

dr inż. ANDRZEJ DZIKOWSKI
mgr inż. MAREK HEFCZYC
dr inż. ARTUR KOZŁOWSKI
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

Badania symulacyjne wybranych napędów maszyn górniczych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi

W artykule nawiązano do stałego dążenia badaczy i konstruktorów do optymalizacji układów napędowych pod kątem efektywności ekonomicznej przy uzyskiwaniu lepszej dynamiki i mniejszych gabarytów. Omówiono zalety silników synchronicznych z magnesami trwałymi w porównaniu z silnikami asynchronicznymi klatkowymi. Zaprezentowano 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 (na przykładzie napędu posuwu kombajnu ścianowego) oraz silników szeregowych prądu stałego (na przykładzie napędu lokomotywy dołowej).

1. WPROWADZENIE

Procesy wydobywcze w kopalniach węgla kamiennego charakteryzują się dużą energochłonnością. Wskaźnik energochłonności dla polskich kopalń węgla kamiennego, w których wydobyte jest prowadzone na głębokościach 500÷1000 m, wynosi średnio ok. 50 kWh/Mg węgla. Należy zaznaczyć, że wskaźnik energochłonności kształtuje się różnie w poszczególnych kopalniach [7]. 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 zastosowaniach takich, jak układy ciągnięcia kombajnów, dominują dwie cechy – pierwsza to zmniejszone gabaryty i masa, druga to wyższa sprawność i związane z tym zmniejszone straty ciepła w silniku, co pozwala stosować mniejsze oraz tańsze układy chłodzenia. Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi wymagają zasilania poprzez przemiennik częstotliwości. Zatem 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 zwrot energii do sieci zasilającej i dodatkowo obciążające sieć zasilającą niekształconym prądem. Lepiej jest zatem zastosować w przemienniku prostownik aktywny umożliwiający zwrot energii do sieci zasilającej. Dodatkowo dzięki

zastosowaniu prostownika aktywnego nie wprowadza się zniekształceń napięcia w sieci zasilającej, ponieważ prostownik aktywny może obciążać sieć prądem sinusoidalnym i na dodatek bez przesunięcia względem napięcia, czyli ze współczynnikiem mocy równym jeden. Podczas wymiany silnika układu napędowego na nowoczesny energooszczędny silnik synchroniczny z magnesami trwałymi konieczna jest wymiana przemiennika częstotliwości na nowoczesny wyposażony w sterowany wektorowo falownik. To pozwala na znaczną poprawę własności mechanicznych całego układu napędowego, takich jak stabilność, dynamika czy przeciążalność momentem. Nowoczesny przemiennik częstotliwości z prostownikiem aktywnym daje również znaczną poprawę parametrów elektrycznych, takich jak energooszczędność, brak wprowadzenia zniekształceń napięcia do sieci zasilającej, brak poboru mocy biernej z sieci, zmniejszenie poboru mocy czynnej. Aktualnie silniki synchroniczne z magnesami trwałymi są wytwarzane do mocy 400 kW [6]. Zatem do tej wartości mocy mechanicznej możliwe jest obecnie zastosowanie silników z magnesami trwałymi do napędu maszyn i urządzeń górniczych.

2. ZALETY STOSOWANIA SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

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

- mniejsze gabaryty i mniejsza masa przy tej samej mocy mechanicznej,
- większa krótkotrwała przeciążalność momentem i wyższa dynamika,
- wyższa sprawność.

Powyższe zalety pozwalają na uzyskanie następujących cech maszyn i urządzeń górniczych zbudowanych na bazie silników z magnesami trwałymi:

- 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 działa 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,
- wyższą sprawność niż obecnie,
- wyższą dynamikę,
- 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-, a nawet 4-krotności wartości momentu znamionowego maszyny, gdzie w silnikach indukcyjnych krótkotrwała przeciążalność momentem zwykle nie przekracza wartości 2,5-krotności momentu znamionowego. Ta cecha silników z magnesami trwałymi pozwala stosować je w napędach, gdzie jest wymagana możliwość dużego krótkotrwałego przeciążenia momentu. Za przykład takiego typu napędów można podać układy napędowe lokomotyw dołowych, w których do tej pory były stosowane silniki szeregowe prądu stałego, charakteryzujące się właśnie dużą przeciążalnością momentem. Obecnie w układach napędowych pojazdów elektrycznych odchodzi się od stosowania silników szeregowych prądu stałego i w ich miejsce stosuje się silniki synchroniczne z magnesami trwałymi – przykładem są samochody i autobusy o napędzie elektrycznym i hybrydowym.

Wyższa dynamika silników z magnesami wynika z ciągle wytwarzanego pola magnetycznego przez magnesy trwale 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.

Jeśli chodzi o funkcjonowanie w strefach zagrożonych wybuchem, silniki z magnesami trwałymi stwarzają mniejsze zagrożenie niż obecnie powszechnie stosowane silniki asynchroniczne klatkowe budowy przeciwybuchowej. Nie ma zatem w tym kontekście przeszkód do ich stosowania w wyrobiskach kopalń, gdzie występują zagrożenia wybuchem metanu i pyłem węglowym.

3. WYBRANE NAPĘDY MASZYN I URZĄDZEŃ GÓRNICZYCH

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

- lokomotywy dołowe,
- napędy ciągników kombajnowych.

Dla wybranych układów napędowych przeprowadzono symulacje komputerowe w warunkach ich rzeczywistej pracy. 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 czy sprawność symulowanych napędów, oraz parametry mechaniczne: moment napędowy, dynamika napędu, stabilizacja i wahania prędkości obrotowej i inne. 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.

3.1. 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 napędzanej dwoma silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falowników napięcia (rys. 1). Lokomotywa stanowi napęd pociągów kopalnianych przewożących ludzi, urobek i inne materiały w przestrzeniach ze stopniem niebezpieczeństwa „a”, „b” i „c”.



Rys. 1. Lokomotywa akumulatorowa ELA-44 (opracowanie własne)

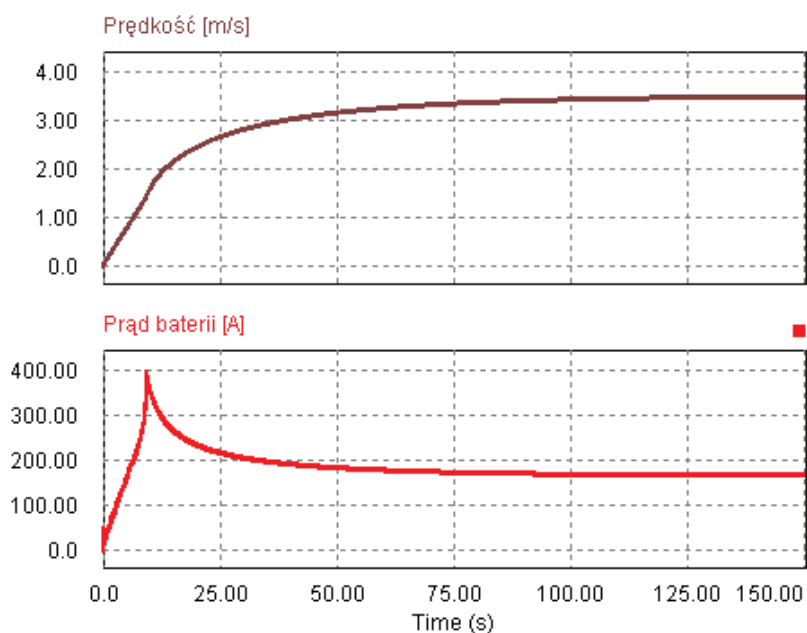
W celu porównania napędu lokomotywy wyposażonej w nowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi z rozwiązaniem konwencjonalnym przeprowadzono symulacje komputerowe, wykorzystując symulator układów energoelektronicznych PSIM firmy Powersim Inc. Symulacje prowadzono dla czterech różnych warunków obciążenia 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. Przebiegi czasowe prędkości i prądu obciążenia baterii akumulatorów w czasie rozpędzania pełnego składu pociągu lokomotywą z silnikiem szeregowym (opracowanie własne)

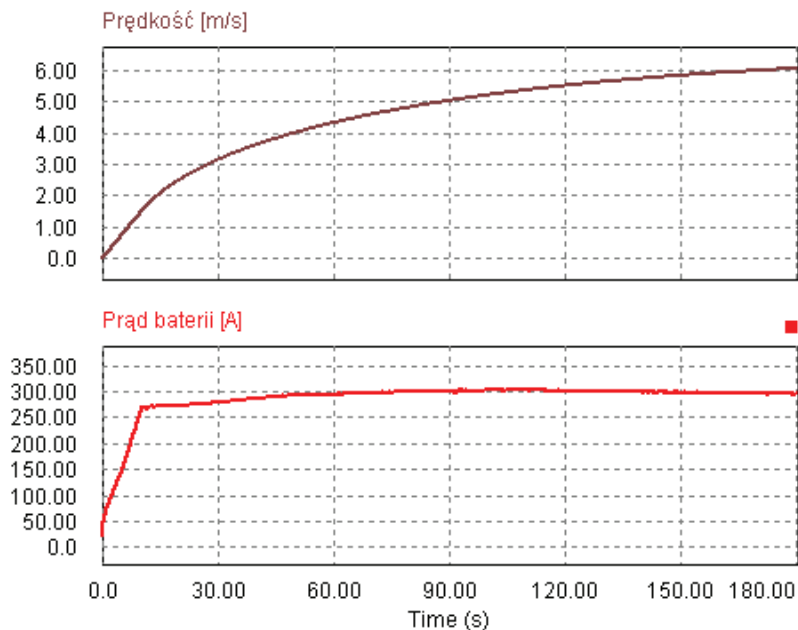
Jak wynika z rys. 2., rozpędzanie składu pociągu do prędkości ustalonej, wynoszącej 3,5 m/s, trwa około 120 sekund. W tym czasie prąd pobierany z baterii akumulatorów maleje i stabilizuje się na wartości 170 A. W czasie transportu urobku na odcinku 3000 m zostaje zużyty z baterii akumulatorów ładunek 41 Ah. Transport ładunku na tej trasie trwa 880 sekund.

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.

Jak wynika z rys. 3., napęd z silnikami PMSM pozwala na rozpędzenie składu pociągu do maksymal-

nej 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, należy zauważyć, że 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.

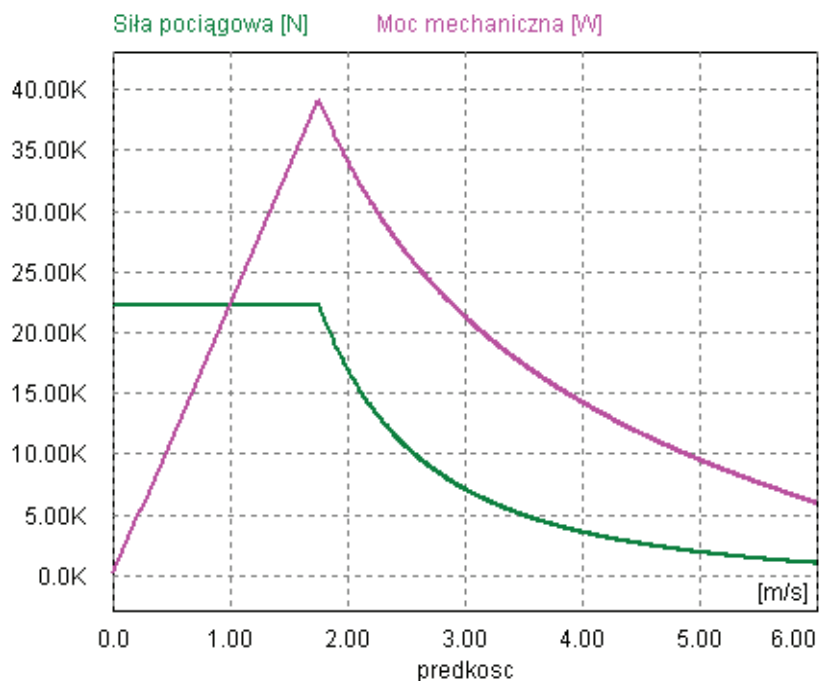


Rys. 3. Przebiegi czasowe prędkości i prądu obciążenia baterii akumulatorów w czasie rozpędzania pełnego składu pociągu lokomotywą z silnikami PMSM (opracowanie własne)

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. przedstawiona została charakterystyka siły pociągowej

wej i mocy napędu lokomotywy z silnikiem szeregowym typu LDs 245, a na rys. 5. – charakterystyka siły pociągowej i mocy napędu lokomotywy z silnikami PMSM w funkcji prędkości jazdy.

Pełne wyniki symulacji wszystkich czterech przypadków znajdują się w publikacjach [2, 4].

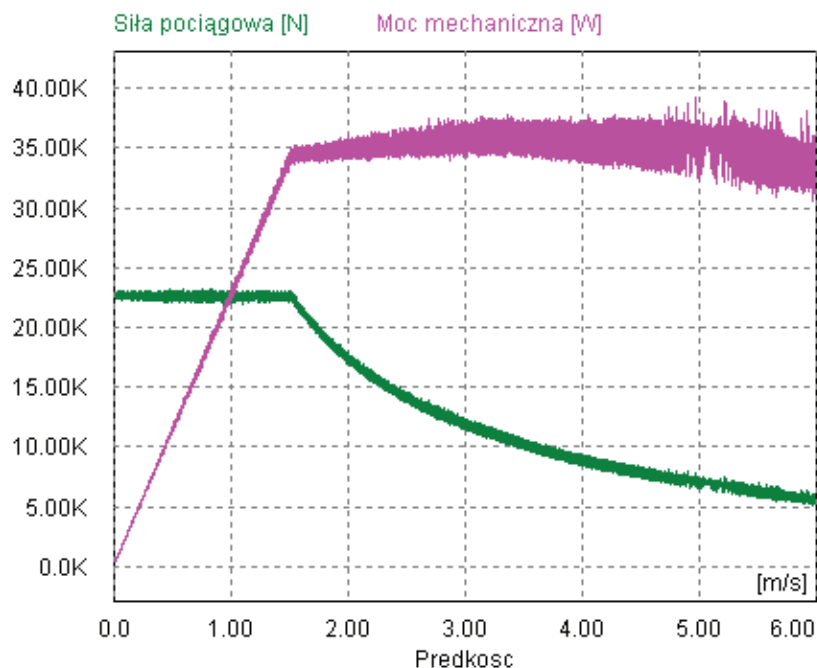


Rys. 4. Przebiegi siły pociągowej i mocy mechanicznej lokomotywy z silnikiem prądu stałego w funkcji prędkości jazdy (opracowanie własne)

Jak wynika z rys. 4., lokomotywa napędzana silnikiem 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 – 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.



Rys. 5. Przebiegi siły pociągowej i mocy mechanicznej lokomotywy z silnikami PMSM w funkcji prędkości jazdy (opracowanie własne)

Należy również zaznaczyć, że problematyką zastosowania w napędach lokomotyw dołowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi zajmują się również ITG KOMAG oraz BOBRME KOMEL [1]. W zakładach górniczych ostatnio wdrożono pilotażowy 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.

3.2. Napęd ciągnięcia kombajnu ścianowego

Kombajn ścianowy typu KSW-750E o masie 42 Mg jest wyposażony w dwa 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). Przemiennik 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 do 21,5 m/min falownik przemiennika częstotliwości pracuje przy stałej mocy, umożliwiając uzyskanie malejącej siły posuwu od 334,5 do 167,25 kN.

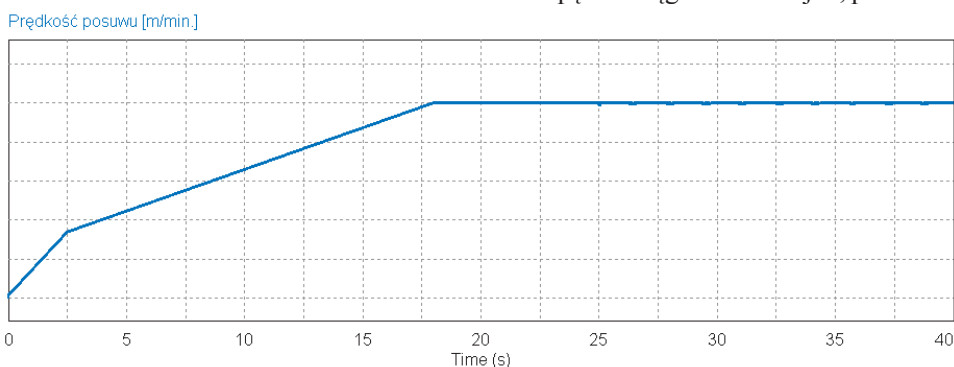


Rys. 6. Ciągnik kombajnowy (opracowanie własne)

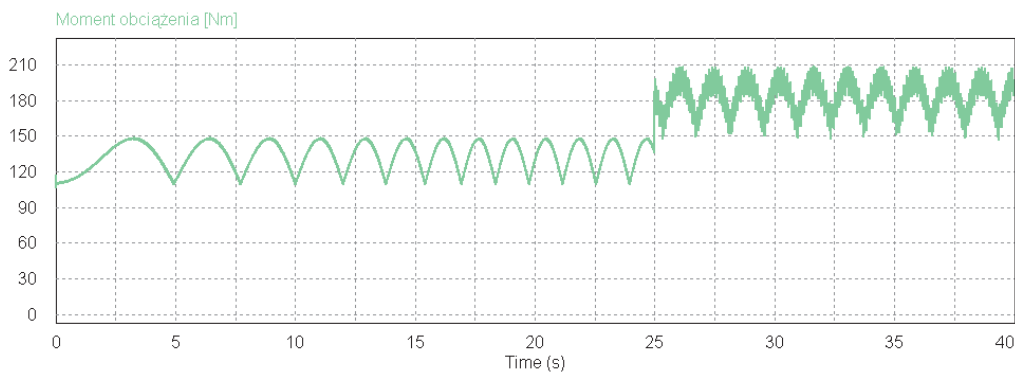
W celu porównania parametrów napędu ciągnika kombajnu wyposażonego w silnik asynchroniczny klatkowy oraz w silnik synchroniczny z magnesami trwałymi przeprowadzono symulacje komputerowe, wykorzystując również symulator układów energoelektronicznych PSIM firmy Powersim Inc.

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

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



Rys. 7. Przebieg czasowy prędkości posuwu kombajnu w czasie rozpoczynania pracy kombajnu (opracowanie własne)



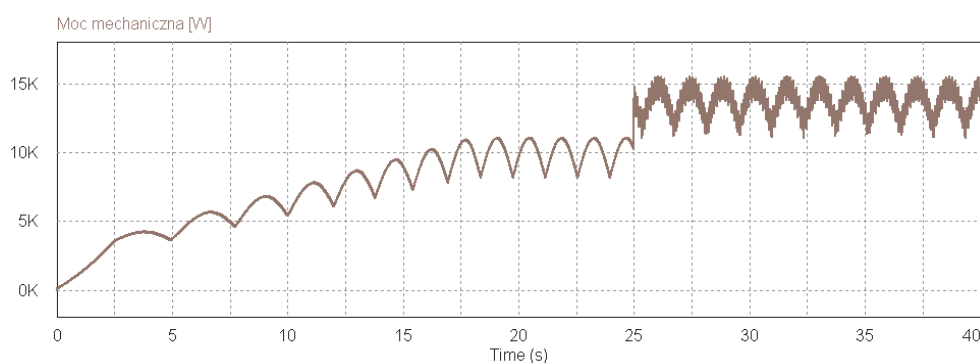
Rys. 8. Przebieg czasowy momentu obciążenia silnika napędu ciągnienia kombajnu w czasie rozpoczynania pracy kombajnu (opracowanie własne)

Przedstawiony na rys. 8. przebieg czasowy momentu obciążenia silnika w układzie ciągnienia kombajnu ścianowego cechuje się wyraźnie periodycznym charakterem wywołanym współdziałaniem zębów kół napędowych ze sworzniami zębarki. W charakterystyce momentu obciążenia widoczne są wyraźne oscylacje o okresie zazębienia zębów kół napędowych ze sworzniami zębarki. W fazie rozruchu kombajnu ścianowego okres zazębienia jest zmienny i w miarę zwiększania prędkości posuwu kombajnu maleje. W ruchu ustalonym okres zazębienia zębów kół napędowych ze sworzniami zębarki 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 do 148 Nm. Wartość średnia tego obciążenia

kształtuje się na poziomie 133,6 Nm. Ponieważ w tym czasie (do 25. sekundy) nie była urabiana ściana, można 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. Przebieg czasowy mocy mechanicznej obciążającej silnik napędu ciągnienia w czasie rozpoczynania pracy kombajnu (opracowanie własne)

W przebiegu czasowym mocy mechanicznej przedstawionej na rys. 9. występują także oscylacje o okresie zazębienia zębów koła napędowego ze sworzniami segmentów zębarki. 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, zaś amplituda – 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 publikacjach [3, 5].

Na podstawie wykonanych symulacji komputerowych powyższych napędów ciągnika kombajnu można 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%.

Dzięki zastosowaniu wysokosprawnego silnika znacznemu zmniejszeniu ulega 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 za sprawą zastosowania znacznie tańszych układów chłodzenia o mniejszych gabarytach.

4. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych analiz i symulacji komputerowych można stwierdzić, że zastosowanie nowoczesnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi zasilanych poprzez przemienniki częstotliwości wyposażone w wektorowe falowniki 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 obniżona, co prowadzi do znacznego zmniejszenia gabarytów układu chłodzenia i jego ceny.

Porównując symulowane układy napędowe lokomotywy dołowej, można stwierdzić, że układy napędowe z silnikami PMSM 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. Wyższa prędkość transportowa lokomotywy z napędem z silnikami PMSM jest uzyskiwana dzięki utrzymywaniu stałej mocy napędu pomimo zwiększania prędkości, co nie jest możliwe dla napędu z silnikiem szeregowym prądu stałego. Należy również zaznaczyć, że uzyskiwanie wyższych prędkości transportowych nie powoduje większego zużycia ładunku elektrycznego z baterii akumulatorów na trasie transportowej.

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

Literatura

1. Bernatt J., Gawron S., Król E.: *Nowoczesne silniki z magnesami trwałymi do zastosowań trakcyjnych*, Materiały IX Międzynarodowej Konferencji MET 2009 „Modern Electric Traction – Nowoczesna Trakcja Elektryczna”, Gdańsk, 24-26.09.2009.
2. Dzikowski A.: *Parametry układów napędowych z silnikami prądu stałego i zmiennego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej*, „Mechanizacja i Automatykacja Górnicza”, 2011, nr 3, s. 13-20.

3. Dzikowski A.: *Zastosowanie silnika z magnesami trwałymi do napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego*, „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2012, nr 94, s. 165-170.
4. 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”, 2011, nr 90, s. 157-162.
5. Dzikowski A., Hefczyc M., Keller J.: *Analiza porównawcza napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego w przypadku zastosowania silnika asynchronicznego klatkowego oraz bezszczotkowego silnika synchronicznego o magnesach trwałych*, „Mechanizacja i Automatykacja Górnicza”, 2012, nr 11, s. 20-36.
6. Katalog producenta silników z magnesami trwałymi firmy Leroy Somer: *LSRPM-PLSRPM Synchronous motors with permanent magnets – 0,75 to 400 kW – Technical catalogue*.
7. Szczucki F., Hefczyc M.: *Energooszczędne urządzenia i napędy maszyn szansą obniżenia kosztów wydobycia*, Materiały XVI Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Szczyrk, 19-23 lutego 2007, s. 709-721.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.