

Piotr Dukalski, Robert Rossa

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

Andrzej Dzikowski, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice

OBLICZENIA OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA LSPMSM DO NAPĘDU PRZENOŚNIKA TAŚMOWEGO

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC CIRCUIT OF LSPMSM DEDICATED TO MINE BELT CONVEYOR

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki prac mających na celu analizę możliwości zastosowania wysokosprawnego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (ang. LSPMSM) do napędu kopalnianego przenośnika taśmowego. Założono, że zarówno prędkość liniowa taśmociągu jak i jego wydajność pozostaną na zbliżonym poziomie, jak w przypadku dotychczasowego rozwiązania napędu z silnikiem indukcyjnym. Korzyścią wynikającą z zastosowania silnika LSPMSM ma być natomiast wyższa sprawność napędu taśmociągu. W artykule omówiono wpięrow w skrócie zaproponowaną konstrukcję silnika LSPMSM dedykowanego do napędu wybranego przenośnika taśmowego. Następnie zamieszczono obliczone charakterystyki kątowe i parametry silnika dla stanu pracy synchronicznej oraz obliczone charakterystyki asynchronicznego momentu rozruchowego. Obliczone parametry rozruchowe i znamionowe silnika LSPMSM porównano z odpowiednimi parametrami dotychczas stosowanego silnika indukcyjnego.

Abstract: This paper presents the results of work to examine the possibility of the use of high efficiency line start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) in the electric drive of mine belt conveyor. It was assumed that the linear speed of the belt conveyor and its throughput will remain at a similar level as in the previous solution of conveyor drive equipped with induction motor. The advantage of the use of LSPMSM in the electric drive of belt conveyor should be the higher efficiency of this drive. In the article, the proposed construction of the LSPMSM dedicated to the drive of conveyor belt is briefly presented first. Then the calculated angular characteristics and motor parameters at synchronous operation and the calculated characteristics of asynchronous starting torque are shown. Calculated starting and rated parameters of LSPMSM are compared with the appropriate parameters of previously used induction motor.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim, przenośnik taśmowy
Keywords: line-start permanent magnet synchronous motor, mining conveyor

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach dynamiczny rozwój technologiczny pozwala na szeroką optymalizację urządzeń, w tym m.in. silników elektrycznych, stosowanych we wszystkich gałęziach przemysłu. Bardzo często postęp technologiczny w dziedzinie projektowania i produkcji silników elektrycznych dedykowanych do konkretnego zastosowania przekłada się również na ich rozwój w zupełnie innych aplikacjach. Według ostatnich trendów, silniki wzbudzone magnesami trwałymi, dzięki swym licznym zaletom [1, 2, 5], zyskują coraz większe uznanie również w środowisku górnictwem.

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (ang. Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), w których zastosowano wysokoenergetyczne magnesy trwałe z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich NdFeB, znalazły już

m.in. zastosowanie w górnictwem napędach trakcyjnych [3, 4].

Obecnie Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, przy współpracy z instytutem ITG EMAG oraz firmą DAMEL S.A., prowadzi prace badawcze mające na celu przeprowadzenie symulacji komputerowych, opracowanie konstrukcyjne oraz wdrożenie do zastosowania w górnictwem napędów elektrycznych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, przeznaczonych do napędu różnych urządzeń dołowych. Jedną z rozpatrywanych możliwych aplikacji dla silników z magnesami trwałymi są napędy przenośników taśmowych.

W napędach przenośników taśmowych o nieregulowanej prędkości liniowej można teoretycznie zastosować silniki PMSM, dzięki czemu poprawie uległyby parametry eksploatacyjne tych napędów, takie jak np. sprawność i chwila

lowa przeciążalność momentem. Silniki PMSM wymagają jednak zasilania z zaawansowanych przekształtników energoelektronicznych, co jest związane z większym skomplikowaniem technicznym oraz ze znacznym podniesieniem kosztów napędu przENOŚNIKA.

Alternatywnym rozwiązaniem napędu dla przENOŚNIKÓW TAŚMOWYCH o nieregulowanej prędkości liniowej może być zastosowanie tzw. silników synchronicznych z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (ang. Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor, LSPMSM, w przypadku których rozruch jest dokonywany poprzez przyłączenie zacisków uzwojeń silnika bezpośrednio do sieci. Zastosowanie silników LSPMSM, podobnie jak silników PMSM, powinno skutkować zwiększeniem sprawności napędu taśmociągu, co jest istotne szczególnie dla taśmociągów o dużej liczbie godzin pracy w ciągu roku i planowanych do wieloletniej eksploatacji.

Rozruch silnika LSPMSM następuje poprzez bezpośrednie przyłączenie jego 3-fazowego uzwojenia twornika (stojana) do sieci. Rozruch bezpośredni jest możliwy dzięki uzwojeniu klatkowemu umieszczonemu w wirniku, podobnemu pod względem konstrukcyjnym i wykonania do uzwojeń klatkowych spotykanych w zwykłych silnikach indukcyjnych. Po przyłączeniu uzwojenia twornika silnika LSPMSM do sieci, w wyniku działania asynchronicznego momentu rozruchowego, wirnik silnika rusza i zwiększa prędkość obrotową w kierunku prędkości synchronicznej. W pobliżu prędkości synchronicznej, uśredniony moment asynchroniczny klatki rozruchowej szybko maleje i zanika przy poślizgu $s = 0$, jednak w wyniku bezwładności rozprędzonych mas wirujących oraz pojawiającego się przy $s = 0$ momentu synchronicznego, następuje proces zsynchronizowania prędkości kątowych wirnika i pola magnetycznego od prądu twornika. W stanie pracy ustalonej silnik LSPMSM pracuje więc jako maszyna synchroniczna.

Oprócz umożliwienia bezpośredniego rozruchu silnika LSPMSM dzięki wytwarzanemu momentowi asynchronicznemu, klatka rozruchowa spełnia także inne pozytywne role w silnikach LSPMSM. Pomaga ona chronić magnesy trwałe zamocowane pod nią w wirniku przed rozmagnesowaniem wskutek elektromagnetycznych stanów przejściowych występujących podczas rozruchu i gwałtownego wzrostu prądu w tworniku. Ten pozytywny wpływ klatki na ochronę

magnesów trwałych wiąże się ze zjawiskiem wypierania pola magnetycznego z wirnika przez prądy indukowane w klatce rozruchowej w stanach przejściowych. Klatka rozruchowa pomaga także tłumić oscylacje prędkości obrotowej wirnika i tym samym utrzymać wirnik w stanie synchronizmu podczas gwałtownych zmian obciążenia na wale silnika.

2. Założenia konstrukcyjne i techniczne dla silnika LSPMSM do napędu przENOŚNIKA TAŚMOWEGO typu MIFAMA 1000/1x55

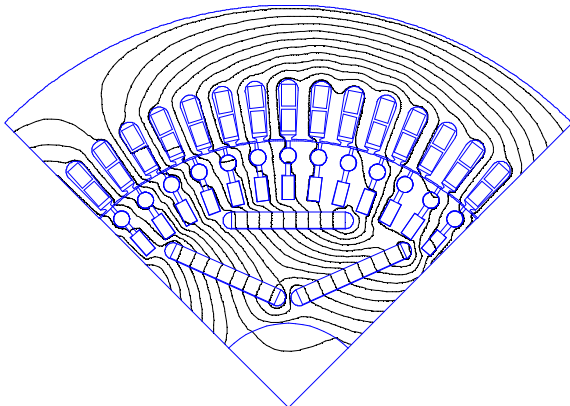
W przENOŚNIKACH TAŚMOWYCH wciąż stosunkowo rzadko stosowane są napędy z przekształtnikami energoelektronicznymi, dlatego postanowiono przeprowadzić analizę możliwości zastosowania w tego typu napędzie silnika z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim LSPMSM. Założono, że zarówno prędkość liniowa taśmociągu jak i jego wydajność (moc) pozostaną na zbliżonym poziomie jak w przypadku napędu z silnikiem indukcyjnym, natomiast korzyścią wynikającą z zastosowania silnika LSPMSM ma być wyższa sprawność napędu taśmociągu.

Jako przENOŚNIK TAŚMOWY dla którego przeprowadzono analizę wybrano przENOŚNIK typu MIFAMA 1000/1x55. Stosowany pierwotnie w napędzie tego przENOŚNIKA silnik indukcyjny 3SGf 250M4-E jest silnikiem o liczbie biegunów $2p = 4$ i mocy $P_N = 55$ kW. W celu utrzymania zbliżonej prędkości posuwu i wydajności przENOŚNIKA, silnik LSPMSM powinien być także silnikiem 4-biegunowym, o tej samej mocy znamionowej.

Ponieważ głównym celem analizy było sprawdzenie, o ile można poprawić sprawność napędu przENOŚNIKA TAŚMOWEGO po zastosowaniu silnika LSPMSM, a nie na ile można zmniejszyć dzięki temu masę lub gabaryt napędu, dlatego dla przENOŚNIKA MIFAMA 1000/1x55 postanowiono zaprojektować silnik LSPMSM bazując na konstrukcji dotychczas stosowanego silnika 3SGf 250M4-E oraz nowszego silnika indukcyjnego Sg250M4. Przyjęto, że kadłub dla silnika LSPMSM będzie w całości przejęty z silnika 3SGf 250M4-E, natomiast: średnice zewnętrzne, wewnętrzne i długości rdzeni magnetycznych stojana i wirnika, wysokość szczeliny powietrznej oraz ilość i wymiary zębów stojana będą przejęte bez zmian z silnika Sg250M4. Zastosowano ten sam typ uzwojenia jak w silniku Sg250M4 – uzwojenie rozłożone

quasi-sinusoidalnie, dwuwarstwowe, o poskoku skróconym, z drutem nawojowym okrągłym, podwójnie emaliowanym DN2E.

Silnik LSPMSM dla przenośnika taśmowego MIFAMA 1000/1x55 zaprojektowano w dwóch wariantach napięć zasilania: 1000 V i 500 V. Pod względem konstrukcji obwodu elektromagnetycznego, oba warianty napięciowe silnika różnią się jedynie danymi nawojowymi uzwojenia twornika, a ściślej zastosowanymi liczbami gałęzi równoległych w tym uzwojeniu. Liczby gałęzi równoległych dobrano tak, by liczba zwojów szeregowych z_1 w fazie uzwojenia na napięcie 1000 V była dokładnie dwa razy większa od liczby zwojów z_1 w fazie uzwojenia na napięcie 500 V. Dzięki zachowaniu proporcji liczby zwojów z_1 jak 2:1 oraz dzięki identycznym współczynnikom wypełnienia żłobków twornika miedzią, charakterystyki obu wariantów napięciowych silnika LSPMSM, przy pracy synchronicznej jak i przy rozruchu asynchronicznym, są identyczne.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny silnika LSPMSM (1/4 obwodu elektromagnetycznego) na bazie silnika Sg250M4 oraz obliczony rozkład linii ekwipotencjalnych pola magnetycznego w tym silniku przy pracy synchronicznej znamionowej

W wirniku silnika LSPMSM zaprojektowanego na bazie silnika Sg250M5 zastosowano wysokoenergetyczne magnesy trwałe NdFeB, o dopuszczalnej temperaturze pracy ciągłej 180 °C. Objętość i materiał magnetyczny magnesów trwałych dobrano tak (w połączeniu z odpowiednimi danymi nawojowymi twornika), by zapewnić wymagane wartości momentu znamionowego T_N i maksymalnego T_{max} silnika LSPMSM przy pracy synchronicznej (moment synchroniczny znamionowy, przeciążalność momentem synchronicznym).

Prawidłowy rozruch asynchroniczny silnika LSPMSM w napędzie przenośnika taśmowego

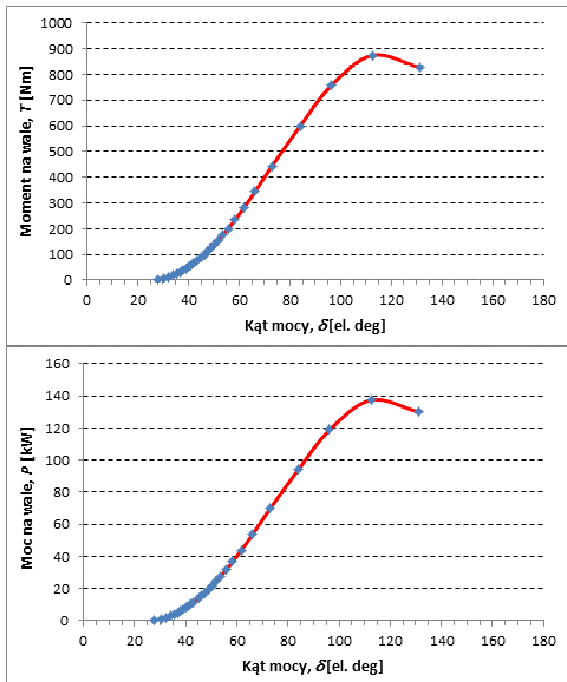
ma zapewnić dwuklatkowe uzwojenie wirnika, z klatką rozruchową główną przy szczelinie powietrznej maszyny i klatką rozruchową dodatkową, umieszczoną pod klatką główną. Przyjęto liczbę żłobków wirnika $Z_2 = 52$, przy liczbie żłobków stojana $Z_1 = 60$. Ta sama kombinacja liczby żłobków stojana i wirnika jest stosowana w silnikach indukcyjnych Sg250M. Klatkę rozruchową podstawową zaprojektowano jako wykonywaną z prętów okrągłych, mosiężnych, zwieranych pierścieniami miedzianymi. Klatkę rozruchową dodatkową zaprojektowano jako wykonywaną z prętów prostokątnych, miedzianych, zwieranych pierścieniami miedzianymi (rys. 1). Podział uzwojenia wirnika na dwie niezależne klatki rozruchowe pozwala na swobodniejsze kształtowanie parametrów rozruchowych silnika LSPMSM.

3. Charakterystyki silnika LSPMSM przy pracy synchronicznej

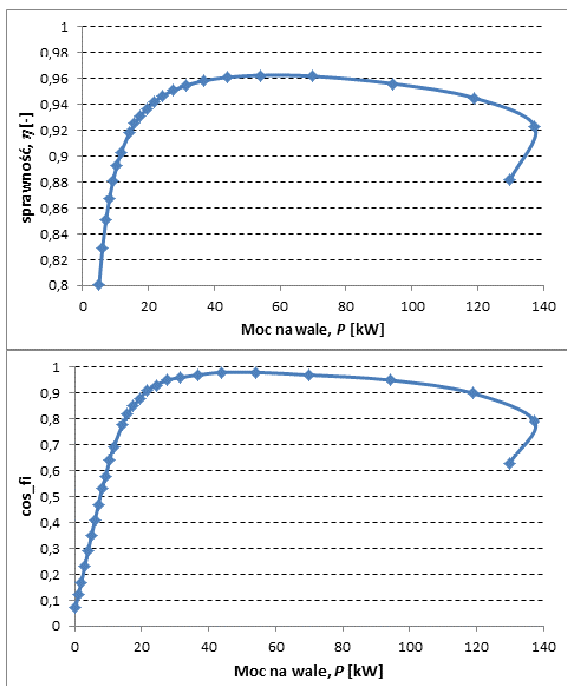
Na rysunku 2 przedstawiono obliczone charakterystyki kątowe momentu T i mocy P na wale analizowanego silnika LSPMSM w funkcji kąta mocy δ . Charakterystyki te są pomocne do odczytania momentu maksymalnego T_{max} silnika LSPMSM przy pracy synchronicznej oraz do obliczenia współczynnika krotności synchronicznego momentu maksymalnego T_{max}/T_N .

Na rysunku 3 pokazano charakterystyki współczynnika sprawności η i współczynnika mocy $\cos\varphi$ w funkcji mocy na wale, obliczone dla silnika LSPMSM do napędu przenośnika taśmowego. Z charakterystyk tych można odczytać, że przy obciążeniu znamionowym silnika mocą $P_N = 55$ kW, współczynnik mocy silnika wynosi $\cos\varphi_N = 0.98$, natomiast współczynnik sprawności $\eta_N = 0.962$.

Poprzez zwiększenie liczby zwojów z_1 uzwojenia stojana w silniku LSPMSM można podnieść charakterystykę współczynnika mocy $\cos\varphi$ w funkcji mocy na wale P (rys. 3 na dole) tak, że współczynnik ten osiągnie wartość równą 1 dla pewnego zakresu mocy P , jednak skutkowałoby to zmniejszeniem współczynnika przeciążalności momentem T_{max}/T_N , który w wybranej aplikacji wydaje się być aspektem priorytetowym.



Rys. 2. Obliczone charakterystyki kątowe momentu i mocy analizowanego silnika LSPMSM zaprojektowanego na bazie silnika Sg250M4



Rys. 3. Charakterystyki współczynnika sprawności η i współczynnika mocy $\cos \varphi$ obliczone dla analizowanego silnika LSPMSM

4. Charakterystyki rozruchowe dla silnika LSPMSM do napędu przenośnika taśmowego

Wypadkowy asynchroniczny moment rozruchowy T_r silnika LSPMSM jest wynikiem współ-

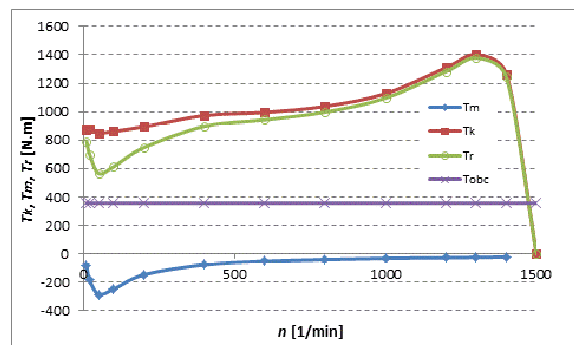
działania dwóch innych momentów asynchronicznych (rys. 4) [6]:

- momentu klatki rozruchowej T_k ,
- momentu hamującego T_m związanego z magnesami trwałymi w wirniku,

przy czym: $T_r = T_k + T_m$.

Występowanie asynchronicznego momentu hamującego od magnesów trwałych T_m , który działa zawsze przeciwnie do momentu klatki rozruchowej T_k , utrudnia rozruch silnika LSPMSM w stosunku do podobnego silnika indukcyjnego, z identycznym uzwojeniem klatkowym.

Rozruch silników w napędach górniczych przenośników taśmowych jest z reguły ciężki, co wynika z dużego momentu obciążenia na wale silnika, zwłaszcza gdy taśma przenośnika jest mocno zasypana urobkiem (transportowanym medium). Dlatego, w celu zastosowania silnika typu LSPMSM w napędzie przenośnika taśmowego, przy projektowaniu silnika konieczne jest szczególne uwzględnienie wymagań tej aplikacji oraz zadbanie o odpowiednie parametry charakterystyk rozruchowych.

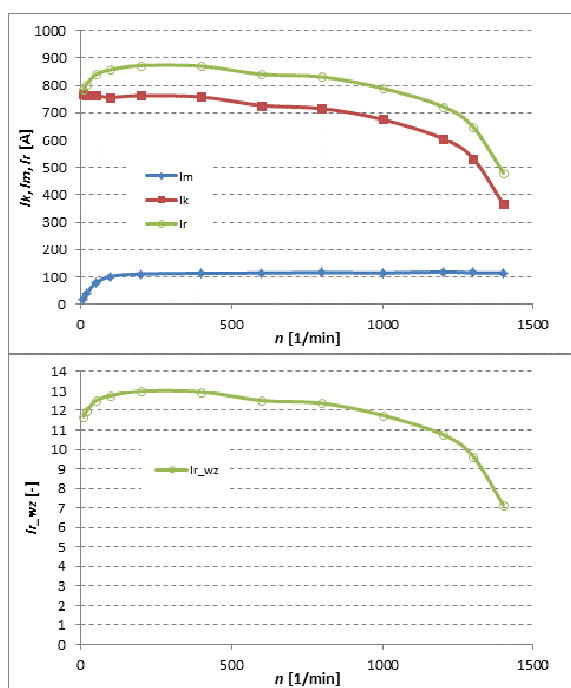


Rys. 4. Obliczone charakterystyki rozruchowe silnika LSPMSM na bazie Sg250M4: T_k – asynchroniczny uśredniony moment klatki rozruchowej, T_m – asynchroniczny uśredniony moment hamujący od magnesów trwałych, T_r – wypadkowy asynchroniczny uśredniony moment rozruchowy silnika LSPMSM, T_{obc} – stały moment obciążenia na wale o wartości 357 Nm

Na rysunku 4 pokazano charakterystyki momentów T_r , T_k i T_m , obliczone dla analizowanego silnika LSPMSM do przenośnika taśmowego MIFAMA 1000/1x55. Moment rozruchowy silnika przy zatrzymanym wirniku wynosi ok. $T_s = 800$ Nm, natomiast asynchroniczny moment krytyczny silnika wynosi $T_b = 1370$ Nm. Na rysunku 4 pokazano także charakterystykę momentu obciążenia T_{obc} na wale silnika napędzającego przenośnik, zakładając, że jest to

moment o stałej wartości, równy momentowi znamionowemu silnika.

Na rysunku 5 pokazano obliczone dla silnika LSPMSM charakterystyki prądu rozruchowego I_r oraz prądu rozruchowego w jednostkach względnych I_{r_wz} , odniesionych do prądu znamionowego I_N silnika. Przy obliczaniu charakterystyki $I_r = f(n)$ przyjęto założenie, że prąd I_r można obliczyć jako superpozycja dwóch prądów składowych: prądu I_k związanego z wytwarzaniem asynchronicznego momentu klatki rozruchowej T_k oraz prądu I_m związanego z asynchronicznym momentem hamującym od magnesów trwałych T_m .



Rys. 5. Obliczone charakterystyki prądu rozruchowego I_r oraz prądu rozruchowego w jednostkach względnych I_{r_wz} odniesionych do prądu znamionowego I_N silnika LSPMSM na bazie silnika Sg250M4

5. Podsumowanie

Poniżej zestawiono wybrane parametry rozruchowe i parametry pracy synchronicznej obliczone dla zaproponowanego silnika LSPMSM do napędu przenośnika taśmowego – wariant silnika dla napięcia sieci 500 V. Parametry te porównano z odpowiednimi parametrami silnika indukcyjnego 3SGf 250M4-E.

Zgodnie z przewidywaniem, sprawność analizowanego silnika LSPMSM jest znacząco wyższa w stosunku do sprawności silnika indukcyjnego, aż o 3 punkty procentowe. Jest to niewątpliwa zaleta silników LSPMSM w stosunku do

odpowiednich silników indukcyjnych. Pomimo tego, zastosowanie silników LSPMSM w napędach przenośników taśmowych nie jest oczywiste, z powodu istotnych problemów technicznych opisanych poniżej.

Tab. 1. Porównanie parametrów znamionowych silnika 3SGf 250M4-E, stosowanego w napędzie taśmociągu MIFAMA 1000/1x55, z parametrami analizowanego silnika typu LSPMSM

Producent i typ	CELMA, Indukta, 3SGf 250M4-E	LSPMSM na bazie Sg250M4
Moc znamionowa P_N	55 kW	55 kW
Prędkość obrotowa znamionowa n_N	1475 obr/min	1500 obr/min
Napięcie znamionowe U_N	500 V	500 V
Prąd znamionowy I_N	78 A	67 A
Liczba biegunów	4	4
Współczynnik mocy znamionowy $\cos\phi_N$	0,87	0,98
Sprawność η	93,0 %	96,2 %
Moment znamionowy T_N	357 N·m	357 N·m
Krotności prądu rozruchowego I_s/I_N	5,5	13
Krotności asynchronicznego momentu rozruchowego przy zatrzymanym wirniku T_s/T_N	2,3	2,24
Krotności momentu maksymalnego T_{max}/T_N	2,4	2,45

Rozruch silnika LSPMSM w napędzie przenośnika taśmowego jest trudny, z uwagi na występowanie w tego typu silnikach momentu hamującego od magnesów trwałych. Na rysunku 4 można zauważyć, że w przypadku analizowanego silnika LSPMSM, 4-biegunowego, wielkości mechanicznej 250 mm, przy prędkościach obrotowych wirnika w zakresie od ok. 20 do ok. 150 obr/min następuje znaczna zapasć charakterystyki wypadkowego asynchronicznego momentu rozruchowego T_r , pomimo dużych wartości asynchronicznego momentu klatki rozruchowej silnika T_k . W przypadku zasypania taśmy przenośnika znaczną ilością

urobku, może to uniemożliwić dokonanie prawidłowego rozruchu napędu przenośnika, a w efekcie nawet uszkodzenie termiczne silnika.

Kolejnym problemem jest długi czas rozruchu taśmociągu. Podczas rozruchu temperatura klatki rozruchowej wirnika szybko narasta. Przy rozruchu trwającym kilkanaście sekund lub dłużej, temperatura klatki może osiągnąć kilkaset stopni, co także może spowodować termiczne, nieodwracalne uszkodzenie magnesów trwałych NdFeB. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie magnesów typu SmCo zamiast magnesów NdFeB, jednak magnesy te są kilkukrotnie droższe. Analiza zjawisk termicznych zachodzących w silniku LSPMSM przy rozruchu taśmociągu nie była jeszcze wykonana przez autorów i powinna być ona przedmiotem kolejnych analiz. Planuje się w tym celu wykonanie m.in. odpowiednich obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych z wykorzystaniem metody elementów skończonych dla stanów przejściowych/

Sporą wadą analizowanego silnika LSPMSM jest także duża krotność prądu rozruchowego, równa 13, co stanowi wartość ponad dwukrotnie większą niż w przypadku silnika indukcyjnego stosowanego w napędzie przenośnika taśmowego MIFAMA 1000/1x55.

Literatura

- [1]. E. Król, „*Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych*”, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, nr 2/2014 (102).
- [2]. E. Pieczora, „*Prognoza Rozwoju Szynowych Systemów Transportowych Stosowanych w Podziemnych Kopalni Węgla Kamiennego*”, Gospodarka Surowcami Mineralnymi; Tom 28/2009, Zeszyt 1/2.
- [3]. J. Mróz, K. Skupień, A. Drwięga, Z. Budzyński, B. Polnik, D. Czerniak, P. Dukalski, L. Brymora, „*Ciągnik górniczy GAD – nowe możliwości w rozwoju techniki górniczej*”, Przegląd Elektrotechniczny, nr 06/2013.
- [4]. Z. Budzyński, P. Deja, „*Nowa Generacja Napędów Trakcyjnych Lokomotyw Kopalnianych*”, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, nr 79/2008.
- [5]. P. Dukalski, S. Gawron, A. Dzikowski, „*Wysokosprawne silniki z magnesami trwałymi w napędach górniczych*”, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, nr 102/2014, str. 77-83.
- [6]. T.J.E. Miller, „*Synchronization of line-start permanent-magnet AC motors*”, *IEEE Trans.*, vol. PAS-103, July 1984, pp. 1822-1828.
- [7]. A. Dzikowski, M. Hefczyc, A. Kozłowski, „*Badania symulacyjne wybranych napędów maszyn*

górniczych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi”, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa nr 1/2014, str. 51-59.

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”.

Autorzy

dr inż. Robert Rossa
r.rossa@komel.katowice.pl

mgr inż. Piotr Dukalski
p.dukalski@komel.katowice.pl
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL

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