

Tomasz Wolnik, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Krystian Skupień, Jarosław Mróz, Nafra Polska Sp. z o.o., Rybnik

WOLNOOBROTOWY SILNIK SYNCHRONICZNY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI JAKO BEZPRZEKŁADNIOWY NAPĘD GÓRNICZEGO PRZENOŚNIKA TAŚMOWEGO

LOW-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR AS A GEARLESS DRIVE OF MINING CONVEYOR BELT

Streszczenie: W publikacji przedstawiono innowacyjne rozwiązanie napędu górniczego przenośnika taśmowego. Wolnoobrotowy silnik z magnesami trwałymi o regulowanej prędkości obrotowej umieszczony jest wewnątrz bębna napędowego. Tym sposobem z układu napędowego wyeliminowano szereg elementów pośredniczących typu sprzęgło czy przekładnia, które zmniejszają sprawność układu napędowego, a poza tym ulegają dość częstym awariom. Opracowane rozwiązanie znacząco ogranicza również potrzebną do zabudowy napędu przenośnika przestrzeń, co w warunkach wyrobiskowych ma szczególne znaczenie.

Abstract: This paper presents a novel solution of mining conveyor belt drive system. Low-speed PMSM with adjustable rotational speed is placed inside the drum. It's allow for elimination from drive system gear and clutch, which reduce efficiency of drive system and it's are quite emergency. Developed solution significantly limits the space needed for drive housing, which is especially important in mining conditions.

Słowa kluczowe: napęd przenośnika taśmowego, silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, górnicze przenośniki taśmowe, napęd bezprzekładniowy

Keywords: conveyor belt drive, permanent magnet synchronous motors, mining conveyor belts, gear-less drive system

1. Wstęp

Stosowane obecnie układy napędowe górniczych przenośników taśmowych składają się z silnika indukcyjnego klatkowego, sprzęgła, przekładni mechanicznej, hamulca oraz bębna napędowego [1,2,3]. Są to rozwiązania sprawdzone i stosowane powszechnie, które jednak cechuje szereg wad. Odnotowywane są częste awarie elementów pośredniczących w przekazywaniu momentu, w tym głównie przekładni mechanicznej, które dodatkowo obniżają sprawność całego napędu [4]. Poza tym, zabudowa napędu wymaga powiększonych wyrobisk, ze względu na montaż w przestrzeni bocznej konstrukcji przenośnika, poza głównym jego obrysem. Stosowane silniki klatkowe pracują zwykle z obciążeniem rzędu 25-50%, co powoduje nieefektywną pracę z uwagi na niski współczynnik mocy oraz niższy od znamionowego współczynnik sprawności w tym zakresie obciążenia.

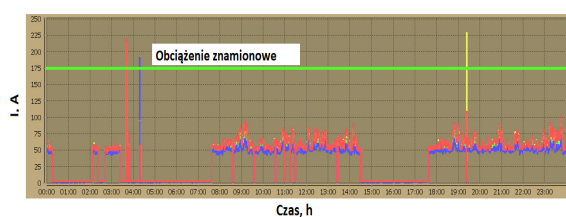
Główną innowacją w ostatnich latach w dziedzinie górniczych napędów przenośników taśmowych było zastosowanie napędów o prędkości regulowanej, wykorzystujących od zasilania przemienniki częstotliwości [2,3,5,6].

W ten sposób rozwiązano problem poboru dużych wartości prądów rozruchowych oraz umożliwiono 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%. Nie eliminuje to jednak wszystkich obecnych niedoskonałości układu napędowego. Rozwiązaniem alternatywnym, które oprócz regulacji prędkości obrotowej pozwala na wyeliminowanie z układu napędowego elementów pośredniczących oraz ograniczenie przestrzeni instalacyjnej do głównego obrysu konstrukcji przenośnika, jest zastosowanie wolnoobrotowego silnika synchronicznego PMSM 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.

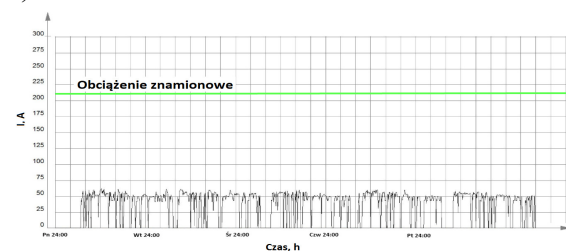
2. Analiza warunków pracy układów napędowych górniczych przenośników taśmowych

W ramach rozeznania rzeczywistych warunków pracy napędów górniczych przenośników taśmowych poproszono wybrane kopalnie o zarejestrowanie przebiegów czasowych wartości skutecznych prądów fazowych silników napędowych, pracujących w odstawach głównych. Na rysunku 1 przedstawiono otrzymane wyniki dla różnego czasu rejestracji. Silniki, na których dokonywano pomiaru pracowały ze stałą wartością prędkości obrotowej.

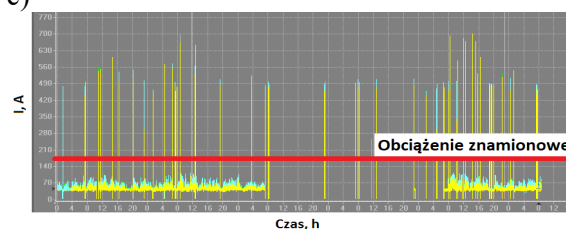
a)



b)



c)



Rys. 1. Przebiegi czasowe wartości skutecznych prądów fazowych silników napędowych górniczych przenośników taśmowych pracujących w odstawach głównych

Analizując przedstawione na rysunku 1 przebiegi czasowe można stwierdzić, że obciążenie znamionowe silników napędowych nie przekracza 50% obciążenia znamionowego, a zwykle jest na poziomie 30-40%. Świadczy to o znacznym niedociążeniu tego rodzaju napędów. Praca silnika indukcyjnego z obciążeniem rzędu 25-50% obciążenia znamionowego jest nieefektywna głównie ze względu na niski współczynnik mocy $\cos\phi$, jak również niższy od znamionowego współczynnik sprawności.

Ponadto, brak możliwości regulacji prędkości obrotowej silnika zwiększa niepotrzebnie ilość obiegów taśmy, całkowite opory ruchu przenośnika oraz powoduje szybsze zużycie części mechanicznych tj. bębnow, krążników, przekładni, sprzęgieł i taśmy. Z doświadczeń przeprowadzonych w jednej z kopalń wynika, że zastosowanie regulacji prędkości obrotowej napędów przenośnika odstawy głównej pozwoliło na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej podczas jednej zmiany aż o 30%. Szacowane w przeciągu roku oszczędności z tego tytułu dla jednego przenośnika taśmowego wynoszą, w zależności od ilości wydobywanego urobku, od 120 000 zł (5000t/dobę) do 500 000 zł (20000 t/dobę) [4].

Napędy górniczych przenośników taśmowych ze względu na trudne warunki pracy ulegają dość częstym awariom. W tabeli 1 przedstawiono roczne statystyki awaryjności poszczególnych elementów układu napędowego udostępnione przez dwie kopalnie węgla kamiennego.

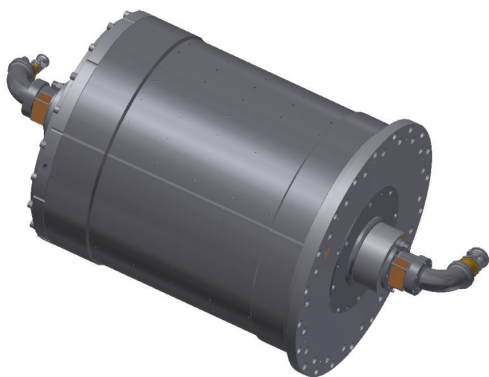
Tabela. 1. Awaryjność elementów układu napędowego górniczych przenośników taśmowych

	Kopalnia nr 1	Kopalnia nr 2
Liczba zainstalowanych przenośników na kopalni	50	80
Awaria układu hamulcowego	4	b.d
Awaria przekładni mechanicznej	17	24
Awaria bębna	61	26
Awaria silnika elektrycznego	22	b.d
Awaria układu automatyki	12	b.d

Z przedstawionych danych z tabeli 1 wynika, że zarówno przekładnia mechaniczna, jak również bęben przenośnika ulegają dość częstym awariom. W przypadku kopalni 1 na 50 zainstalowanych przenośników odnotowano 17 awarii przekładni mechanicznych (34%) w ciągu roku, natomiast w kopalni 2 na 80 zainstalowanych przenośników 24 awarie (30%).

3. Konstrukcja wolnoobrotowego silnika PMSM

Analiza warunków pracy napędów górniczych przenośników taśmowych, jak też dostrzegane niedoskonałości obecnie pracujących rozwiązań były przyczyną opracowania innowacyjnego rozwiązania napędu górniczego przenośnika taśmowego, w którym wolnoobrotowy silnik z magnesami trwałymi o znamionowej prędkości obrotowej 45 obr/min umieszczony jest wewnątrz głównego bębna napędowego (Rys.2). Ograniczona do minimum została w ten sposób przestrzeń instalacyjna układu napędowego. Ponadto, z układu napędowego wyeliminowano wszystkie elementy pośredniczące w przekazywaniu momentu, a silnik PMSM stanowi bezpośredni napęd bębna. Tym samym zwiększono współczynnik sprawności całego układu napędowego. Na rysunku 3 przedstawiono silnik napędowy umieszczony wewnątrz bębna zabudowanego w korpusie przenośnika.



Rys. 2. Wolnoobrotowy, bezprzekładniowy napęd górniczego przenośnika taśmowego o mocy 250 kW



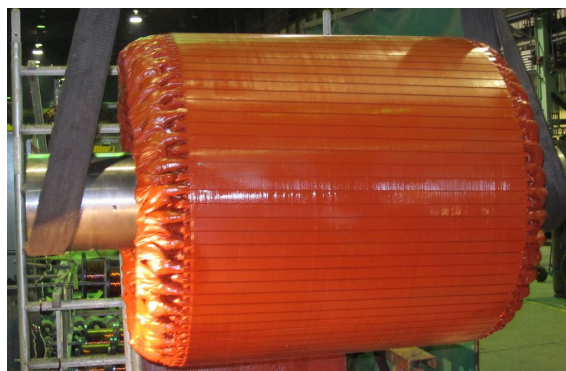
Rys. 3. Prototypowy napęd o mocy 250 kW zabudowany w korpusie

Zaprojektowany prototypowy układ napędowy zasilany jest poprzez przemiennik częstotliwości

z sieci o napięciu 1000V. Moc znamionowa silnika PMSM wynosi 250 kW, a znamionowa prędkość obrotowa 45 obr/min. Dla takiej prędkości silnika prędkość taśmy wynosi ok. 2 m/s. Przeciążalność napędu jest równa 2,4 Mn przy krotności prądu 2,7 In. Rozruch napędu odbywa się poprzez łagodne narastanie prędkości obrotowej bez uderów momentowych, będących często przyczyną poślizgu bębna napędowego.

Ze względu na odwróconą konstrukcję silnika (wirnik zewnętrzny), koniecznym było opracowanie rozwiązania dotyczącego przekazywania informacji o aktualnej prędkości obrotowej silnika i pozycji wirnika względem stojana. Zaprojektowano specjalny system przekładni pozwalający na zastosowanie klasycznego enkodera absolutnego. Prędkość obrotowa z tarczy łożyskowej przenoszona jest poprzez odpowiednio dobrane przełożenie na wałek enkodera umieszczonego w łatwo dostępnym miejscu w wale silnika. 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 jest istotne, ze względu na planowane zapewnienie barier iskrobezpiecznych.

Układ chłodzenia silnika został oparty na chłodzeniu wodnym. Głównym elementem układu jest kanał wodny umieszczony pod pakietem blach stojana. W żłobkach stojana umieszczone jest trójfazowe, jednowarstwowe uzwojenie o poskoku cewki $Y=3$. Na rysunku 4 przedstawiono fotografię uzwojonego pakietu stojana prototypowego silnika.



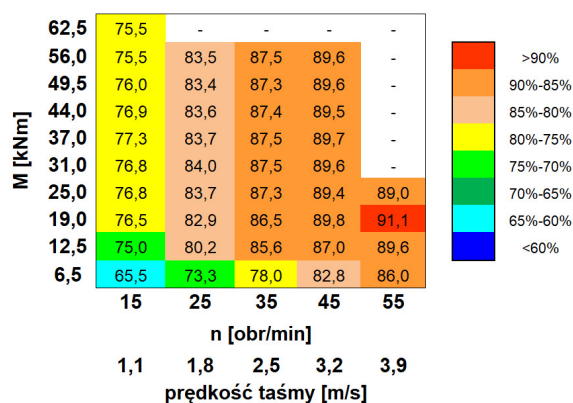
Rys. 4. Uzwojony pakiet stojana silnika prototypowego

Silnik zasilany jest z przemiennika częstotliwości współpracującego z siecią o napięciu znamionowym 1000 V. W przekształtniku wyko-

rzystano tranzystory IGBT Hitachi MBN800E33D o maksymalnym napięciu blokowania 3,3 kV i prądzie 800 A. System chłodzenia wodnego z szeregowym połączeniem elementów napędu: przekształtniki, 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.

4. Korzyści stosowania bezprzekładniowego napędu elektrycznego

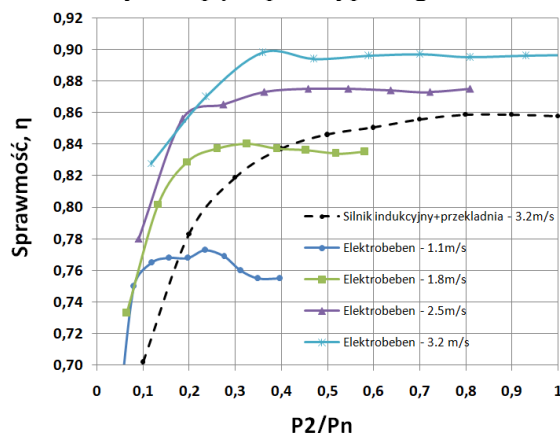
Poza względami natury konstrukcyjnej podstawową zaletą bezpośredniego napędu górniczego przenośnika taśmowego z wykorzystaniem wolnoobrotowego silnika PMSM jest zwiększenie współczynnika sprawności (efektywności), a tym samym ograniczenie kosztów eksploatacyjnych. Na rysunku 5 przedstawiono mapę sprawności bezprzekładniowego układu napędowego z silnikiem PMSM o regulowanej prędkości obrotowej (łącznie z falownikiem) w funkcji momentu obciążenia M oraz prędkości taśmy.



Rys. 5. Mapa sprawności bezprzekładniowego układu napędowego (łącznie z falownikiem) z wolnoobrotowym silnikiem PMSM o regulowanej prędkości obrotowej

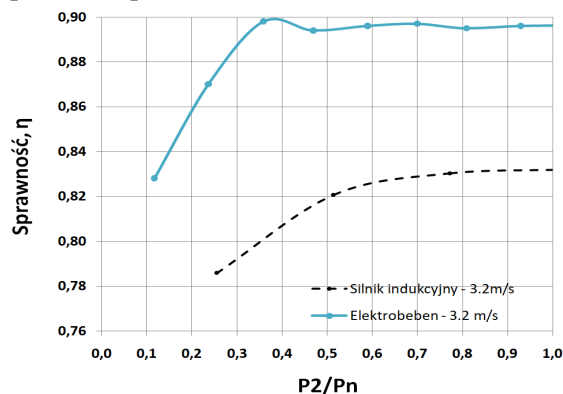
Na rysunku 6 przedstawiono porównanie sprawności napędu bezprzekładniowego o regulowanej prędkości obrotowej z wysokosprawnym napędem asynchronicznym bez możliwości regulacji prędkości obrotowej, współpracującym z przekładnią o mocy 250 kW. Charakterystyki silnika asynchronicznego wyznaczono w oparciu o dane katalogowe oraz przyjęte

wartości sprawności elementów pośredniczących. Charakterystyki sprawności napędu bezprzekładniowego wyznaczono z badań stanowiskowych napędu prototypowego.



Rys. 6. Porównanie współczynników sprawności bezprzekładniowego układu napędowego z silnikiem PMSM oraz klasycznego układu napędowego z wysokosprawnym silnikiem indukcyjnym i przekładnią mechaniczną bez regulacji prędkości obrotowej.

Ze względu na to, że coraz częściej wykorzystywane są napędy asynchroniczne o regulowanej prędkości obrotowej zasilane z przekształtników częstotliwości, na rysunku 7 przedstawiono porównanie sprawności tego rodzaju napędu z napędem bezprzekładniowego 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.



Rys. 7. Porównanie współczynników sprawności bezprzekładniowego układu napędowego z silnikiem PMSM oraz klasycznego układu napędowego z wysokosprawnym silnikiem indukcyjnym i przekładnią mechaniczną o regulowanej prędkości obrotowej

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 obciążeń 0,1 do 0,5 obciążenia znamionowego. W tym zakresie pracy sprawność napędu bezprzekładniowego jest wyższa w stosunku do klasycznego rozwiązania bez regulacji prędkości obrotowej o ok. 5-6%. W przypadku „zmiany” takiego napędu stanowi to pewien punkt odniesienia, jednakże wiadomo, że samo wprowadzenie możliwości regulacji prędkości obrotowej przenośnika pozwala na znaczne oszczędności energii (ok.30%) ze względu na duże opory ruchu samego przenośnika. W związku z powyższym miarodajnym porównaniem jest porównanie klasycznego układu napędowego o regulowanej prędkości obrotowej z napędem bezprzekładniowym z silnikiem PMSM. W tym przypadku współczynnik sprawności napędu bezprzekładniowego w zakresie obciążenia 0.1 do 0.5 obciążenia znamionowego jest wyższy o ok.8-10 %, co daje już wymierne korzyści finansowe z racji ograniczenia kosztów eksploatacyjnych.

5. Podsumowanie

W publikacji zaprezentowano innowacyjny napęd górniczego przenośnika taśmowego wykorzystującego wolnoobrotowy silnik PMSM, pozwalający na eliminację z układu napędowego przekładni mechanicznej. 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.

6. 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, Nr 58/2005.

[4]. Wolnik T.: Bezprzekładniowy napęd elektryczny górniczego przenośnika taśmowego, *Przegląd Górniczy* 7/2016, str. 63-68.

[5]. Kasztelewicz Z., Reizer R., Szymański J., Świdorski J.: *Przełączniki 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 regulowanej prędkości w odkrywkowych zakładach górniczych - zagadnienia wybrane*, *Górnictwo Odkrywkowe*, Tom R.53 nr 3-4, str. 9-13, 2012r.

Artykuł opublikowany w ramach projektu badawczo - rozwojowego nr POIG.01.03.01-24-075/12 "Bezprzekładniowy i wysokosprawny napęd elektryczny górniczego przenośnika taśmowego."