

Nowoczesne rozwiązanie napędu elektrycznego górniczego przenośnika taśmowego

Tomasz Wolnik, Robert Rossa

1. Wprowadzenie

Większość układów napędowych górniczych przenośników taśmowych zbudowana jest z silnika indukcyjnego klatkowego, sprzęgła, przekładni mechanicznej, hamulca oraz bębna napędowego [1, 2, 3]. Są to rozwiązania sprawdzone i stosowane powszechnie, które jednak nie są rozwiązaniami wolnymi od wad. Na podstawie danych zgromadzonych z kilku kopalń można wnioskować, że odnotowywane są częste awarie elementów pośrednich, w tym głównie przekładni mechanicznej [4]. Poza tym zabudowa napędu w przestrzeni bocznej konstrukcji przenośnika, poza głównym jego obrysem, wymaga powiększonych przekrojów wyrobisk. Stosowane silniki klatkowe pracują zwykle z obciążeniem rzędu 25–50%, co powoduje nieefektywną pracę z uwagi na niski współczynnik $\cos\varphi$ oraz niższy od znamionowego współczynnik sprawności w tym zakresie obciążenia.

W ostatnich latach w dziedzinie górniczych napędów przenośników taśmowych wprowadzone zostały napędy o regulowanej prędkości obrotowej [2, 3, 5, 6]. Pozwoliło to na rozwiązanie problemu poboru dużych wartości prądów rozruchowych. Poza tym regulacja prędkości obrotowej umożliwiła dostosowanie pracy napędu do aktualnej nadawy urobku. Z doświadczeń przeprowadzonych na jednej z kopalń wynika, że zastosowanie regulacji prędkości obrotowej w jednym z napędów przenośnika odstawy głównej pozwoliło na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej podczas jednej zmiany aż o 30%.

Rozwiązaniem alternatywnym, które oprócz regulacji prędkości obrotowej pozwala na wyeliminowanie z układu napędowego elementów pośredniczących oraz ograniczenie przestrzeni instalacyjnej, jest zastosowanie wolnoobrotowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM od *Permanent Magnet Synchronous Motor*), umieszczonego wewnątrz głównego bębna napędowego. Takie rozwiązanie konstrukcyjne zostało opracowane i przebadane w ramach projektu POIG 01.03.01-24-075/12 przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL oraz firmę NAFRA POLSKA.

2. Konstrukcja wolnoobrotowego silnika PMSM

Bezprzekładniowy napęd górniczego przenośnika taśmowego bazuje na wolnoobrotowym silniku PMSM o znamionowej prędkości obrotowej 45 obr./min. Częścią nieruchomą silnika jest uzwojony stojan umieszczony na wale maszyny, natomiast częścią wirującą zewnętrzny wirnik z magnesami trwałymi, nad którym zabudowany jest gumowany bęben napędowy przenośnika. Zaprojektowany układ napędowy zasilany jest poprzez przemiennik częstotliwości z sieci o napięciu 1000 V. Moc

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono i omówiono innowacyjne rozwiązanie napędu górniczego przenośnika taśmowego, bazującego na wolnoobrotowym silniku synchronicznym z magnesami trwałymi, o regulowanej prędkości obrotowej. Silnik z wirnikiem zewnętrznym umieszczony jest wewnątrz bębna napędowego, dzięki czemu z układu napędowego można wyeliminować przekładnię mechaniczną, która – po pierwsze – zmniejsza sprawność układu napędowego, a po drugie – ulega dość częstym awariom. Opracowane rozwiązanie napędu przenośnika taśmowego znacząco ogranicza potrzebną do jego zabudowy przestrzeń, co w warunkach wyrobiskowych ma szczególne znaczenie.

Abstract: The paper presents a novel solution of a variable speed electric drive for mining belt conveyer system which is based on a low-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM). The motor with outer rotor construction is built into a drum which allows to eliminate a mechanical transmission and clutch of the drive system, i.e. the elements that reduce the efficiency of the propulsion system and are responsible for frequent failures. Developed solution of mining belt conveyer significantly reduces the space required for its installation, which is especially important in mining conditions.

znamionowa silnika PMSM wynosi 250 kW. Silnik umieszczony jest wewnątrz głównego bębna napędowego (rys. 1), co pozwala na ograniczenie przestrzeni instalacyjnej do głównego obrysu konstrukcji przenośnika. Z układu napędowego wyeliminowano wszystkie elementy pośredniczące w przekazywaniu momentu, a silnik PMSM stanowi bezpośredni napęd bębna. Cały napęd cechuje się wysokim współczynnikiem sprawności.

Dla znamionowej prędkości silnika prędkość taśmy przenośnikowej wynosi ok. 3,2 m/s. Przeciężalność napędu jest równa 2,4 M_N przy krotności prądu 2,7 I_N . Silnik zasilany jest z przemiennika częstotliwości, więc rozruch napędu odbywa się poprzez łagodne narastanie prędkości obrotowej bez udarów prądowych, będących często przyczyną poślizgu bębna napędowego. Dla omawianego napędu konieczne było opracowanie rozwiązania dotyczącego przekazywania informacji o aktualnej prędkości obrotowej silnika i pozycji wirnika względem stojana. Zaprojektowano specjalny system przekładni, pozwalający



Rys. 1. Model wolnoobrotowego, bezprzekładniowego napędu górniczego przenośnika taśmowego o mocy 250 kW



Rys. 3. Stanowisko badawcze bezprzekładniowego napędu górniczego przenośnika taśmowego



Rys. 2. Uzwojony pakiet stojana silnika PMSM

na zastosowanie klasycznego enkodera absolutnego. W układzie zastosowano 13-bitowy enkoder absolutny firmy Kubler, o komunikacji szeregowej w standardzie SSI. W ten sposób ograniczono liczbę połączeń między enkoderem a układem sterowania, co ma znaczenie ze względu na planowane zapewnienie barier iskrobezpiecznych.

W silniku zastosowano chłodzenie wodne. W żłobkach stojana umieszczone jest trójfazowe, jednowarstwowe uzwojenie o liczbie biegunów $2p = 30$ i poskoku cewki $Y = 3$. Na rysunku 2 przedstawiono fotografię uzwojonego pakietu stojana prototypowego silnika.

W przekształtniku wykorzystano tranzystory IGBT Hitachi MBN800E33D, o maksymalnym napięciu blokowania 3,3 kV i prądzie 800 A. System chłodzenia wodnego, z szeregowym połączeniem elementów napędu: przekształtnik, dławik sieciowy, silniki, pozwalał na skuteczne odprowadzenie ciepła strat. Układ sterowania przemiennika do napędu z silnikiem PMSM został oparty na mikrokontrolerze sygnałowym TMS 320F28335. System sterowania silnika PMSM został oparty na znanym układzie połowo zorientowanym, z optymalizacją stosunku momentu do prądu silnika.

3. Badania testowe

Opracowany i wykonany prototyp napędu został przebadany na dedykowanym stanowisku badawczym. Stanowisko zostało przygotowane tak, aby odwzorować pracę rzeczywistego przenośnika taśmowego. W związku z powyższym, wolnoobrotowy silnik PMSM zintegrowany z gumowanym bębnem napędowym umieszczony został w korpusie przenośnika. Do obciążenia silnika wykorzystano krótki odcinek taśmy przenośnikowej, czteroprzekładniowej oraz klasyczny układ napędowy złożony z silnika indukcyjnego o mocy 250 kW, sprzęgła, przekładni KPL 25 i stacji zwrotnej z bębmem o średnicy 800 mm (rys. 3). Układ obciążenia zasilany był poprzez przemiennik częstotliwości, który umożliwiał zwrot energii do sieci.

Prototypowy silnik PMSM do bezprzekładniowego napędu przenośnika taśmowego posiada następujące parametry znamionowe:

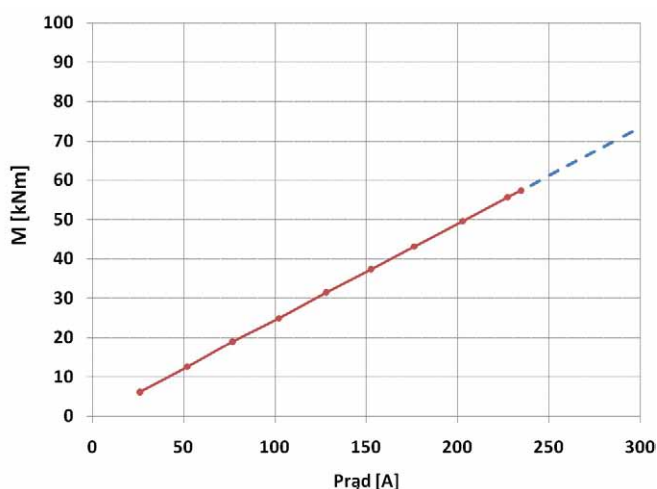
- $P_N = 250$ kW;
- $U_N = 1000$ V (AC);
- $n_N = 45$ obr./min;
- $I_N = 220$ A;
- $M_N = 53$ kNm;
- $\eta_N = 92\%$.

Przed zabudową układu obciążenia na stanowisku badawczym dokonano pomiaru momentu zaczepowego silnika, który wynosił ok. 0,5% momentu znamionowego. Wynik należy uznać za bardzo dobry, szczególnie biorąc pod uwagę, że opracowany silnik jest maszyną wielobiegunową ($2p = 30$).

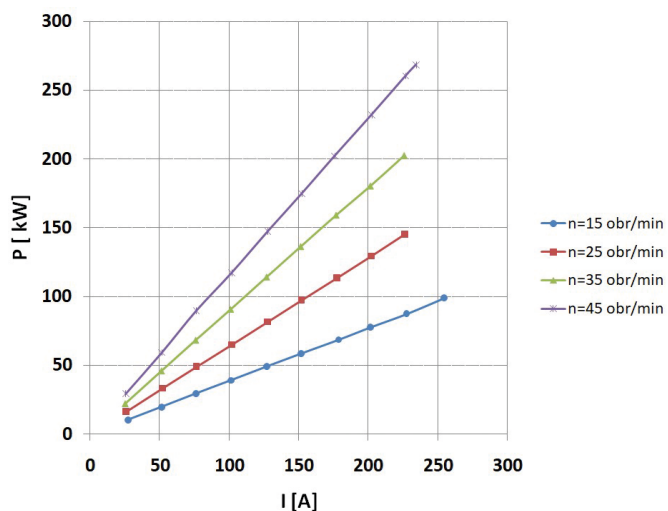
Dla omawianego silnika przeprowadzono próbę nagrzewania dla znamionowych parametrów zasilania i obciążenia maszyny. Wydatek medium chłodzącego wynosił 12 l/min. W uzwojeniu stojana umieszczono 9 czujników pomiarowych Pt100, z czego 3 w czołach od strony napędowej D, 3 w czołach od strony przeciwnapędowej ND oraz 3 w żłobkach pośrodku długości rdzenia magnetycznego stojana. Czujniki zostały rozłożone symetrycznie na obwodzie twornika. Najwyższy przyrost temperatury, ok. 60 K, odnotowano w czołach stojana po stronie D, po której umieszczono wylot czynnika chłodzącego. Różnica temperatury na wlocie i wylocie czynnika chłodzącego zarejestrowana na koniec próby nagrzewania wynosiła 22,5 K. Temperatura łożysk nie przekraczała 35°C.

Na rysunku 4 przedstawiono zmierzoną charakterystykę momentu mechanicznego silnika w funkcji wartości skutecznej prądu obciążenia.

Na podstawie dokonanych pomiarów wyznaczono charakterystyki eksploatacyjne silnika. Na rysunkach 5–6 przedstawiono charakterystyki mocy mechanicznej oraz sprawności układu napędowego w funkcji prądu obciążenia dla wybranych wartości prędkości obrotowych. Współczynnik sprawności napędu bezprzekładniowego, w zakresie obciążenia do 0,5 momentu znamionowego i prędkości obrotowej 45 obr./min, jest o ok. 8–10% wyższy w stosunku do analogicznego rozwiązania układu napędowego z silnikiem indukcyjnym i przekładnią mechaniczną. W skali całego „cyklu życia” przenośnika pozwala to na znaczne ograniczenie kosztów eksploatacyjnych [4].



Rys. 4. Charakterystyka momentu mechanicznego silnika w funkcji prądu obciążenia silnika

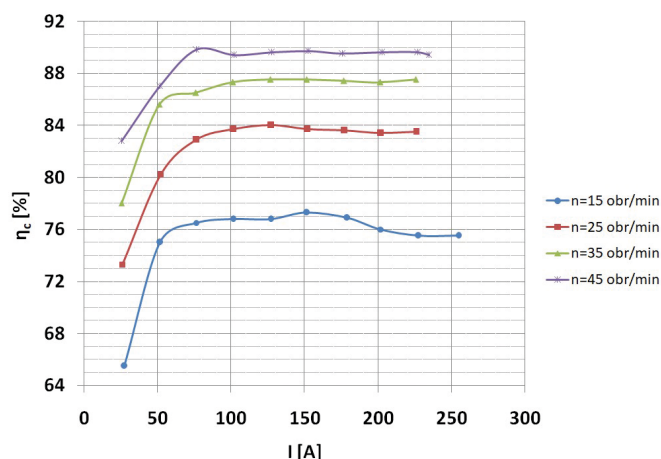


Rys. 5. Charakterystyka mocy mechanicznej silnika w funkcji prądu obciążenia dla wybranych wartości prędkości obrotowych

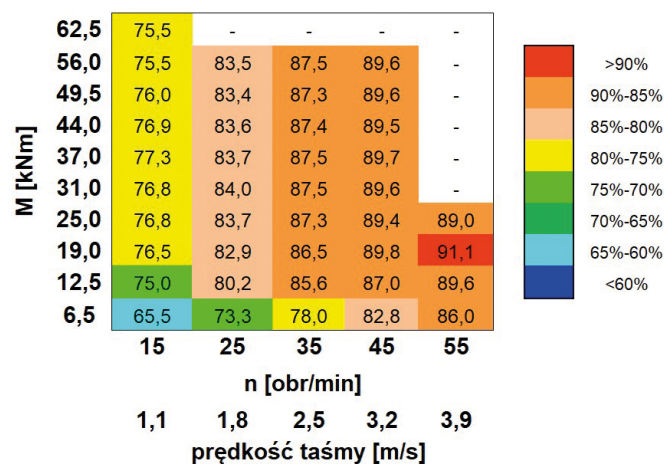
4. Korzyści stosowania bezprzekładniowego napędu elektrycznego

Poza względami natury konstrukcyjnej, podstawową zaletą bezprzekładniowego napędu górniczego przenośnika taśmowego jest zwiększenie współczynnika sprawności, a tym samym ograniczenie kosztów eksploatacyjnych. Na rysunku 7 przedstawiono mapę sprawności bezprzekładniowego układu napędowego z silnikiem PMSM o regulowanej prędkości obrotowej (silnika wraz z falownikiem) w funkcji momentu obciążenia M oraz prędkości taśmy.

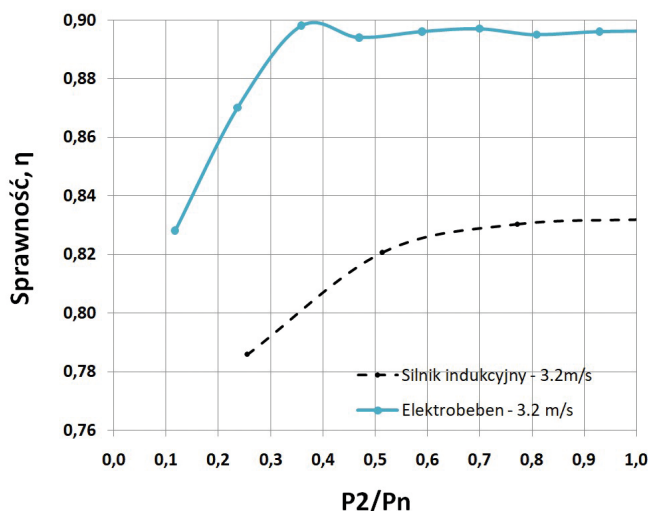
Ze względu na wprowadzane coraz częściej napędy przenośników taśmowych o regulowanej prędkości obrotowej z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z przemienników częstotliwości, na rysunku 8 przedstawiono porównanie sprawności



Rys. 6. Charakterystyka sprawności napędu (silnik wraz z falownikiem) w funkcji prądu obciążenia dla wybranych wartości prędkości obrotowych



Rys. 7. Mapa sprawności bezprzekładniowego układu napędowego (łącznie z falownikiem) o regulowanej prędkości obrotowej



Rys. 8. Porównanie współczynników sprawności bezprzekładniowego układu napędowego z silnikiem PMSM oraz klasycznego układu napędowego z wysoko sprawnym silnikiem indukcyjnym i przekładnią mechaniczną o regulowanej prędkości obrotowej

z silnikiem indukcyjnym do sprawności bezprzekładniowego napędu elektrobębna, dla nominalnej prędkości taśmy równej 3,2 m/s. W tym przypadku w obliczeniach współczynnika sprawności klasycznego układu napędowego uwzględniono, oprócz sprawności silnika i przekładni mechanicznej, również sprawność przemiennika częstotliwości. Jeżeli przyjąć, że pomimo znacznego niedociążenia jednostek napędowych w normalnym trybie pracy przenośnika, ich moc znamionowa dobrana jest prawidłowo, wówczas należy zwrócić szczególną uwagę na współczynnik sprawności układu napędowego w zakresie obciążenia 0,1 do 0,5 obciążenia znamionowego. Współczynnik sprawności napędu bezprzekładniowego w zakresie obciążenia 0,1 do 0,5 obciążenia znamionowego jest wyższy o ok. 8–10% w stosunku do napędu klasycznego z silnikiem indukcyjnym, co daje już wymierne korzyści finansowe z racji ograniczenia kosztów eksploatacyjnych.

5. Podsumowanie

W publikacji zaprezentowano innowacyjne i nowoczesne rozwiązanie napędu górniczego przenośnika taśmowego, w którym wykorzystano zalety wolnoobrotowego silnika PMSM. Opracowana konstrukcja pozwala na eliminację z układu napędowego przekładni mechanicznej i innych elementów układu, pośredniczących w przekazywaniu momentu. Opracowane rozwiązanie eliminuje szereg wad i niedogodności stosowanych obecnie rozwiązań, a przede wszystkim zwiększa sprawność układu napędowego nawet o ok. 10%. Prototypowy napęd bezprzekładniowy opracowany został przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL oraz firmę NAFRA POLSKA w ramach projektu POIG.01.03.01-24-075/12.

Literatura

- [1] GWOŹDZIECKI M., ŚWIĄTKIEWICZ H.: *Przenośniki*. WNT, Warszawa 1979.
- [2] ANTONIAK J.: *Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym energooszczędne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [3] KAROLEWSKI B., PIEŃKOWSKI K.: *Elektryczne układy napędowe przenośników taśmowych w górnictwie odkrywkowym*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 58/2005.
- [4] WOLNIK T.: *Bezprzekładniowy napęd elektryczny górniczego przenośnika taśmowego*. „Przegląd Górniczy” 7/2016.
- [5] KASZTELEWICZ Z., REIZER R., SZYMAŃSKI J., ŚWIDERSKI J.: *Przemienniki częstotliwości w napędach jazdy gąsienicowych maszyn górniczych i węglowych przenośników taśmowych o regulowanej prędkości taśmy*. „Górnictwo i Geoinżynieria” 31/2007.
- [6] TRAJDOS M., LEŚNIEWSKI K.: *Zastosowanie napędów o regulowanej prędkości w odkrywkowych zakładach górniczych – zagadnienia wybrane*. „Górnictwo Odkrywkowe” 3–4/2012.

Artykuł opublikowany w ramach projektu badawczo-rozwojowego nr POIG.01.03.01-24-075/12 „Bezprzekładniowy i wysoko sprawny napęd elektryczny górniczego przenośnika taśmowego”.

mgr inż. Tomasz Wolnik
e-mail: t.wolnik@komel.katowice.pl
dr inż. Robert Rossa
e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL