

Piotr Dukalski, Robert Rossa

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

Andrzej Dzikowski, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice

GÓRNICZY SILNIK SYNCHRONICZNY WZBUDZANY MAGNESAMI TRWAŁYMI W NAPĘDZIE POSUWU KOMBAJNU ŚCIANOWEGO - SYMULACJE PRACY

MINING PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MOTOR IN HAULAGE DRIVE OF LONGWALL SHEARER - SIMULATION OF OPERATION

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych napędu posuwu kombajnu ścianowego, w którym zastąpiono elektryczny silnik klatkowy silnikiem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi. Autorzy przedstawili wyniki analizy pracy napędu dla różnych prędkości obrotowych, przy różnym obciążeniu kombajnu. W artykule przedstawiono szereg możliwości związanych z zastosowaniem silnika z magnesami w tej aplikacji. Autorzy w artykule powołują się na publikacje związane z nowymi trendami w zakresie badań związanych z przemysłem górnictwem.

Abstract: The article presents the results of longwall shearer haulage drive, which was replaced electric squirrel cage motor by a permanent magnet synchronous motor. The authors presented the results of the analysis of the drive for different speeds, at different load of shearer. The article presents a number of opportunities associated with the use of magnet motor in this application. The authors in the article refer to the publications related to new trends in research related to the mining industry.

Słowa kluczowe: *napęd górniczy, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, kombajn górniczy, napęd elektryczny*

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

1. Kierunki rozwoju kombajnów ścianowych z zastosowaniem silników wzbudzanych magnesami trwałymi w napędach posuwu

Zastosowanie silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM) w napędach górniczych, biorąc pod uwagę ich powszechnie znane zalety [1], może mieć bardzo duży wpływ na rozwój technologii oraz wzrost efektywności wydobywczej kopalń. 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 przeciągu 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 górniczych, w tym kombajnów ścianowych. Przy-

kładowe prace badawcze, które znajdują uzasadnienie w zapotrzebowaniu przemysłu górnictwa [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 ponad 6000 t/dobę;
- wdrożenie funkcji regulacyjnych, które z założenia mają zapewnić pełne wykorzystanie potencjału technicznego kombajnu;
- 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 kom-

bajnu 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:

- 1) minimalizowanie wymiarów gabarytowych napędów w celu opracowania jak najbardziej kompaktowej budowy kombajnu, dedykowanego do pracy na niskich ścianach. Realizacja takiego napędu wiąże się utrzymaniem wysokich parametrów pracy przy jednoczesnej minimalizacji gabarytowej silnika i napędu;
- 2) 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, 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.

2. Kombajn KSW-460NE

Do prac projektowo-badawczych autorzy wybrali napęd posuwu kombajnu KSW-460NE, który jest przeznaczony do pracy w kompleksach o dużej wydajności.

Posuw kombajnu zapewniają dwa zespoły napędowe, z których każdy wyposażono w trójfazowy silnik asynchroniczny. Silniki te zasilane są z napięciowego przemiennika częstotliwości zabudowanego w kombajnie. Przemiennik częstotliwości, w zakresie od 0÷50 Hz zapewnia możliwość płynnej regulacji prędkości posuwu kombajnu, przy zachowaniu stałej wartości momentu napędowego (moment znamionowy silnika), oraz w zakresie od 50÷120 Hz pracę, przy zachowaniu stałej mocy napędowej.

Prędkość posuwu kombajnu według producenta wynosi od 0 do 8 m/min podczas urabiania oraz od 0 do 20 m/min podczas pracy manewrowej.



Rys. 1. Kombajn KSW-460NE

W kombajnach średniej mocy stosowane są silniki prądu stałego lub silniki prądu przemiennego o mocy 2x40 kW, sterowane napięciowymi przemiennikami częstotliwości na napięciu zasilania 460 lub 500 V i o sile posuwu od 500 kN do 600 kN [5]. W kombajnie zamontowany jest transformator 1000/460 V.

W napędach posuwu kombajnów większych, (dużej mocy), stosuje się silniki prądu przemiennego o mocy 2 x 75 kW lub 2 x 100 kW. Silniki te są zasilane napięciem 1 kV [5]. Siła posuwu dużych kombajnów ścianowych wynosi od 800 do 1000 kN.

Przemiennik częstotliwości stosowany w napędach posuwów kombajnów pozwala na sterowanie prędkością posuwu w zakresie od 0 do 10 m/min, przy utrzymaniu stałego momentu obrotowego na wale silnika posuwu oraz od 10 do 20 m/min z malejącym wraz z prędkością momentem obrotowym momentu na wale silnika, przy zachowaniu stałej mocy.

Prędkość urabiania, z uwagi na występujące podczas pracy kombajnu obciążenie silników posuwu, jest równa od 0 do ok. 10 m/min, co odpowiada charakterystyce pracy silników ze

stałym momentem obrotowym (jak na rysunku 2). Regulacja prędkości urabiania jest zależna od obciążenia silników organu urabiającego oraz od silników napędu posuwu.

Podczas urabiania, moc zwiększa się ze wzrostem prędkości posuwu kombajnu lub przy stałej mocy jest zmniejszane obciążenie organów urabiających.

Autorzy projektu dążą do opracowania silnika PMSM (odmiana konstrukcyjna z magnesami trwałymi zagłębionymi w wirniku – Interior PMSM, IPMSM) do napędu posuwu kombajnu, który przy niezmiennych wymiarach gabarytowych umożliwi wyższą prędkość posuwu kombajnu podczas urabiania (nie zmniejszając obciążenia organów urabiających), co wiąże się ze zwiększeniem mocy silnika. Dodatkowo opracowywany silnik, według założeń, powinien charakteryzować się wyższą prędkością obrotową.

3. Nowy napęd posuwu kombajnu z zastosowaniem silników PMSM

Do obliczeń obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM autorzy zastosowali sprawdzoną w Instytucie KOMEL metodę polowo-obwodową, obciążeniową [6]. Na jej podstawie zostały wyznaczone charakterystyki pracy silnika PMSM oraz jego parametry znamionowe. Obliczone wymiary oraz parametry obwodu elektromagnetycznego pozwoliły na opracowanie konstrukcji silnika, którą zaadaptowano do technologii silników wzbudzanych magnesami trwałymi (umieszczenie enkodera, rozmieszczenie przewodów sterowniczych enkodera w silniku, opracowanie algorytmu sterowania silnikiem). W ramach projektu został opracowany również zespół falowników sterujących napędem posuwu kombajnu (układ napędowy posuwu kombajnu składa się z dwóch silników zasilanych z zespołu falowników).

W przypadku analizowanego napędu posuwu kombajnu ścianowego występują dwa zespoły napędowe (ciągniki kombajnowe), składające się obecnie z dwóch silników indukcyjnych klatkowych, zasilanych równolegle z jednego przemiennika częstotliwości o sterowaniu skalarnym, z nadrzędnym regulatorem prędkości. W układzie tym następuje wyrównanie momentów napędowych poszczególnych silników w napędzie ciągników, przy założeniu jednakowych poślizgów silników pracujących poprzez przekładnie mechaniczne na sztywną listwę zębatą napędu posuwu. Jednak w czasie

obrotu kół napędowych o zarysie ewolwentowym poszczególnych ciągników kombajnu następuje cykliczna zmiana prędkości obrotowej silników, powodująca zmiany dynamiczne poślizgu tychże silników.

Przy zastosowaniu w modernizowanym napędzie posuwu silników PMSM, konieczne będzie zasilanie każdego z tych silników z osobnego przemiennika częstotliwości, o sterowaniu wektorowym z regulacją momentu obrotowego.

Zgodnie z założeniami modernizacji napędu posuwu kombajnu KSW-460NE, wymiary gabarytowe oraz montażowe silnika pozostały niezmiennie względem obecnie stosowanego silnika klatkowego typu sDKK(s)180L4z. Również wymiary gabarytowe oraz montażowe opracowanego zespołu falownika zostały zachowane zgodnie z wymiarami falownika stosowanego w rozpatrywanym kombajnie.

Zwiększoną moc silnika do napędu posuwu można wykorzystać na trzy sposoby:

- można zwiększyć jego moment obrotowy, zachowując zakres prędkości, w którym ten moment jest możliwy do wytworzenia przez silnik;
- można zwiększyć zakres prędkości obrotowej silnika, w którym jest on w stanie uzyskać niezmienny względem pierwowzoru moment znamionowy;
- można znaleźć kompromis pomiędzy zwiększeniem zakresu prędkości obrotowej oraz zwiększeniem momentu obrotowego.

Autorzy, po konsultacji z przedstawicielami producenta kombajnów ścianowych, postanowili maksymalnie zwiększyć zakres prędkości obrotowej, zachowując znamionowy moment obrotowy obecnie stosowanego silnika w napędzie posuwu wybranego kombajnu (KSW-460NE). W tabeli 1 porównano obliczone znamionowe parametry pracy zaproponowanego silnika PMSM (wariant wykonania KOMEL 2, aktualnie wykonany model fizyczny silnika jest w trakcie badań) z parametrami znamionowymi silnika stosowanego obecnie w napędzie posuwu.

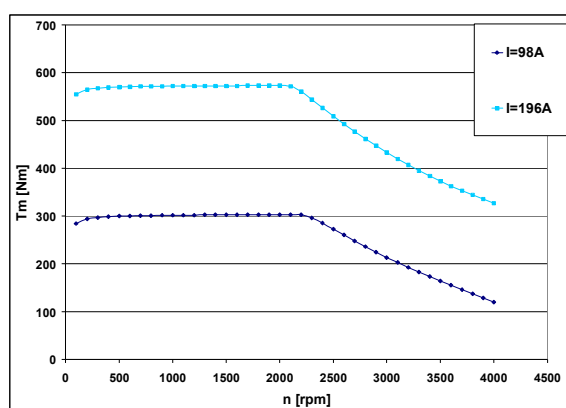
Zgodnie z założeniami projektu, zaproponowany silnik PMSM uzyskuje taki sam moment znamionowy co silnik sSKK(s)180L4z, jednak ten moment jest w stanie utrzymać w szerszym zakresie prędkości obrotowej, bo aż do 2250 obr/min. Jest to równoznaczne z mocą znamionową silnika PMSM na poziomie 70 kW.

Tab. 1. Porównanie parametrów silnika napędu posuwu stosowanego obecnie z parametrami zaproponowanego silnika PMSM (KOMEL 2)

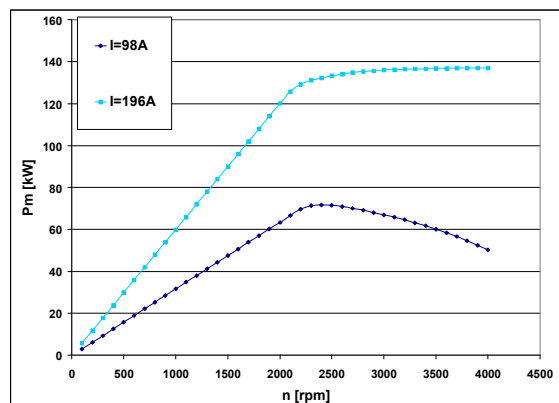
Typ silnika	dSKK(s) 180L4z	PMSM
Wznios	180	180
Moc znamionowa P_N	45 kW	70 kW
Prędkość obrotowa znamionowa n_N	1459 obr/min	2250 obr/min
Napięcie znamionowe U_N	440 V	440 V
Prąd I_N	74 A	98 A
Sprawność η	90 %	96 %
Moment znamionowy T_N	295 N·m	298 N·m
Prędkość obrotowa maksymalna	3500 obr/min	4000 obr/min

Pomimo zwiększenia mocy o 55 %, silnik wzbudzany magnesami trwałymi powinien wg obliczeń osiągać wyższą sprawność o ok. 6 %. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono obliczone charakterystyki elektromechaniczne silnika PMSM dla dwóch wartości prądu zasilania, znamionowego i przy dwukrotnym chwilowym przeciążeniu.

Silnik PMSM osiąga moc znamionową 70 kW, czyli zbliżoną do tej, jaką charakteryzują się silniki posuwu stosowane w kombajnach dużej mocy ($P_N = 75$ kW, co zostało opisane w rozdziale 2 artykułu), podczas gdy silnik dSKK(s)180L4z o takich samych wymiarach gabarytowych osiąga moc stosowaną w kombajnach średniej mocy ($P_N = 45$ kW).



Rys. 2. Obliczone charakterystyki momentu mechanicznego silnika PMSM KOMEL 2



Rys. 3. Obliczone charakterystyki mocy oddawanej modelu silnika KOMEL 2

4. 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.

W przypadku silnika indukcyjnego dSKK(s)180L4z, w modelach symulacyjnych uwzględniono zasilanie silnika z przemiennika częstotliwości ze skalarnym falownikiem napięcia, natomiast dla silnika PMSM uwzględniono ich zasilanie z przemienników 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 symulacji pracy napędu została szczegółowo opisana w innych pracach [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 kom-

bajnu 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 prędkościach obrotowych wirnika, udział tzw. prądu magnesującego 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.

Tab. 2. Wybrane parametry napędu posuwu w kombajnie KSW-460NE 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	
	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.
Warunki pomiaru parametrów				
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				
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				
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

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 in-

dukcyjnego, 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 zwiększenia 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 $\cos\varphi$, 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.

Tab. 3. Wybrane parametry napędu posuwu w kombajnie KSW-460NE 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

5. 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 przeciągu 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 osiągany 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 poprawie 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, 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]. J. Bernatt, S. Gawron, E. Król: *Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2009/12.
- [2]. E. Pieczora, H. Suffner: *Rozwój lokomotyw do kopalnianych kolei podziemnych*, Maszyny Górnicze, nr 2/2013.
- [3]. E. Pieczora: *Prognoza Rozwoju Szynowych Systemów Transportowych Stosowanych w Podziemiach Kopalń Węgla Kamiennego*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 28/2009, Zeszyt 1/2.
- [4]. Z. Burtan, J. Drenda, J. Kabiesz, A. Kozieł, M. Kudelko, S. Trenczek, M. Turek: *Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego*, Praca zbiorowa pod redakcją

Mariana Turka, GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNIC-TWA Katowice 2008.

[5]. Antoniak: Wykorzystanie wspomaganie komputerowego do wyznaczenia eksploatacyjnych prędkości urabiania kombajnu bębnowego, *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, 2003, nr 10, s. 7-15.

[6]. P. Dukalski, R. Rossa, A. Dzikowski, I. P. Kurytnik: *Design of PM motor dedicated to longwall shearer advance drive*, *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2015, DOI:10.1109/CPEE.2015.7333329

[7]. P. Dukalski, R. Rossa, A. Dzikowski: *Haulage drive with permanent magnet motors in longwall shearer – simulation model*, *Przegląd Elektrotechniczny* Nr 11/2015.

[8]. J. Mróz, K. Skupieć, A. Drwięga, Z. Budzyński, B. Polnik, D. Czerniak, P. Dukalski, L. Brymora: *Gentle accumulator drive (GAD) – new directions of development for the mining industry*, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 06, 2013.

[9]. J. Bernatt, S. Gawron, E. Król, *Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi*, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2009/12.

[10]. S. Gawron: *Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania*, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1/2016(109), str. 1-10.

Autorzy

mgr inż. Piotr Dukalski
p.dukalski@komel.katowice.pl

dr inż. Robert Rossa
r.rossa@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL

dr inż. Andrzej Dzikowski
a.dzikowski@emag.pl
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

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”.





Silniki górnicze nowej generacji



- **Energooszczędne silniki górnicze wzbudzone magnesami trwałymi.**
- **Atrakcyjne parametry pracy przy mniejszych gabarytach.**
- **Większa przeciążalność momentem**
- **Wyższa sprawność.**
- **Projektowanie silnika pod indywidualne potrzeby klienta.**
- **Rozwiązania nowoczesne i innowacyjne.**
- **Możliwość pozyskiwania dofinansowań dla projektów.**
- **ponad 65 lat doświadczenia.**








Projekt, pn.: „Wprowadzenie wysokosprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu dołowych maszyn górniczych”

Projekt współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju zgodnie z umową PBS2/B4/10/2014

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL zajmuje się wspieraniem przemysłu oraz produkcją silników i napędów elektrycznych od 1948 roku.

W ostatnich latach swój potencjał skupił na wprowadzeniu na rynek silników górniczych nowej generacji.

Zdaniem ekspertów silniki wzbudzone magnesami trwałymi dzięki swoim zaletom stanowią przyszłość napędów górniczych.

Instytut KOMEL wraz z kooperantami podjął prace badawczo-rozwojowe, mające na celu unowocześnienie stosowanych w przemyśle górniczym napędów elektrycznych poprzez wdrożenie górniczych silników wzbudzanych magnesami trwałymi. Silniki wzbudzone magnesami trwałymi produkcji KOMEL znakomicie potwierdziły swoją przewagę w wielu gałęziach przemysłu.

Teraz kolej na górnictwo!

**Więcej informacji na:
www.komel.katowice.pl**