

# Energooszczędny napęd młyna kulowego

Tomasz Zawilak, Jan Zawilak

## 1. Wstęp

Nieustająca tendencja do poszukiwania energooszczędnych rozwiązań przejawia się także w dziedzinie maszyn elektrycznych. Według najnowszej normy IEC 60034-30-1 uzyskanie sprawności odpowiadającej klasie IE5 będzie nieosiągalne dla klasycznych maszyn indukcyjnych. Alternatywą stają się maszyny wzbudzone magnesami trwałymi, w tym te z możliwością uruchamiania poprzez bezpośrednie przyłączenie do sieci zasilającej (z ang. *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*). Z inicjatywy prof. dr hab. inż. Andrzeja Demenka z Zakładu Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej powołano konsorcjum, które podjęło się wykonania badań oraz opracowania zagadnień nt. „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”. Ze względu na możliwości wykonania badań laboratoryjnych zespoły zajmowały się zagadnieniami konstrukcji i budowy głównie maszyn małej mocy. W Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych (obecnie Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych) podjęto badania, których celem było poszerzenie wiedzy nt. energooszczędnych układów napędowych z silnikami elektrycznymi dużych mocy o nowych strukturach obwodów magnetycznych wzbudzanych magnesami trwałymi, a ich wdrożenia pozwolą na znaczne zmniejszenie zużycia energii. Napędy mają być dostosowane do pracy w warunkach kopalnianych. Korzystając z wieloletnich kontaktów i współpracy z przemysłem produkującym i eksploatującym maszyny elektryczne, zaproponowano wykonanie i zainstalowanie prototypów takich maszyn o mocach większych od 1 MW w napędach kopalń rud miedzi oraz węgla kamiennego [2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 14].

Celem artykułu jest przedstawienie właściwości wolnoobrotowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi typu LSPMSM zastosowanego w procesie mielenia rudy miedzi.

## 2. Badany obiekt

We współpracy Politechniki Wrocławskiej, KGHM Polska Miedź SA oraz DFME (wcześniej Dolmel) wykonano prototypowy silnik LSPMSM (SMH-1732T, 630kW), przewidziany do napędu młyna kulowego (rys. 2) w miejsce silnika typu SAS (rys. 1).

## 3. Analiza właściwości silnika

Specyfika maszyn typu LSPMSM powoduje, że do dziś nie opracowano jednoznacznych wytycznych pozwalających na

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania silników typu LSPMSM w napędzie w procesie mielenia rudy miedzi. Istotą tych silników jest ich prosta budowa i eksploatacja, a uruchomienie odbywa się przez bezpośrednie przyłączenie do napięcia zasilającego. Pokazano charakterystyki eksploatacyjne oraz przeanalizowano właściwości rozruchowe silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi ( $P = 630 \text{ kW}$ ,  $U = 6000 \text{ V}$ ,  $n = 187,5 \text{ obr./min}$ ) napędzającego młyn kulowy w zakładzie przeróbki miedzi.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni, mielenie rudy

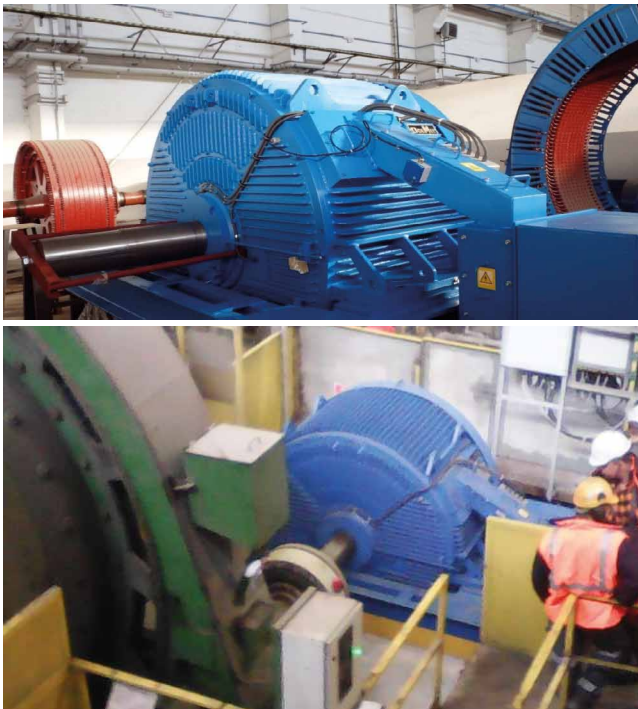
## 🇬🇧 ENERGY-EFFICIENT MOTOR IN BALL MILL APPLICATION

**Abstract:** This paper presents the results of application Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) in ball mill drive. The main advantages of these motors are robust construction and direct on line start ability. The full load characteristics and starting abilities of LSPMSM ( $P_n = 630 \text{ kW}$ ,  $U_n = 6000 \text{ V}$ ,  $N_n = 187,5 \text{ rpm}$ ) driving a ball mill in copper processing plant.

Keywords: synchronous motor, permanent magnet, direct on line starting, grinding the ore



Rys. 1. Silnik typu SAS zamontowany na stanowisku pracy



Rys. 2. Silnik typu SAS oraz prototypowy LSPMSM (SMH-1732T, 630 kW) przed zamontowaniem oraz zainstalowany na obiekcie

określenie ich parametrów z określoną dokładnością [1, 7, 9, 13]. Z tego powodu analizę właściwości dokonano dwiema uzupełniającymi się metodami: pomiarową oraz polowo-obwodowym modelem symulacyjnym. Model silnika zbudowano za pomocą oprogramowania Maxwell 2D (v.16). W symulacjach wybrano typ rozwiązania „transient”, pozwalający na modelowanie pracy maszyny przy wymuszeniu napięciowym z jednoczesnym uwzględnieniem ruchu, najbliższej odzwierciedlający rozpatrywane zjawiska.

### 3.1. Analiza w stanie bezprądowym

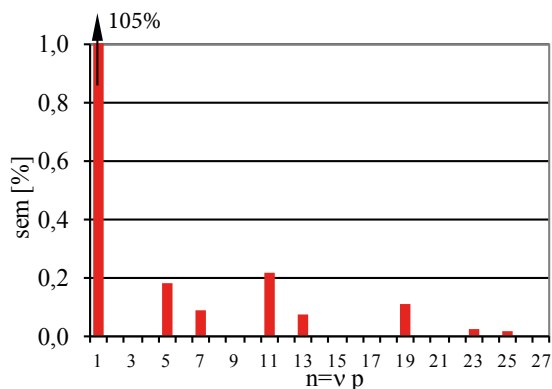
Wyznaczono przebieg napięcia indukowanego w uzwojeniu stojana prototypowego silnika LSPMSM (rys. 3).

Z analizy harmonicznego napięcia wynika, że największe amplitudy z wyższych harmonicznnych nie przekraczają 0,25%, co należy uznać za bardzo dobry wynik, rzadko osiągniany nawet w generatorach dużej mocy. Sinusoidalny kształt napięcia indukowanego uzyskano dzięki właściwemu dopasowaniu liczby żłobków klatki rozruchowej do liczby żłobków stojana oraz właściwemu ułożeniu magnesów.

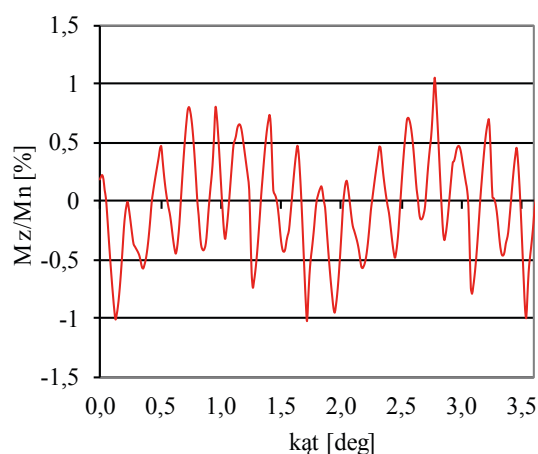
Korelacja liczby żłobków wirnika i stojana ma istotny wpływ na wartość momentu zaczepowego. Na rysunku 4 pokazano obliczony przebieg momentu zaczepowego dla dwóch podziałek

reklama

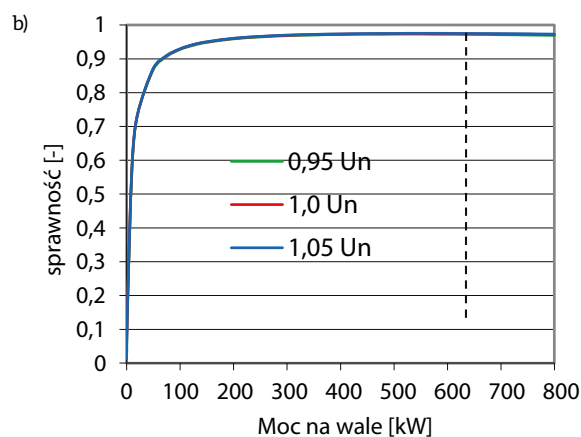
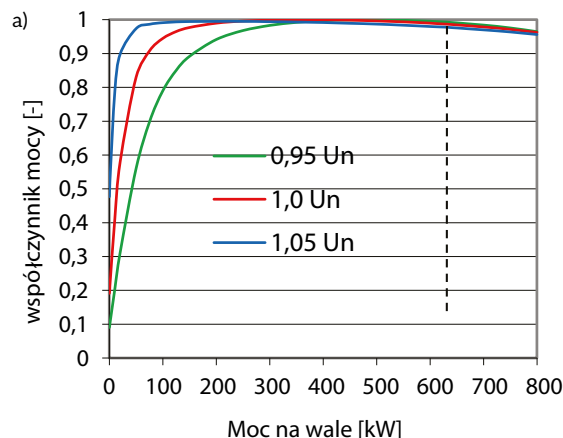
reklama



**Rys. 3.** Analiza harmoniczna napięcia indukowanego w uzwojeniu stojana (odniesione do harmonicznej podstawowej napięcia znamionowego)



**Rys. 4.** Obliczony przebieg momentu zaczepowego (odniesiony do momentu znamionowego) w funkcji położenia wirnika (zakres kątowy dwóch podziałek żłobkowych stojana)



**Rys. 5.** Charakterystyki elektromechaniczne (współczynnik mocy – a), sprawność – b) w funkcji obciążenia badanego silnika LSPMSM (SMH-1732T) dla różnych wartości napięcia zasilającego

żłobkowych stojana, którego maksymalna wartość wynosi ok. 1% momentu znamionowego. Taki moment zaczepowy w tego typu maszynach uznawany jest za bardzo mały.

### 3.2. Analiza parametrów w stanie obciążenia

Charakterystyki obciążenia badanego silnika LSPMSM uzyskano, korygując wyniki obliczeń o uzyskane pomiarowo elementy składowe strat. Wykonanie charakterystyki biegu jałowego bez włożonych magnesów trwałych pozwala na wyodrębnienie strat mechanicznych oraz strat podstawowych w żelazie. Symulacje polowo-obwodowe pozwoliły na wyznaczenie strat dodatkowych w żelazie oraz strat od wyższych harmonicznych w klatce rozruchowej. Wyniki obliczeń w postaci skutecznej wartości prądu twornika, współczynnika mocy oraz sprawności w funkcji obciążenia na wale pokazano na rysunku 5.

Parametry znamionowe badanego silnika zestawiono w tabeli 1.

Obliczono, że obciążenie znamionowe uzyskiwane jest przy kącie 50 deg., a statyczna przeciążalność momentem wynosi 1,7.

### 3.3. Analiza parametrów rozruchowych

Właściwości rozruchowe maszyn LSPMSM są kluczowym zagadnieniem wpływającym na ich eksploatację. Moment hamujący od magnesów trwałych, występujący w dolnym zakresie prędkości obrotowych, w znacznym stopniu utrudnia proces rozruchu. Odpowiednie zaprojektowanie obwodu rozruchowego w dużym stopniu przez szereg lat ograniczało rozwój tych maszyn w zakresie dużych mocy. Skutecznym rozwiązaniem pozwalającym na zwiększenie momentu rozruchowego przy jednoczesnym zachowaniu niewielkiego poślizgu przy synchronizacji jest zastosowanie dwóch klatek w wirniku [6, 8, 15].

### 3.4. Rozruch silnika na stanowisku pracy

Najważniejszym sprawdzianem dla prototypowego silnika były testy ruchowe na stanowisku pracy. Wykonano rejestrację napięcia oraz prądu podczas rozruchu silnika ze sprzęgniętym i załadowanym kulami młynem. Przebieg podstawowych wielkości fizycznych podczas rozruchu pokazano na rysunku 6.

Tabela 1. Parametry silnika typu SMH-1732T

Moc znamionowa	kW	630
Prędkość obrotowa znamionowa	obr./min	187,5
Napięcie ( $U_n$ )	V	6000
Prąd ( $I_n$ )	A	63
Współczynnik mocy	$\cos\varphi_n$	0,99
Sprawność	$\eta_n$	97,1
Moment znamionowy $M_n$	kN·m	32,1
Prąd rozruchowy	$I_r/I_n$	7,3
Początkowy moment rozruchowy	$M_r/M_n$	2,0
Minimalny moment rozruchowy	$M_{rmin}/M_n$	0,95
Ustalony przyrost temp. uzwojenia	°C	70

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że czas rozruchu wynosi ok. 2 s. W pierwszej chwili rozruchu następuje spadek napięcia wynoszący około 7% napięcia znamionowego. Wraz z maleniem prądu pobieranego przez silnik podczas rozruchu napięcie odbudowuje się do poziomu sprzed chwili załączenia. Moc pobierana po rozruchu stabilizuje się na poziomie ok. 500 kW, co oznacza, że nawet w pełni załadowany młyn obciąża

silnik w 80% mocy znamionowej. Znacznie większa moc podczas rozruchu jest zamieniana na ciepło w klatce rozruchowej.

Szacunkowy przyrost temperatury klatki rozruchowej podczas pełnego rozruchu wynosi około 40°C. Oznacza to, że nawet dla nagrzanego silnika można jeszcze wykonać około 4 rozruchy następujące po sobie, co ze względu na specyfikę pracy napędu młyna raczej nie wystąpi.

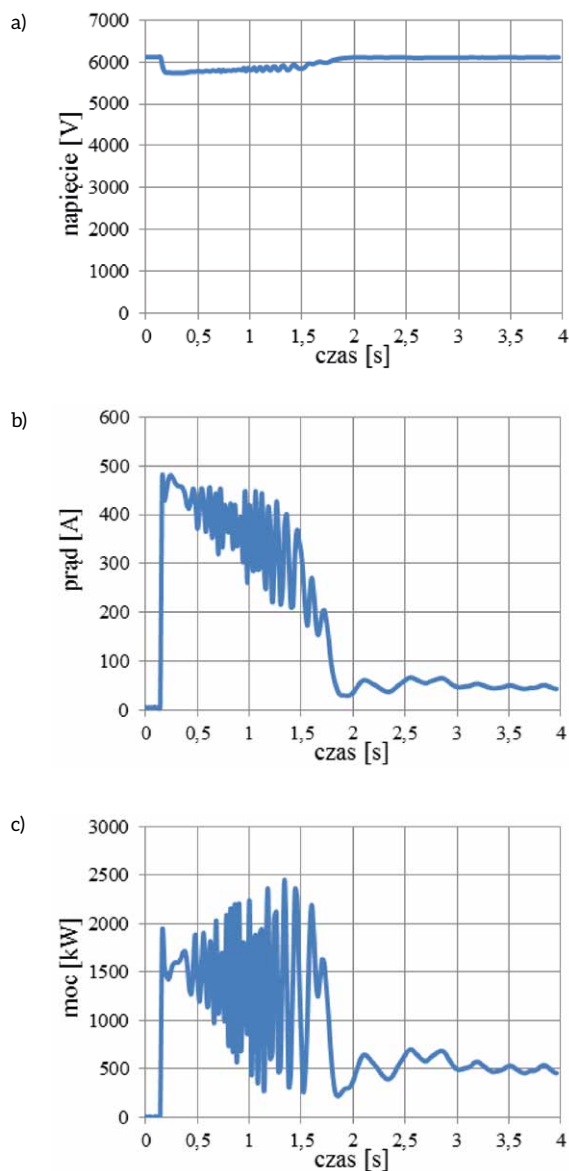
#### 4. Podsumowanie

Na podstawie wykonanych obliczeń, a szczególnie po wykonaniu badań eksploatacyjnych prototypu silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, napędzającego młyn kulowy stwierdzono, że można je zastosować w napędach elektrycznych o najtrudniejszych wymaganiach technicznych związanych z momentem rozruchowym i momentem bezwładności.

Zastosowanie silnika typu SHM o stopniu ochrony IP54 (rys. 2) w miejsce dotychczasowego silnika typu SAS, o budowie otwartej (rys. 1), pracującego w trudnych warunkach środowiskowych (wilgoć, produkcja na mokro, zapylenie, aerozol metali ciężkich) zdecydowanie zmniejsza możliwość zalania uzwojeń silnika.

Na podstawie ponad 10-miesięcznej eksploatacji układu napędowego mielenia rudy miedzi przeliczone oszczędności roczne wynoszą ok. 150 tys. zł.





Rys. 6. Przebiegi napięcia zasilającego (a), prądu stojana (b), mocy czynnej (c) w czasie rozruchu silnika sprzęgniętego z załadowanym młynem kulowym

Zastosowanie takich silników w miejsce silników indukcyjnych pozwala zmniejszyć straty energii w silniku przez zwiększenie sprawności oraz w układzie zasilającym przez zwiększenie współczynnika mocy i zmniejszenie pobieranego prądu. Istotnie zmniejsza się koszt eksploatacji, a inwestycja może zwrócić się w krótkim czasie.

### Literatura

[1] DE ALMEIDA A.T., FERREIRA F.J.T.E., QUINTINO DUARTE A.: *Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, no 2, 2014, pp. 1274–1285.

[2] LU Q., HUANG X., YE Y., FANG Y.: *Experiment and analysis of high power line-start PM motor*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2012.

[3] BAO Y., MEHMOOD W., FENG X.: *Super premium efficiency line-start permanent magnet synchronous motor: design, test and comparison*. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference(PCIC), 2012.

[4] FENG X., LIU L., KANG J., ZHANG Y.: *Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor*. XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Roma, Italy.

[5] MELFI M.J., UMANS S.D., ATEM J.E.: *Viability of highly-efficient multi-horsepower line-start permanent-magnet motors*. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC).

[6] ZAWILAK T.: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2013, s. 177–179.

[7] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych. „Przegląd Elektrotechniczny” 1/2014, s. 224–226.

[8] ZAWILAK T., ZAWILAK J.: *Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego*. „Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe” 3/2016, s. 169–173.

[9] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Energooszczędne silniki synchroniczne dużej mocy wzbudzone magnesami trwałymi*. „Przegląd Elektrotechniczny” 10/2015.

[10] ZAWILAK T., ZAWILAK J.: *Wpływ warunków zasilania na parametry eksploatacyjne silnika z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe” 108/2015, s. 185–190.

[11] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim*. „Górnictwo Odkrywkowe” 1/2014, s. 29–33.

[12] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 1/2014, s. 224–226.

[13] ZAWILAK T., ZAWILAK J.: *Patent. Polska, nr 218489. Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi: H02K 1/27*. Zgłosz. pat. nr P 394666 z dn. 26.04.2011 /Politechnika Wroclawska/ 3 s: 1 rys.

[14] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Energooszczędne napędy elektryczne wentylatorów i pomp*. „Power Industry” (Racibórz). 1-2/2013, s. 15–17.

[15] ZAWILAK T.: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2b/2013, s. 177–179.

dr inż. Tomasz Zawilak, e-mail: tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl  
 dr hab. inż. Jan Zawilak prof. nadzw., e-mail: jan.zawilak@pwr.edu.pl  
 Politechnika Wroclawska,  
 Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

artykuł recenzowany