napędy kolejek podwieszanych,
- napędy ciągników kombajnowych.

Dla wybranych układów napędowych przeprowadzono symulacje w warunkach rzeczywistej pracy napędów. W ten sposób uzyskano odpowiedzi na szereg pytań związanych z zastosowaniem nowego typu silnika napędowego.

W szczególności określono parametry elektryczne, takie jak: prąd obciążenia sieci, pobierana moc czynna i bierna, zużywana energia, sprawność symulowanych napędów oraz parametry mechaniczne, takie jak: moment napędowy, dynamika napędu, stabilizacja i wahania prędkości obrotowej i inne parametry napędów. Badania symulacyjne umożliwiły porównanie nowych układów napędowych z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi z rozwiązaniami dotychczasowymi. Pozwoliło to wykazać zalety nowych rozwiązań napędowych oraz wskazać wady na etapie symulacji komputerowych, które mogą zostać wyeliminowane poprzez modyfikację konstrukcji silników, bądź programu sterującego falownikiem wyjściowym przemiennika częstotliwości. Wyniki symulacji umożliwiły wskazanie tych parametrów schematu zastępczego silników synchronicznych z magnesami trwałymi, których zmiana może poprawić parametry układów napędowych.

3.1. Wentylator lutniowy

W Instytucie EMAG w ramach projektu celowego 6T12 2003 C/06363 opracowano energooszczędny ognioszczelny zespół zasilający z płynną regulacją wydajności wentylatora lutniowego do lokalnego przewietrzania ślepych wyrobisk górniczych kopalń głębinowych o zagrożeniu metanowym i pyłowym.

Zastosowanie regulacji prędkości obrotowej umożliwi dostosowanie wydajności wentylatora w zależności od długości wyrobiska – ilość dostarczanego powietrza.

Można stwierdzić, że wprowadzenie płynnej regulacji prędkości obrotowej wentylatora powoduje:

- uproszczenie procedur uruchomienia wentylatora w kopalniach metanowych,
- zmniejszenie zagrożenia pożarem endogenicznym,
- zmniejszenie hałasu,
- zapewnienie równomiernych warunków klimatycznych w całym okresie drażenia ślepego wyrobiska,
- pozwala uzyskać wymierne korzyści ekonomiczne.

Wentylator może być zasilany z Ognioszczelnego Zespołu Zasilającego typu OZZ-45/500 o napięciu zasilającym 500V lub 1000V. Zespół zasilający zawiera napięciowy przemiennik częstotliwości typu FNTG-60/500/1000 oraz aparaturę sterowniczą i zabezpieczeniową.

W przytoczonym układzie napędowym wentylatora dla zwalczania zagrożenia klimatycznego zaproponowano alternatywne zastosowanie silnika synchronicznego z magnesami trwałymi typu LSRPM 160LR firmy LEROY-SOMER [9] zasilanego z ognioszczelnego przekształtnikowego zespołu zasilającego typu OZZ-45.

Wyższa sprawność silnika synchronicznego z magnesami trwałymi powoduje, że w silniku wydziela się mniej ciepła, a tym samym poprawiają się warunki ciepłno-termiczne pracy, zwłaszcza, że przetłaczanym czynnikiem może być nie tylko czyste powietrze, ale również powietrze z zawartością metanu, zanieczyszczone pyłem węglowym zależnie od przyjętego układu podłączenia wentylatora (tłoczący lub ssący). Należy zaznaczyć, że sprawność silników synchronicznych z magnesami trwałymi w warunkach pracy znamionowej może być wyższa od 95%.

3.2. Przenośnik taśmowy

Przenośniki taśmowe są przeznaczone głównie do odstawy zbiorczej z przodków o dużym wydobyciu. Istnieją tendencje zastępowania w niektórych przypadkach transportu kołowego przenośnikami taśmowymi pracującymi w ciągach rozgałęzionych łączącymi odstawę ścianową z transportem pionowym w szybie.

Przenośniki mają wiele zalet w stosunku do innych środków transportu m.in.:

- duża wydajność,
- mała energochłonność,
- możliwość stosowania długich ciągów transportowych,
- możliwość transportowania materiałów oraz przewożenia ludzi.

Zespoły napędowe przenośników są wyposażone w silniki asynchroniczne i to zarówno w układach jedno jak i wielonapędowych [3].

Optymalne zużycie energii elektrycznej występuje wtedy, gdy przenośnik pracuje z nominalnym obciążeniem. Zdarzają się również sytuacje, że na jeden taśmociąg sypany jest urobek z kilku taśmociągów, a więc prędkość posuwu taśmy przenośnika odbierającego powinna być znacznie większa od prędkości taśmociągów zadających. Problem ten rozwiązywany może być przez zastosowanie układów napędowych z silnikami synchronicznymi z przemiennikami częstotliwości. Umożliwiają one automatyczne dopasowanie prędkości posuwu przenośników taśmowych pracujących w ciągu, w zależności od ich bieżącego obciążenia.

Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest to, że pobór energii maleje wraz ze zmniejszeniem prędkości obrotowej silników i z momentem obciążenia. Przełączniki częstotliwości, sterujące silnikami w trybie regulacji momentu, muszą być zdolne do wytworzenia dużego momentu napędowego silnika przy zerowej prędkości taśmociągu, gdyż często zachodzi konieczność uruchomienia obciążonego taśmociągu po jego zatrzymaniu. Takie sterowanie silnikami wymaga zastosowania falowników sterowanych wektorowo.

Dla uzyskania większych efektów ekonomicznych zwłaszcza w układach przenośników wielonapędowych, gdzie np. ruch taśmy realizowany jest za pomocą dwóch wałów napędowych, przy czym każdy z wałów napędzany jest przez przekładnię mechaniczną dwoma silnikami asynchronicznymi, można zastąpić te silniki silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi. W wyniku przeprowadzonej analizy realne jest zastosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi w rozgałęzionych systemach transportu przenośnikowego.

3.3. Lokomotywa akumulatorowa

Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom górnictwa w dziedzinie modernizacji urządzeń elektrycznych, w ramach projektu współfinansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego opracowano prototyp lokomotywy akumulatorowej typu ELA 44/1-2/3 napędzaną dwoma silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falowników napięcia, rys.1. Lokomotywa przeznaczona jest jako napęd pociągów kopalnianych przewożących ludzi, urobek i inne materiały w pomieszczeniach ze stopniem niebezpieczeństwa „b” i „c”.



Rys. 1. Lokomotywa akumulatorowa ELA-44

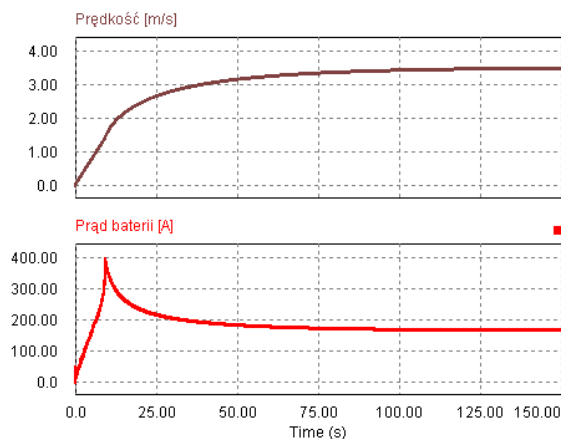
W celu porównania napędu lokomotywy wyposażonej w nowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi z rozwiązaniem konwencjo-

nalnym przeprowadzono symulacje komputerowe. Symulacje prowadzono dla czterech różnych warunków obciążenia lokomotywy:

1. Bez wagonów po płaskim terenie.
2. Obciążonej pustymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 40 Mg pod górę o nachyleniu 0,5%.
3. Obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 100 Mg po płaskim terenie.
4. Obciążonej pełnymi wagonami o łącznej masie całkowitej składu 100 Mg pod górę o nachyleniu 0,5%.

Nachylenie 0,5% jest maksymalnym dopuszczalnym nachyleniem torowiska w podziemiach kopalń.

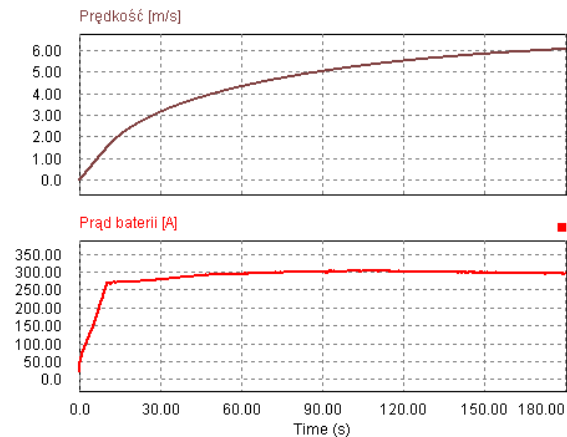
Na rys.2 został przedstawiony wynik symulacji rozpędzania składu pociągu o masie całkowitej 100 Mg złożonego z lokomotywy wyposażonej w napęd silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs 245 i 40 pełnych wagonów po płaskim terenie.



Rys. 2. Rozpędzanie pełnego składu pociągu lokomotywa z silnikiem szeregowym

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 170 A. W czasie transportu urobku na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 41 Ah. Transport ładunku na tej trasie trwa 880 sekundy.

Na rys.3 został przedstawiony wynik symulacji rozpędzania tego samego składu pociągu o masie całkowitej 100 Mg złożonego z lokomotywy wyposażonej w napęd silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi typu PMSM o tej samej mocy sumarycznej co silnik szeregowy prądu stałego i 40 pełnych wagonów po płaskim terenie.



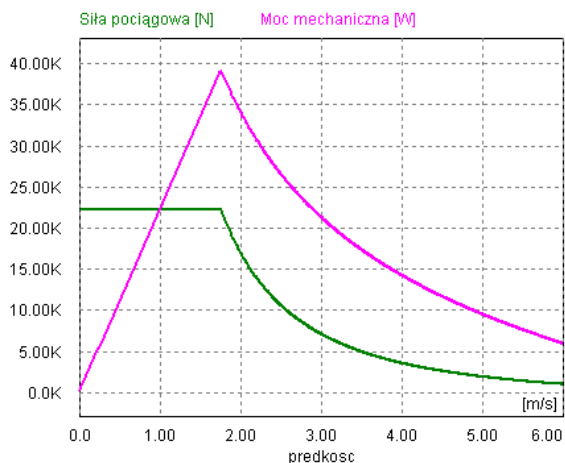
Rys. 3. Rozpędzanie pełnego składu pociągu lokomotywa z silnikami PMSM

Jak wynika z rys.3 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 znacznie większy w stosunku do napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego prąd z baterii akumulatorów, który stabilizuje się na wartości 300 A. W czasie transportu urobku na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 44 Ah. Transport ładunku na tej trasie trwa 540 sekund.

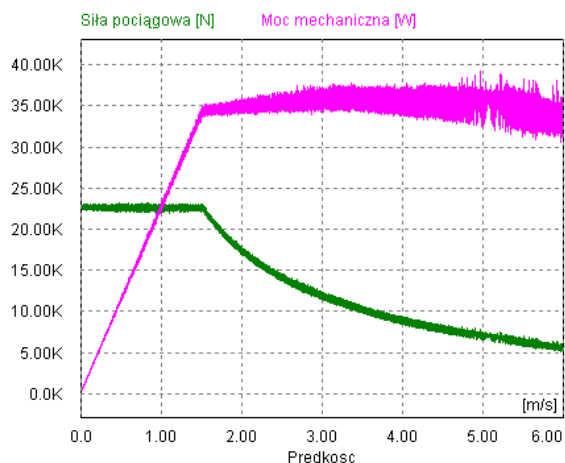
Podsumowując powyższy przypadek zastosowanie nowoczesnych silników z magnesami trwałymi pozwala na transport urobku ze znacznie większą prędkością, niż w przypadku silników szeregowych prądu stałego, co skutkuje znacznym skróceniem czasu transportu, przy prawie tym samym zużyciu ładunku elektrycznego z baterii akumulatorów.

Wyższa prędkość transportowa lokomotywy z napędem z silnikami PMSM jest uzyskiwana dzięki utrzymywaniu stałej mocy napędu pomimo zwiększania prędkości, co jest niemożliwe dla napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego. Na rys.4 jest przedstawiona charakterystyka siły pociągowej i mocy napędu lokomotywy z silnikiem szeregowym typu LDs 245, a na rys.5 jest przedstawiona charakterystyka siły pociągowej i mocy napędu lokomotywy z silnikami PMSM.

Pełne wyniki symulacji wszystkich czterech przypadków znajdują się w [4,5].



Rys. 4. Siła pociągowa i moc mechaniczna lokomotywy z silnikiem prądu stałego



Rys. 5. Siła pociągowa i moc mechaniczna lokomotywy z silnikami PMSM

Jak wynika z rys.4 lokomotywa z napędem za pomocą silnika prądu stałego charakteryzuje się stałą siłą pociągową wynoszącą około 22 kN do prędkości 1,7 m/s. Powyżej tej prędkości siła pociągowa szybko maleje i dla prędkości 3,5 m/s wynosi już tylko około 5 kN, podobnie jak moc mechaniczna, która wynosi już tylko około 17 kW. Napęd lokomotywy z silnikami prądu zmiennego PMSM charakteryzuje się innymi własnościami, co przedstawia rys.5. Do prędkości 1,5 m/s lokomotywa dysponuje stałą siłą pociągową wynoszącą również około 22 kN, a powyżej tej prędkości lokomotywa dysponuje stałą mocą mechaniczną wynoszącą około 35 kW i wolniej zmniejszającą się siłą pociągową w stosunku do napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego, która na przykład dla prędkości 3,5 m/s wynosi 10 kN, czyli jest 2-krotnie większa.

Należy również zaznaczyć, że problematyką zastosowania w napędach lokomotyw doło-

wych silników synchronicznych z magnesami trwałymi zajmują się również ITG KOMAG oraz BOBRME KOMEL [6]. W zakładach górniczych ostatnio wdrożono pilotujący egzemplarz lokomotywy trakcyjnej typu Ld-31EM z silnikiem PMPg-250L z magnesami trwałymi produkcji BOBRME KOMEL. Natomiast w projekcie nr N R01 0009 06 pt.: „Mechatroniczny układ napędowy do pojazdów szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej prowadzonym przez ITG KOMAG współuczestniczył ITI EMAG w zakresie wariantowej symulacji napędów dla lokomotywy akumulatorowej.

3.4. Akumulatorowy ciągnik podwieszany

W nowoczesnym ciągniku podwieszonym typu GAD-1 wyposażonym w napęd zasilany z baterii akumulatorów litowo-jonowych zastosowano bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi typu SMwsPA132MG produkcji BOBRME KOMEL. Silniki z magnesami trwałymi cechuje wysoka sprawność w porównaniu z silnikami asynchronicznymi. Silniki te podczas hamowania napędu pracują jako generatory oddające energię do baterii [2]. Układ napędowy ciągnika składa się z czterech wózków napędowych, a każdy wózek jest wyposażony w dwa identyczne silniki.

Zaprezentowany napęd charakteryzuje się bezemisyjną pracą, niskim poziomem wydzielania ciepła oraz niskim poziomem hałasu, co powoduje, że rozwiązanie jest bardzo konkurencyjne w stosunku do napędów spalinowych.

3.5. Napęd ciągnięcia kombajnu ścianowego

Kombajn ścianowy typu KSW-750E o masie 42 ton jest wyposażony w 2 organy urabiające napędzane silnikami o mocy 300 kW, przemieszczane wzdłuż ściany za pomocą dwóch ciągników elektrycznych napędzanych silnikami asynchronicznymi klatkowymi zasilanymi z przemiennika częstotliwości.

Silnik ciągnika porusza koło napędowe o zarysie ewolwentowym i liczbie zębów $z = 12$ współdziałające z zębatką sworzniową mechanizmu posuwu, w której nominalna podziałka sworzniowa wynosi 125 mm, rys.6. Przemienник częstotliwości zasilający silniki napędowe ciągników zapewnia płynną regulację prędkości posuwu kombajnu w zakresie od 0 do 10,5 m/min. przy zachowaniu stałej wartości

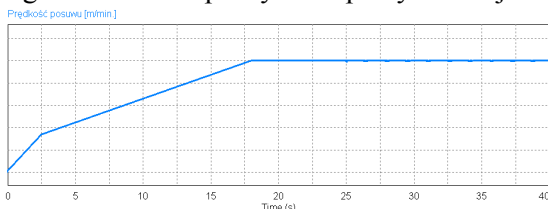
momentu napędowego silnika (wartość momentu znamionowego silnika). W tym zakresie prędkości nominalna siła posuwu wynosi 334,5 kN. Przy prędkości posuwu z zakresu od 10,5 m/min. do 21,5 m/min. falownik przemiennika częstotliwości pracuje przy stałej mocy, umożliwiając uzyskanie malejącej siły posuwu od 334,5 kN do 167,25 kN.



Rys. 6. Ciągnik kombajnowy

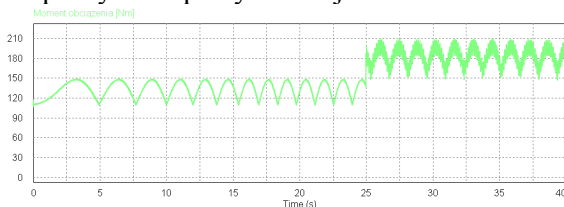
W celu porównania parametrów napędu ciągnika kombajnu wyposażonego w silnik asynchroniczny klatkowy oraz w silnik synchroniczny z magnesami trwałymi przeprowadzono symulacje komputerowe.

Na rys.7 został przedstawiony zasymulowany przebieg prędkości posuwu kombajnu ścianowego w czasie rozpoczynania pracy kombajnu.



Rys. 7. Profil prędkości posuwu kombajnu

Dla profilu prędkości przedstawionego na rys.7 występuje, przedstawiony na rys.8, następujący przebieg dynamicznego obciążenia momentem silnika w napędzie ciągnika kombajnu w czasie rozpoczynania pracy kombajnu.



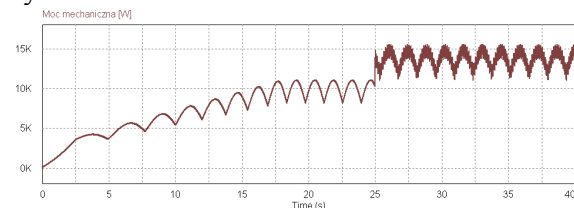
Rys. 8. Przebieg momentu obciążenia silnika napędu ciągnienia kombajnu

Przedstawiony na rys.8 przebieg momentu obciążenia silnika w układzie ciągnienia kombajnu ścianowego cechuje się wyraźnie perio-

dycznym charakterem wywołanym współdziałaniem zębów kół napędowych ze sworzniami zębatego. W charakterystyce momentu obciążenia widoczne są wyraźne oscylacje o okresie ząbkowania zębów kół napędowych ze sworzniami zębatego. W fazie rozruchu kombajnu ścianowego okres ząbkowania jest zmienny i w miarę zwiększania prędkości posuwu kombajnu okres ten maleje. W ruchu ustalonym okres ząbkowania zębów kół napędowych ze sworzniami zębatego jest stały i wynosi dla zadanej wartości prędkości posuwu 1,4 sekundy. Pomimo, iż w fazie rozruchu prędkość posuwu kombajnu rośnie, obciążenie dynamiczne silników w napędzie jego ciągników jest co do wartości średniej w przybliżeniu stałe. Moment dynamiczny na wale silnika rozpatrywanego ciągnika oscyluje przy tym w granicach od 110 Nm do 148 Nm. Wartość średnia tego obciążenia kształtuje się przy tym na poziomie 133,6 Nm. Ponieważ w tym czasie, do 25 sekundy nie była urabiana ściana, można więc przyjąć, że jest to ruch manewrowy kombajnu ścianowego.

W momencie rozpoczęcia urabiania ściany, od 25 sekundy obciążenia dynamiczne wzrastają i mają postać drgań szybkozmiennych, których źródłem jest proces urabiania calizny węglowej organami urabiającymi. Wartość szczytowa obciążenia dynamicznego silnika ciągnika wynosi teraz 208 Nm. Amplituda tego obciążenia, rozumiana jako zakres jego zmienności wynosi 58 Nm. Wartość średnia tego obciążenia kształtuje się na poziomie 183,9 Nm i jest większa od występującej w ruchu manewrowym o 38%.

Na rys.9 został przedstawiony przebieg mocy mechanicznej obciążającej silnik rozpatrywanego ciągnika kombajnu ścianowego w czasie rozpoczynania pracy kombajnu z przebiegiem prędkości przedstawionym na rys.7 oraz obciążeniem dynamicznym przedstawionym na rys.8.



Rys. 9. Moc mechaniczna silnika napędu ciągnienia

W przebiegu mocy mechanicznej przedstawionej na rys.9 występują także oscylacje o okresie

zazębienia zębów koła napędowego ze sworzniami segmentów zębatego. W fazie rozruchu, gdy kombajn przyspiesza do zadanej prędkości 5 m/min. moc mechaniczna silnika w napędzie ciągnika wzrasta. Po osiągnięciu ustalonej prędkości w ruchu manewrowym moc mechaniczna rozpatrywanego ciągnika osiąga średnią wartość wynoszącą 10,05 kW. Wartość szczytowa mocy wynosi w tym przypadku 11,08 kW, amplituda zaś wynosi 2,84 kW.

W momencie rozpoczęcia urabiania ściany następuje wzrost mocy mechanicznej obciążającej silnik w napędzie rozpatrywanego ciągnika do wartości średniej wynoszącej 13,76 kW. Wartość szczytowa mocy osiąga poziom 15,56 kW, zaś amplituda 4,47 kW.

Pełne wyniki symulacji komputerowych dostępne są w [7,8].

Na podstawie symulacji komputerowych napędu ciągnika kombajnu wykonanego w sposób klasyczny z silnikiem asynchronicznym klatkowym zasilanym poprzez przełącznik częstotliwości ze skalarnym falownikiem napięcia oraz wykorzystującym nowoczesny silnik synchroniczny z magnesami trwałymi zasilany za pomocą przełącznika częstotliwości z wektorowym falownikiem napięcia należy stwierdzić, że zastosowanie nowoczesnego silnika z magnesami trwałymi przynosi efekty ekonomiczne. Moc elektryczna pobierana z sieci zasilającej jest mniejsza średnio o 3,5%. Współczynnik mocy jest wyższy średnio o 17%. Sprawność układu napędowego jest wyższa średnio o 3,5%. Wartość skuteczna prądu pobieranego z sieci jest niższa średnio o 17%. Zużyta energia elektryczna podczas procesu urabiania ściany węglowej jest niższa średnio o 3,5%.

Najbardziej jednak dzięki zastosowaniu wysokosprawnego silnika spada moc cieplna wydzielana w silniku, którą trzeba odprowadzić za pomocą układu chłodzenia. Średnia wartość mocy cieplnej wydzielanej w silniku napędowym jest niższa o 40%. Daje to bardzo duże korzyści ekonomiczne przede wszystkim w postaci zmniejszenia układu chłodzenia silnika, a tym samym możliwości zastosowania znacznie tańszych układów chłodzenia o mniejszych gabarytach.

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych analiz i symulacji komputerowych można stwierdzić, że zastosowanie nowoczesnych silników synchronicz-

nych z magnesami trwałymi zasilanych poprzez przełączniki częstotliwości wyposażone w wektorowe falowniki napięcia, w miejsce obecnie powszechnie stosowanych silników asynchronicznych klatkowych zasilanych poprzez przełączniki częstotliwości wyposażone w skalarny falownik napięcia jest zasadne ekonomicznie oraz przynosi wyraźną poprawę parametrów dynamicznych układów napędowych maszyn górniczych. Największe korzyści z zastosowania nowoczesnego, wysokosprawnego silnika z magnesami trwałymi przynosi znaczne zmniejszenie ilości ciepła wydzielanego podczas pracy w silniku napędowym. Dzięki temu układ chłodzenia odprowadza o około 40% mniej ciepła, z którego odprowadzeniem zawsze jest duży problem. Moc znamionowa układu chłodzenia może być zatem w efekcie zmniejszona, co prowadzi do znacznego zmniejszenia gabarytów układu chłodzenia i jego kosztu.

Dotychczasowe wdrożenia w górnictwie napędów z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi ograniczają się głównie do rozwiązań prototypowych. Większa skala wdrożeń jest uwarunkowana dostępnością rynkową tych silników, jak również poziomem cen w stosunku do powszechnie stosowanych silników asynchronicznych klatkowych.

Przytoczone w artykule przykłady zastosowań oraz analiza osiągniętych efektów ekonomicznych powinna skłonić producentów silników do przedstawienia szerszej oferty typoszerokiego silników synchronicznych z magnesami trwałymi jako zamienników w wytypowanych maszynach i urządzeniach górniczych. Należy również rozważyć niezawodność kompleksową tych silników na którą składa się: nieuszkodzalność i trwałość jako niezbędne kryterium stosowania w dołowych maszynach górniczych.

Literatura

- [1]. Szczucki Fr., Hefczyc M.: „Energoozczędne urządzenia i napędy maszyn szansą obniżenia kosztów wydobywania”, XVI Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk 19÷23 luty 2007, str.709÷721.
- [2]. Mróz J., Skupień K., Drwięga A., Budzyński Z., Polnik B., Czerniak D., Dukalski P., Brymora L.: „Akumulatorowy ciągnik podwieszany GAD-1 z innowacyjnym napędem jako alternatywa rozwiązań z napędem spalinowym”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96).
- [3]. Gładysiewicz L.: „Niekonwencjonalne napędy przENOŚNIKÓW TAŚMOWYCH”, Transport Przemysłowy 1/2000.

- [4]. Dzikowski.A.: „Parametry układów napędowych z silnikami prądu stałego i zmiennego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej”, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa nr 3/2011, str. 13-20.
- [5]. Dzikowski A., Gąsior T., Budzyński Z.: „Porównanie parametrów trakcyjnych lokomotywy kopalnianej wyposażonej w różne typy napędu z silnikami prądu stałego i zmiennego”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 90/2011, str. 157-162.
- [6]. Bernatt J., Gawron S., Krol E.: „Nowoczesne silniki z magnesami trwałymi do zastosowań trakcyjnych”, MET 2009 - IX Międzynarodowa Konferencja "Modern Electric Traction – Nowoczesna Trakcja Elektryczna, Gdańsk 24-26.09.2009.
- [7]. Dzikowski A.: „Zastosowanie silnika z magnesami trwałymi do napędu ciągnięcia górniczego kombajnu ścianowego”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 94/2012, str. 165-170.
- [8]. Dzikowski A., Hefczyc M., Keller J.: „Analiza porównawcza napędu ciągnięcia górniczego kombajnu ścianowego w przypadku zastosowania silnika

asynchronicznego klatkowego oraz bezszczotkowego silnika synchronicznego o magnesach trwałych”, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa nr 11/2012, str. 20-36.

- [9]. Katalog producenta silników z magnesami trwałymi firmy Leroy Somer: „LSRPM-PLSRPM Synchronous motors with permanent magnets – 0,75 to 400 kW – Technical catalogue”.

Autorzy

dr inż. Andrzej Dzikowski
a.dzikowski@emag.pl
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
dr inż. Artur Kozłowski
a.kozlowski@emag.pl
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG
mgr inż. Marek Hefczyc
hemar@emag.pl
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG