

Wysoko wydajny napęd posuwu górniczego kombajnu ścianowego, wyposażony w silnik synchroniczny z magnesami trwałymi – symulacje pracy

Piotr Dukalski, Robert Rossa, Andrzej Dzikowski

1. Zalety zastosowania silników elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi w napędach górnich

Zastosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM) w napędach górnich, biorąc pod uwagę ich powszechnie znane zalety [1], może mieć bardzo duży wpływ na rozwój technologii oraz wzrost efektywności wydobywczej kopalń. Głównymi z zalet silników PMSM są:

- wyższa sprawność w stosunku do silników indukcyjnych i silników prądu stałego;
- znaczne zwiększenie gęstości mocy w stosunku do silników indukcyjnych i silników prądu stałego (możliwość obniżenia wymiarów gabarytowych i masy urządzenia lub zwiększenia mocy bez zwiększania gabarytu);
- wysoki współczynnik przeciążalności momentem (nawet kilkakrotność momentu znamionowego);
- polepszony współczynnik mocy $\cos\phi$ w stosunku do silników indukcyjnych.

Znane są prace, które opisują zapotrzebowanie przemysłu na rozwiązania pozwalające na zwiększenie efektywności wydobywczej światowego górnictwa [2, 3, 4]. Można zauważyć, że wiele wskazanych wyzwań technicznych, jakie przewiduje się do opracowania i wdrożenia w ciągu najbliższych lat, znajduje rozwiązanie lub jego część w silnikach elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi.

W publikacjach dotyczących przewidywanych na najbliższe lata prac badawczo-rozwojowych w zakresie górnictwa można znaleźć artykuły, które dokładnie przedstawiają zapotrzebowanie na modernizację poszczególnych maszyn górnich, w tym kombajnów ścianowych. Przykładowe prace badawcze, które znajdują uzasadnienie w zapotrzebowaniu przemysłu górnich [4]:

- opracowanie kombajnu w wersji *compact*, który może być zastosowany w pokładach o grubości powyżej 1,2 m, ze względu na warunki zalegania pokładów w Polsce, związane z występowaniem uskoków;
- opracowanie systemu ścianowego z urabianiem kombajnem o wydajności > 6000 t/dobę;
- wdrożenie funkcji regulacyjnych, które z założenia mają zapewnić pełne wykorzystanie potencjału technicznego kombajnu;

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych napędu posuwu kombajnu ścianowego, w którym zastąpiono standardowo stosowany silnik indukcyjny klatkowy silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi (PMSM). Autorzy przedstawili otrzymane wyniki symulacji pracy napędu posuwu dla różnych prędkości obrotowych, przy różnym obciążeniu kombajnu. Przedstawiono budowę silnika PMSM, jego obliczone parametry znamionowe oraz szereg możliwości związanych z zastosowaniem silnika z magnesami trwałymi w tej aplikacji. Autorzy w artykule powołują się na publikacje dotyczące nowych trendów w zakresie badań związanych z przemysłem górnich.

Słowa kluczowe: napęd górnich, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, kombajn górnich, napęd elektryczny.

HIGH EFFICIENT HAULAGE DRIVE OF MINING LONGWALL SHEARER, WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR - SIMULATIONS OF OPERATION

Abstract: This article presents the results of simulations of a longwall shearer haulage drive, in which an electric squirrel cage motor is replaced by a permanent magnet synchronous motor (PMSM). The authors presented the results of analysis of the haulage drive for different speeds, at different loads of shearer. A construction of the PMSM motor, calculated rated parameters of the motor and the number of opportunities associated with the use of PMSM in this application are presented. In the article the authors refer to the publications related to the new trends in researches related to the mining industry.

Keywords: mining drive, permanent magnet synchronous motor, longwall shearer, electric drive.

- umożliwienie wzrostu efektywności technologii kombajnowych (system ścianowy);
- opracowanie wydajnego kombajnu jednoorganowego oraz elektrycznego kombajnu dwuorganowego o niewielkich gabarytach, ponieważ w ścianach niskich zwiększenie postępu przez zwiększenie zabioru kombajnu jest utrudnione lub praktycznie niemożliwe, gdyż przy małej wysokości ściany

powoduje to utrudniony załadunek urobku, co wpływa na pogorszenie warunków urabiania i wzrost zapylenia;

- zakres stosowania poszczególnych maszyn urabiających daje możliwość mechanizacji wszystkich operacji technologicznych, przy czym wysokość ściany i urabialność węgla w pokładzie są czynnikami decydującymi o możliwości zastosowania określonej maszyny urabiającej.

Z przytoczonych przykładów można wywnioskować co najmniej dwa kierunki, w których można modernizować napędy kombajnów ścianowych:

- minimalizowanie wymiarów gabarytowych napędów w celu opracowania jak najbardziej kompaktowej budowy kombajnu, dedykowanego do pracy w niskich ścianach. Realizacja takiego napędu wiąże się z utrzymaniem wysokich parametrów pracy przy jednoczesnej minimalizacji gabarytowej silnika i napędu;
- opracowywanie kombajnów o większej wydajności, pozwalających na szybsze urabianie przy zachowaniu wysokiej efektywności. Takie rozwiązanie wymaga od konstruktorów napędu i silników utrzymania stałych wymiarów gabarytowych silnika, przy jednoczesnym zwiększeniu parametrów pracy (np. momentu obrotowego czy prędkości obrotowej).

W obu przypadkach zasadność odnajduje również zwiększenie efektywności energetycznej maszyn oraz rozwój technik zdalnego sterowania kombajnami ścianowymi w celu wykorzystania pełnego potencjału wydajnościowego (np. szybsze urabianie, zwiększenie sprawności energetycznej kombajnu).

Autorzy publikacji podjęli prace związane z optymalizacją napędu posuwu kombajnu ścianowego KSW-460NE (rysunek 1), polegające na opracowaniu silnika posuwu, wzbudzanego magnesami trwałymi, o parametrach pracy pozwalających na zwiększenie wydajności oraz efektywności pracy całego napędu, bez zmiany wymiarów gabarytowych silnika.

Przedstawiony w artykule model silnika stanowi przykład zastosowania silnika wzbudzanego magnesami trwałymi w wielu możliwych aplikacjach napędów i maszyn dołowych. Autorzy

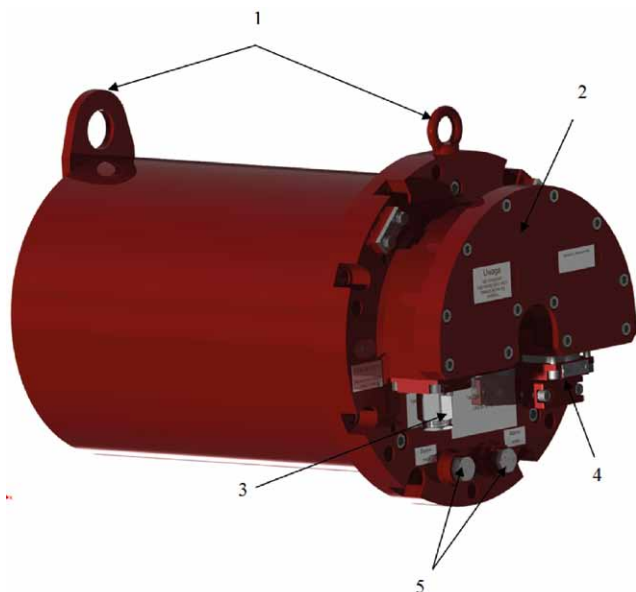


Rys. 1. Kombajn ścianowy KSW-460NE1

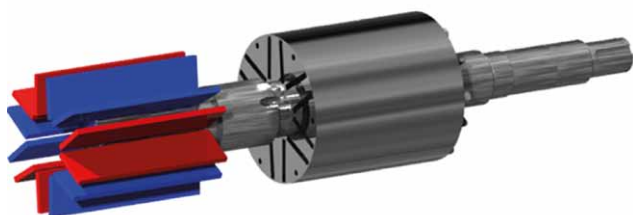
rozpatrują również inne, uzasadnione zastosowania, jak np. lokomotywy dołowe, taśmociągi, wentylatory lutniowe, napędy kombajnów różnych mocy, pojazdy oponowe, wyciągarki różnych typów.

Zalety silników wzbudzanych magnesami trwałymi są na tyle uniwersalne pod względem parametrów pracy, że ich wdrożenie do napędu rozwija nowe możliwości nie tylko w płaszczyźnie eksploatacyjnej i ekonomicznej użytkowania samego napędu lub maszyny, ale również w płaszczyźnie konstruowania napędu lub danej maszyny.

Mając na uwadze możliwość zastosowania wysoko wydajnego i efektywnego energetycznie silnika wzbudzanego magnesami trwałymi, zespół konstruktorski opracowujący napęd lub maszynę może rozważać znaczące zwiększenie jej wydajności lub zmniejszenie jej gabarytów. Należy pamiętać, że zastosowanie silnika wydajniejszego pod względem mocy może wiązać się z koniecznością wymiany niektórych podzespołów, jak np. przekładnia mechaniczna, z którą ten silnik współpracuje. W przypadku zasadności zmniejszenia gabarytów samego napędu, można rozważać zastosowanie silnika z magnesami trwałymi, który będzie osiągać takie same parametry jak silnik indukcyjny klatkowy, jednak przy zmniejszonych wymiarach gabarytowych oraz jednocześnie zwiększonej o kilka procent sprawności energetycznej.



Rys. 2. Model 3D opracowywanego silnika PMSM do zastosowania w napędzie posuwu górniczego kombajnu ścianowego (widok od strony przeciwnapędowej – skrzynka zaciskowa): 1 – uchwyty transportowe; 2 – skrzynka zaciskowa; 3 – wyprowadzenie przewodów sterowniczych; 4 – wyprowadzenie przewodów siłowych; 5 – doprowadzenie wody do układu chłodzenia



Rys. 3. Model 3D wirnika z magnesami trwałymi typu IPM-V

Dla różnych aplikacji dołowych istotne może być inne podejście oraz poprawa innych parametrów pracy silnika.

2. Model silnika synchronicznego z magnesami trwałymi do napędu posuwu kombajnu górniczego

Model opracowanego silnika PMSM przedstawiono na rysunku 2. Budowa zewnętrzna (wymiary gabarytowe oraz montażowe) stanowią dokładne odwzorowanie silnika indukcyjnego klatkowego, o mocy znamionowej 45 kW, który jest standardowo stosowany w napędach posuwu ścianowego kombajnu górniczego KSW-460NE. Jedyną różnicę stanowi dodatkowe wyprowadzenie przewodów sterowniczych (nr 3 na rysunku 2). W standardowym rozwiązaniu wyprowadzenie przewodów zasilających silnika (nr 4 na rysunku 2) może być zastosowane zamiennie z każdej strony skrzynki (nr 3 lub nr 4 na rysunku 2). W przypadku zastosowanego silnika istnieje również dowolność wyprowadzenia przewodów zasilających, z tym, że analogicznie zmienia się miejsce wyprowadzenia przewodów sterowniczych.

Tabela 1. Porównanie parametrów silnika napędu posuwu stosowanego obecnie z parametrami zaproponowanego silnika PMSM

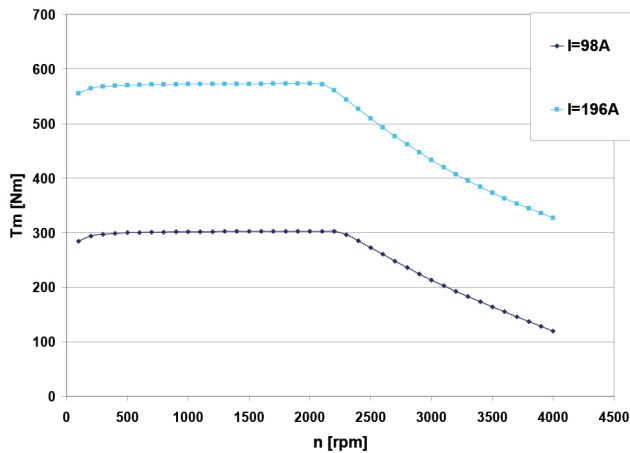
| Typ silnika | Silnik standardowy, indukcyjny klatkowy | Silnik PMSM |
|------------------------------------|---|---------------|
| Wznios | 180 | 180 |
| Moc znamionowa P_N | 45 kW | 70 kW |
| Prędkość obrotowa znamionowa n_N | 1459 obr./min | 2250 obr./min |
| Napięcie znamionowe U_N | 440 V | 440 V |
| Prąd I_N | 74 A | 98 A |
| Sprawność η | 90% | 96% |
| Moment znamionowy T_N | 295 N·m | 298 N·m |
| Prędkość obrotowa maksymalna | 3500 obr./min | 4000 obr./min |

W opracowanym silniku zastosowano wirnik typu IPM (ang. *Interior Permanent Magnet*) z magnesami trwałymi zamocowanymi wewnątrz rdzenia wirnika, przy czym jeden biegun magnetyczny w wirniku jest współtworzony przez dwa magnesy NdFeB ułożone w kształt litery V (rysunek 3). Takie rozmieszczenie magnesów pozwala na zwiększenie ich objętości w obwodzie elektromagnetycznym i skutkuje tzw. koncentracją strumienia wzbudzenia, co korzystnie przekłada się na parametry silnika (zwiększenie momentu na wale i mocy, poprawa sprawności).

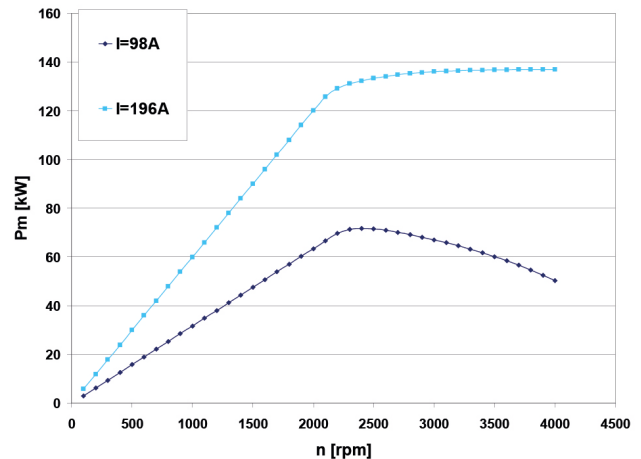
W tabeli 1 przedstawiono obliczone znamionowe parametry pracy silnika PMSM oraz ich zestawienie z parametrami standardowo stosowanego silnika indukcyjnego klatkowego. Oba silniki są takich samych wymiarów gabarytowych, jednak różnica parametrów pracy znamionowej jest znacząca. Różnice na korzyść silnika PMSM dotyczą: sprawności (wzrost o 6%), mocy mechanicznej (wzrost o 55%), prędkości znamionowej (wzrost o 55% – analogicznie do mocy), prędkości maksymalnej (wzrost o 14%). Na etapie projektowania silnika PMSM założono, że jego moment znamionowy pozostanie zbliżony jak dla silnika indukcyjnego, gdyż napęd posuwu kombajnu nie wymaga zwiększania tego parametru. W silniku PMSM moment znamionowy 298 N.m jest jednak osiągnięty aż do prędkości wirnika 2250 obr./min (rysunek 4), co skutkuje zwiększeniem mocy znamionowej silnika do 70 kW (rysunek 5). Możliwe jest przeprojektowanie obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM bez zmiany jego wymiarów gabarytowych tak, by zwiększyć jego znamionowy moment obrotowy, jednak kosztem ograniczenia zakresu prędkości obrotowej wirnika, w którym ten moment jest osiągnięty.

3. Wyniki symulacji pracy napędu posuwu kombajnu z silnikami PMSM

W celu porównania parametrów pracy napędu posuwu kombajnu wyposażonego w silnik PMSM do parametrów napędu wyposażonego w tradycyjny silnik indukcyjny klatkowy wykonano symulacje pracy obu wariantów napędu dla różnych warunków pracy.



Rys. 4. Obliczone charakterystyki momentu mechanicznego silnika PMSM



Rys. 5. Obliczone charakterystyki mocy oddawanej modelowego silnika PMSM

W przypadku silnika indukcyjnego dSKK(s)180L4z w modelach symulacyjnych uwzględniono zasilanie silnika z przeziennika częstotliwości ze skalarnym falownikiem napięcia, natomiast dla silnika PMSM uwzględniono zasilanie z przezienników częstotliwości wyposażonych w wektorowy falownik napięcia oraz aktywny prostownik.

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano środowisko symulacyjne PSIM, w którym zamodelowano silniki napędowe posuwu kombajnu ścianowego KSW-460NE. Jako obciążenie silników założono pracę kombajnu podczas urabiania oraz przy ruchu manewrowym. Zastosowana metoda samej symulacji pracy napędu została szczegółowo opisana w pracy [7].

Porównania pracy napędów dokonano dla trzech prędkości przemieszczania się kombajnu: 5, 10 i 20 m/min. W obu przypadkach dla poszczególnych prędkości pracy założono takie samo obciążenie mechaniczne silników.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki symulacji dla pracy kombajnu na ścianie usytuowanej poziomo. Przedstawione w tabeli 2 parametry dotyczą pojedynczego ciągnika kombajnowego.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 2 można wnioskować, że niezależnie od tego, czy kombajn jest w ruchu manewrowym, czy urabia ścianę, przy tej samej dla obu typów silników prędkości posuwu, napęd ciągnika kombajnu ścianowego wyposażony w silnik PMSM (70 kW) pobiera mniej mocy czynnej z układu zasilania ciągnika niż stosowany obecnie silnik indukcyjny dSKK(s) 180L4z.

Zmniejszenie poboru mocy czynnej przez silnik PMSM (IPMSM) wynika z większej sprawności tych silników, które m.in. nie posiadają uzwojenia w wirniku i tym samym w silnikach tych praktycznie nie występują straty mocy w wirniku.

Na podstawie danych zawartych w tabeli 2 można zauważyć, że dla prędkości posuwu 5 i 10 m/min współczynnik mocy $\cos\phi$ jest dla silnika PMSM o wiele wyższy niż w przypadku silnika indukcyjnego klatkowego. Np. przy urabianiu poziomej ściany z prędkością posuwu 5 m/min wartość współczynnika mocy dla silnika klatkowego wynosi $\cos\phi = 0,63$, natomiast w tych samych warunkach pracy wartość współczynnika $\cos\phi$ dla silnika PMSM wynosi 0,98.

Niska wartość współczynnika mocy dla silnika indukcyjnego w dolnym zakresie prędkości obrotowych wirnika jest związana ze sposobem sterowania tym silnikiem, który do prędkości znamionowej jest sterowany wg algorytmu $U/f = \text{const.}$ i tym samym w silniku jest utrzymywany stały strumień magnetyczny wzbudzany składową bierną prądu zasilania. Przy niskich

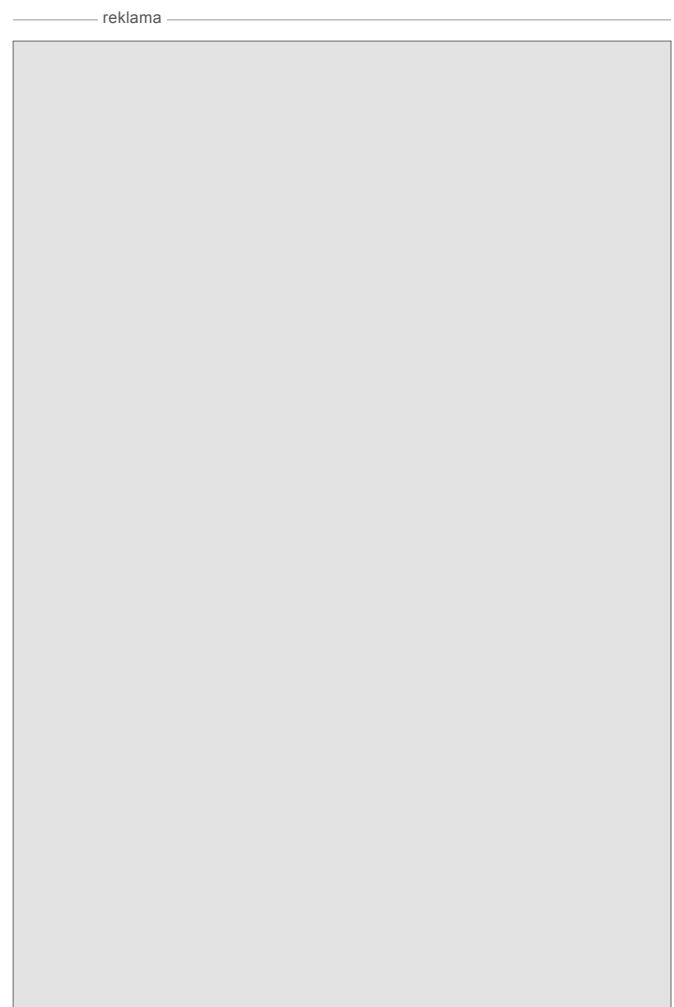


Tabela 2. Wybrane parametry napędu posuwu w kombajnie KSW-46ONE manewrującym lub urabiającym na ścianie usytuowanej poziomo, w zależności od zastosowanych w napędzie silników elektrycznych

| Typ silnika napędowego | Silnik asynchroniczny klatkowy dSKK(s) 180L4z o mocy 45 kW | | Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu IPMSM o mocy 70 kW | | |
|--|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|--|
| | Warunki pomiaru parametrów | Ruch manewrowy z prędkością 5 m/min | Urabianie ściany z prędkością 5 m/min | Ruch manewrowy z prędkością 5 m/min | Urabianie ściany z prędkością 5 m/min |
| Parametry | | | | | |
| Dostarczana przez silnik moc mechaniczna | | 7,26 kW | 9,92 kW | 7,24 kW | 9,91 kW |
| Pobierana przez silnik moc elektryczna | | 8,54 kW | 11,33 kW | 7,68 kW | 10,42 kW |
| Współczynnik mocy silnika | | 0,53 | 0,633 | 0,998 | 0,982 |
| Sprawność silnika | | 85% | 87,6% | 94,3% | 95,1% |
| Wartość skuteczna prądu silnika | | 35,96 A | 39,84 A | 28,18 A | 37,71 A |
| Wartość skuteczna prądu sieci | | 22,26 A | 24,66 A | 10,15 A | 13,77 A |
| Warunki pomiaru parametrów | | Ruch manewrowy z prędkością 10 m/min | Urabianie ściany z prędkością 10 m/min | Ruch manewrowy z prędkością 10 m/min | Urabianie ściany z prędkością 10 m/min |
| Parametry | | | | | |
| Dostarczana przez silnik moc mechaniczna | | 14,44 kW | 19,8 kW | 14,42 kW | 19,82 kW |
| Pobierana przez silnik moc elektryczna | | 17,23 kW | 22,77 kW | 15,56 kW | 21,04 kW |
| Współczynnik mocy silnika | | 0,646 | 0,736 | 0,997 | 0,982 |
| Sprawność silnika | | 83,8% | 87% | 92,7% | 94,2% |
| Wartość skuteczna prądu silnika | | 34,92 A | 40,48 A | 28,71 A | 38,35 A |
| Wartość skuteczna prądu sieci | | 36,76 A | 42,61 A | 20,56 A | 27,79 A |
| Warunki pomiaru parametrów | | Ruch manewrowy z prędkością 20 m/min | Urabianie ściany z prędkością 20 m/min | Ruch manewrowy z prędkością 20 m/min | Urabianie ściany z prędkością 20 m/min |
| Parametry | | | | | |
| Dostarczana przez silnik moc mechaniczna | | 28,86 kW | 39,65 kW | 28,69 kW | 39,65 kW |
| Pobierana przez silnik moc elektryczna | | 32,46 kW | 44,08 kW | 32,21 kW | 43,29 kW |
| Współczynnik mocy silnika | | 0,904 | 0,904 | 0,585 | 0,705 |
| Sprawność silnika | | 88,9% | 90% | 89,1% | 91,6% |
| Wartość skuteczna prądu silnika | | 47,41 A | 64,03 A | 72,49 A | 80,94 A |
| Wartość skuteczna prądu sieci | | 49,58 A | 67,37 A | 42,55 A | 57,2 A |

Tabela 3. Wybrane parametry napędu posuwu w kombajnie KSW-46ONE manewrującym lub urabiającym na ścianie o nachyleniu podłużnym, wznoszącym 35°, w zależności od zastosowanych silników elektrycznych

| Typ silnika napędowego | Silnik asynchroniczny klatkowy dSKK(s) 180L4z o mocy 45 kW | | Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu IPMSM o mocy 70 kW | | |
|--|--|--|---|--|--|
| | Warunki pomiaru parametrów | Ruch manewrowy z prędkością 5 m/min | Urabianie ściany z prędkością 5 m/min | Ruch manewrowy z prędkością 5 m/min | Urabianie ściany z prędkością 5 m/min |
| Parametry | | | | | |
| Dostarczana przez silnik moc mechaniczna | | 14,4 kW | 19,6 kW | 14,48 kW | 19,82 kW |
| Pobierana przez silnik moc elektryczna | | 16,13 kW | 21,87 kW | 15,14 kW | 20,71 kW |
| Współczynnik mocy silnika | | 0,751 | 0,826 | 0,995 | 0,987 |
| Sprawność silnika | | 89,3% | 89,6% | 95,6% | 95,7% |
| Wartość skuteczna prądu silnika | | 47,85 A | 58,96 A | 53,51 A | 71,25 A |
| Wartość skuteczna prądu sieci | | 28,33 A | 34,91 A | 20 A | 27,36 A |
| Warunki pomiaru parametrów | | Ruch manewrowy z prędkością 10 m/min | Urabianie ściany z prędkością 10 m/min | Ruch manewrowy z prędkością 10 m/min | Urabianie ściany z prędkością 10 m/min |
| Parametry | | | | | |
| Dostarczana przez silnik moc mechaniczna | | 28,71 kW | 39,29 kW | 28,84 kW | 39,65 kW |
| Pobierana przez silnik moc elektryczna | | 32,1 kW | 43,41 kW | 30,21 kW | 41,26 kW |
| Współczynnik mocy silnika | | 0,824 | 0,872 | 0,995 | 0,987 |
| Sprawność silnika | | 89,4% | 90,5% | 95,5% | 96,1% |
| Wartość skuteczna prądu silnika | | 51,08 A | 65,24 A | 53,96 A | 71,96 A |
| Wartość skuteczna prądu sieci | | 51,42 A | 65,69 A | 39,91 A | 54,51 A |
| Warunki pomiaru parametrów | | Ruch manewrowy z prędkością 11,5 m/min | Urabianie ściany z prędkością 11,5 m/min | Ruch manewrowy z prędkością 17,5 m/min | Urabianie ściany z prędkością 17,5 m/min |
| Parametry | | | | | |
| Dostarczana przez silnik moc mechaniczna | | 32,81 kW | 45,07 kW | 50,34 kW | 69,39 kW |
| Pobierana przez silnik moc elektryczna | | 36,46 kW | 49,74 kW | 53,43 kW | 72,87 kW |
| Współczynnik mocy silnika | | 0,867 | 0,896 | 0,89 | 0,952 |
| Sprawność silnika | | 90% | 90,6% | 94,2% | 95,2% |
| Wartość skuteczna prądu silnika | | 55,07 A | 72,72 A | 78,88 A | 100,5 A |
| Wartość skuteczna prądu sieci | | 55,46 A | 73,25 A | 70,59 A | 96,28 A |

prędkościach obrotowych wirnika udział tzw. prądu magnetycznego obwód magnetyczny w prądzie zasilania silnika indukcyjnego jest znaczny, co skutkuje znaczącym obniżeniem współczynnika mocy. W silniku PMSM, do pewnej wartości prędkości obrotowej wirnika, tzw. prędkości bazowej, strumień magnetyczny jest wytwarzany w głównej mierze przez magnesy trwałe, zatem składowa bierna prądu zasilania jest stosunkowo niewielka, a współczynnik mocy jest wysoki. Jest to istotna zaleta silnika PMSM, ponieważ rozwiązuje problemy związane z kompensacją mocy biernej.

Dla maksymalnej prędkości posuwu kombajnu 20 m/min korzystniejszym współczynnikiem mocy $\cos\phi$ charakteryzuje się z kolei silnik indukcyjny. Np. przy pracy manewrowej ciągnika z tą prędkością posuwu wartość współczynnika mocy dla silnika PMSM (70 kW) wynosi 0,585, natomiast w tych samych warunkach pracy wartość współczynnika mocy dla silnika indukcyjnego wynosi 0,904. Obniżenie współczynnika mocy dla silnika PMSM jest związane z tym, iż dla tego typu silników powyżej prędkości obrotowej bazowej wirnika konieczne jest zwiększenie składowej biernej prądu w celu

wytworzenia składowej siły magneto-motorycznej (SMM) twornika, skierowanej przeciwnie do SMM wzbudzenia od magnesów trwałych, co skutkuje osłabieniem strumienia magnetycznego głównego w silniku PMSM. Dzięki osłabieniu strumienia głównego możliwa jest praca silnika z wyższymi prędkościami obrotowymi wirnika przy ograniczonej wartości maksymalnej napięcia zasilania na wyjściu przekształtnika energoelektronicznego (falownika) współpracującego z silnikiem PMSM. Zwiększaniu prędkości wirnika w silniku PMSM znacznie powyżej prędkości bazowej towarzyszy więc istotne pogorszenie współczynnika mocy. W przypadku silnika indukcyjnego, w którym magnesowanie obwodu magnetycznego zapewniane jest przez moc bierną pobieraną z sieci zasilającej (a nie przez magnesy trwałe, jak w silnikach IPMSM), osłabieniu strumienia magnetycznego w celu zwiększania prędkości obrotowej towarzyszy zmniejszenie składowej biernej prądu zasilania i tym samym poprawa współczynnika mocy.

W tabeli 3 przedstawiono, uzyskane w wyniku symulacji, parametry elektryczne i mechaniczne pojedynczego ciągnika kombajnowego stosowanego w kombajnie KSW-460NE, dla trzech prędkości ruchu manewrowego i urabiania ściany węgla o nachyleniu podłużnym 35°: 5 i 10 m/min oraz dla maksymalnej prędkości, z jaką w sposób ciągły może pracować kombajn przy tym nachyleniu ściany, a wynikającej z mocy znamionowej silników zainstalowanych w napędzie posuwu. Dla wyższych prędkości obliczenia symulacyjne nie były wykonywane z uwagi na występujące w tych warunkach przeciążenie silników w napędzie posuwu, uniemożliwiające ciągłą pracę kombajnu.

Z tabeli 3 wynika m.in., że niezależnie od trybu pracy kombajnu, przy maksymalnym dopuszczalnym kącie nachylenia urabianej ściany, sprawność stosowanych obecnie do napędu posuwu silników indukcyjnych dSKK(s) 180L4z jest średnio o kilka procent mniejsza niż sprawność proponowanego silnika PMSM. Dzięki temu dla tych samych, z góry narzuconych warunków pracy kombajnu (ta sama moc na wale silników napędowych), napęd posuwu wyposażony w silnik PMSM charakteryzuje

się mniejszym poborem mocy czynnej z sieci zasilającej. Ponadto w stosunku do napędu z silnikami indukcyjnymi zmodernizowane napędy posuwu z silnikami PMSM będą w tych samych warunkach obciążenia pracować przy znacznie wyższych współczynnikach mocy $\cos\phi$, co w połączeniu ze zmniejszonym zapotrzebowaniem na moc czynną pobieraną z sieci skutkuje istotnym zmniejszeniem prądu pobieranego z sieci zasilającej. Zwiększona moc znamionowa silników PMSM pozwoli uzyskać większe prędkości posuwu przy pracy kombajnu w wyrobiskach o dużym nachyleniu podłużnym wznoszącym, jeśli kombajn będzie wyposażony w dotychczas stosowany układ chłodzenia silników. Znaczące zwiększenie prędkości posuwu podczas urabiania ściany przekłada się na istotną możliwość zwiększenia wydobywania.

4. Podsumowanie

Wdrażanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi PMSM do przemysłu górniczego może stanowić odpowiedź na zapotrzebowanie wskazywanych nurtów rozwoju technik wydobywczych oraz może okazać się kolejnym krokiem rozwoju dołowych napędów elektrycznych. Napędy elektryczne wyposażone w silniki PMSM są już standardem w wielu gałęziach przemysłu, gdzie sprawdziły się z uwagi na wysoką sprawność, dużą przeciążalność oraz generalnie wysoką gęstość energii uzyskiwanej z jednostki objętości lub masy silnika.

Silniki PMSM zastąpiły w wielu aplikacjach silniki innych typów.

Autorzy projektu, którego dotyczy niniejszy artykuł, uważają, że rozwój technik związanych z konstruowaniem, sterowaniem oraz produkcją silników z magnesami jest tak zaawansowany, sprawdzony i powszechnie przyjęty, że umożliwia z powodzeniem zastosowanie silników tego typu w warunkach dołowych. Wiąże się to oczywiście z opracowaniem rozwiązań konstrukcyjnych gwarantujących bezpieczeństwo pracy silnika oraz załóg dołowych.

Instytut KOMEL w ciągu ostatnich lat wdrożył tego typu rozwiązania dla trakcji kopalnianej [8, 9].

W pracach opisanych w artykule zespół projektu proponuje zastosowanie

silnika synchronicznego z magnesami trwałymi w napędzie posuwu kombajnu ścianowego.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych i analiz napędu posuwu górniczego kombajnu ścianowego typu KSW-460NE można stwierdzić, że zaproponowany do zastosowania w zmodernizowanym napędzie silnik PMSM (70 kW), charakteryzuje się znacznie lepszymi parametrami eksploatacyjnymi w stosunku do silnika indukcyjnego. Zarówno w warunkach urabiania poziomej, jak i wznoszącej się ściany węgla.

Zgodnie z wynikami symulacji silnik PMSM umożliwia osiągnięcie większych maksymalnych prędkości posuwu kombajnu przy urabianiu ścian wznoszących się niż w przypadku napędu posuwu z silnikami indukcyjnymi. Jest to główny atut napędu z silnikami PMSM, mający duże przełożenie ekonomiczne. Zwiększenie o 50% szybkości urabiania ze znamionowym obciążeniem napędu sugeruje zdecydowane zwiększenie wydajności procesu urabiania.

Zwiększenie wydajności procesu urabiania kombajnu ścianowego zyskujemy również podczas pracy na ścianie poziomej, ponieważ zgodnie z przedstawionymi charakterystykami pracy silnika PMSM znamionowy moment (równy momentowi znamionowemu silnika indukcyjnego) jest osiąganym w znacznie szerszym zakresie prędkości obrotowej (o ponad 50%), co przekłada się na możliwość urabiania ze zwiększoną prędkością posuwu, przy znamionowym obciążeniu organów urabiających.

Niezależnie od kąta nachylenia ściany zasadniczej poprawie ulegają sprawność oraz współczynnik mocy $\cos\phi$. Przekłada się to m.in. na znacznie mniejszy prąd pobierany z sieci elektrycznej, zasilającej napęd posuwu, oraz poprawę sprawności układu napędowego, co bezpośrednio przekłada się na efektywność energetyczną kombajnu.

Zgodnie z wynikami symulacji istotnemu zmniejszeniu ulegnie zapotrzebowanie napędu posuwu na energię, natomiast zmniejszenie poboru prądu z sieci elektrycznej powinno pozwolić zmniejszyć przekroje żył kabli zasilających, a zmniejszenie strat ciepłych w silnikach umożliwi stosowanie w zmodernizowanych napędach posuwu mniejszych gabarytowo, lżejszych i tańszych układów chłodzenia.

Na uwagę zasługuje również fakt, że proponowany przez autorów silnik IPMSM charakteryzuje się znacznie wyższą mocą znamionową (70 kW zamiast 45 kW), wyższą o ok. 6% sprawnością, przy jednoczesnym zachowaniu wymiarów gabarytowych i montażowych w stosunku do porównywanego silnika klatkowego.

Układ falowników zasilających i sterujących zespołem napędów posuwu kombajnu z silnikami IPMSM został wykonany tak, aby wymiarami gabarytowymi i montażowymi nie przekroczył wymiarów obecnie stosowanego falownika do zasilania silników klatkowych.


Obecnie, w ramach projektu, jest budowane stanowisko badawcze, na którym zostaną wykonane badania laboratoryjne opracowanego napędu na modelach fizycznych falownika oraz omówionych silnikach z magnesami trwałymi.

Z uwagi na atrakcyjność i uniwersalność swoich zalet silniki wzbudzone magnesami trwałymi już wkrótce mogą stanowić o nowym poziomie wydajności i efektywności maszyn górniczych.

Literatura

- [1] BERNATT J., GAWRON S., KRÓL E.: *Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi*. „Przegląd Elektrotechniczny” 12/2009.
- [2] PIECZORA E., SUFFNER H.: *Rozwój lokomotyw do kopalnianych kolei podziemnych*. „Maszyny Górnicze” 2/2013.
- [3] PIECZORA E.: *Prognoza rozwoju szynowych systemów transportowych stosowanych w podziemiach kopalń węgla kamiennego*. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” tom 28/2009, zeszyt 1/2.
- [4] BURTAN Z., DRENDA J., KABIESZ J., KOZIEŁ A., KUDEŁKO M., TRENCZEK S., TUREK M.: *Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego*. Praca zbiorowa pod redakcją Mariana Turka, GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA, Katowice 2008.
- [5] ANTONIAK J.: *Wykorzystanie wspomagania komputerowego do wyznaczenia eksploatacyjnych prędkości urabiania kombajnu bębnowego*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa” 10/2003, s. 7–15.
- [6] DUKALSKI P., ROSSA R., DZIKOWSKI A., KURYTNIK I.P.: *Design of PM motor dedicated to longwall shearer advance drive*. Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2015, DOI:10.1109/CPEE.2015.7333329.
- [7] DUKALSKI P., ROSSA R., DZIKOWSKI A.: *Haulage drive with permanent magnet motors in longwall shearer – simulation model*. „Przegląd Elektrotechniczny” 11/2015.
- [8] MRÓZ J., SKUPIEŃ K., DRWIĘGA A., BUDZYŃSKI Z., POLNIK B., CZERNIAK D., DUKALSKI P., BRYMORA L.: *Gentle accumulator drive (GAD) – new directions of development for the mining industry*. „Przegląd Elektrotechniczny” 6/2013.
- [9] GAWRON S.: *Wybrane innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1(109)/2016, s. 1–10.

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

 mgr inż. Piotr Dukalski, e-mail: p.dukalski@komel.katowice.pl
dr inż. Robert Rossa, e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

dr inż. Andrzej Dzikowski, e-mail: a.dzikowski@emag.pl
Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG