

Obliczenia obwodu elektromagnetycznego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi i z klatką rozruchową, do zastosowania w napędzie przenośnika taśmowego

Piotr Dukalski, Robert Rossa, Andrzej Dzikowski

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 górniczym.

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 górniczych napędach trakcji dołowej [3, 4].

Obecnie Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, przy współpracy z instytutem ITG EMAG oraz firmą DAMEL SA prowadzi prace badawcze mające na celu przeprowadzenie symulacji komputerowych, opracowanie konstrukcyjne oraz wdrożenie do zastosowania w górnictwie 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 chwilowa 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

Streszczenie: Artykuł dotyczy obliczeń obwodu elektromagnetycznego silnika synchronicznego, wzbudzanego magnesami trwałymi z klatką rozruchową, przeznaczonego do zastosowania w napędzie przenośnika taśmowego typu MIFAMA 1000/1x55.

W artykule przedstawiono założenia konstrukcyjne i techniczne silnika LSPMSM (*Line Start Permanent Magnets Synchronous Motors*) oraz przedstawiono wyniki obliczeń projektowych silnika, w tym charakterystyki pracy oraz charakterystyki rozruchowe. Autorzy porównali również obliczone parametry znamionowe silnika LSPMSM z parametrami znamionowymi stosowanego obecnie w taśmociągach silnika Sg250M4.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim, przenośnik taśmowy

CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC CIRCUIT OF PERMANENT MAGNETS EXCITING MOTOR WITH STARTING CAGE, DEDICATED TO MINE BELT CONVEYOR

Abstract: The article concerning the calculation of electromagnetic circuit of permanent magnet excited synchronous motor with starting cage, for use in the drive belt conveyor MIFAMA 1000/1x55 type.

The article presents the design and technical intent of LSPMSM (*Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors*) motor and the results of the design calculations including the operational characteristics and starting characteristics. The authors also compared the calculated rated parameters of LSPMSM motor with rated parameters of currently used in conveyor belts motor Sg250M4.

Keywords: line-start permanent magnet synchronous motor, mining conveyor

szaniem sprawności napędu taśmociągu, co jest istotne szczególnie dla taśmociągów o dużej liczbie godzin pracy w ciągu roku i planowanych do wieloletniej eksploatacji.

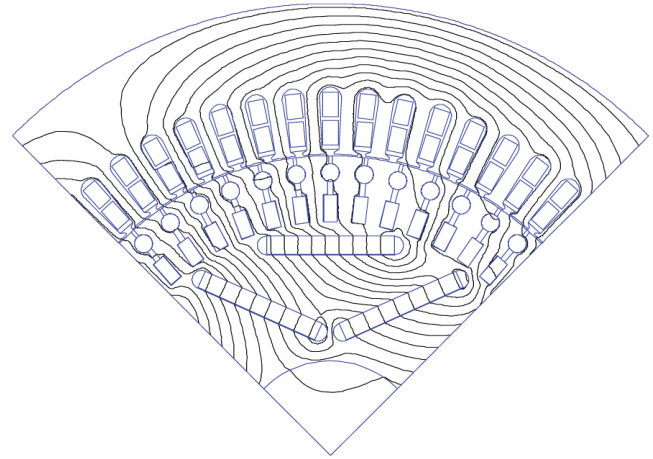
Rozruch silnika LSPMSM następuje poprzez bezpośrednie przyłączenie jego 3-fazowego uzwojenia twornika (stojana) do

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 rozpedzonych 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 trwale 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 za-



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

stosowania 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 $2_p = 4$ 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 żłobków stojana będą przejęte bez zmian z silnika Sg250M4. Zastosowano ten sam typ uzwojenia jak w silniku

Sg250M4 – uzwojenie rozłożone quasisinusoidalnie, 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.

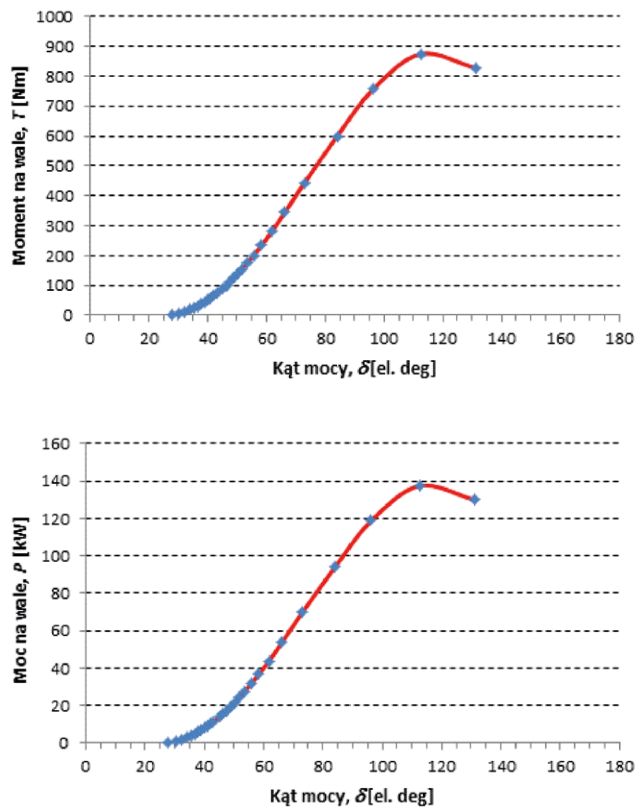
W wirniku silnika LSPMSM zaprojektowanego na bazie silnika Sg250M5 zastosowano wysokoenergetyczne magnesy trwałe NdFeB, o dopuszczalnej temperaturze pracy ciągłej 180°C. Objętość i materiał magnetyczny magnesów trwałych dobrano tak (w połączeniu z odpowiednimi danymi nawojowymi twornika), by zapewnić 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.

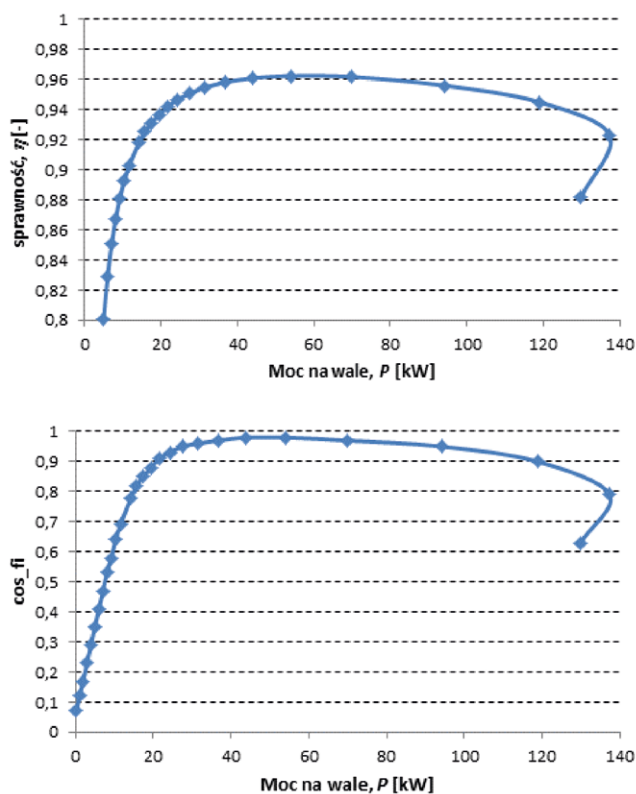
3. Charakterystyki silnika LSPMSM przy pracy synchronicznej

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 $\cos\phi$ 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



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 $\cos\phi$ obliczone dla analizowanego silnika LSPMSM

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.

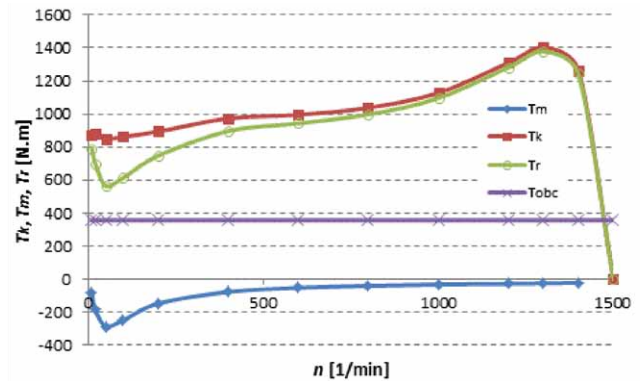
4. Charakterystyki rozruchowe dla silnika LSPMSM do napędu przenośnika taśmowego

Wypadkowy asynchroniczny moment rozruchowy T_r silnika LSPMSM jest wynikiem współdziałania 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.



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_{obic} - stały moment obciążenia na wale o wartości 357 N.m

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).

reklama

Dlatego, w celu zastosowania silnika typu LSPMSM w napędzie przenośnika taśmowego, przy projektowaniu silnika konieczne jest szczegółowe uwzględnienie wymagań tej aplikacji oraz zadbanie o odpowiednie parametry charakterystyk rozruchowych.

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. $T_s = 800$ N.m, natomiast asynchroniczny moment krytyczny silnika wynosi $T_b = 1370$ N.m. 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 superpozycję 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 .

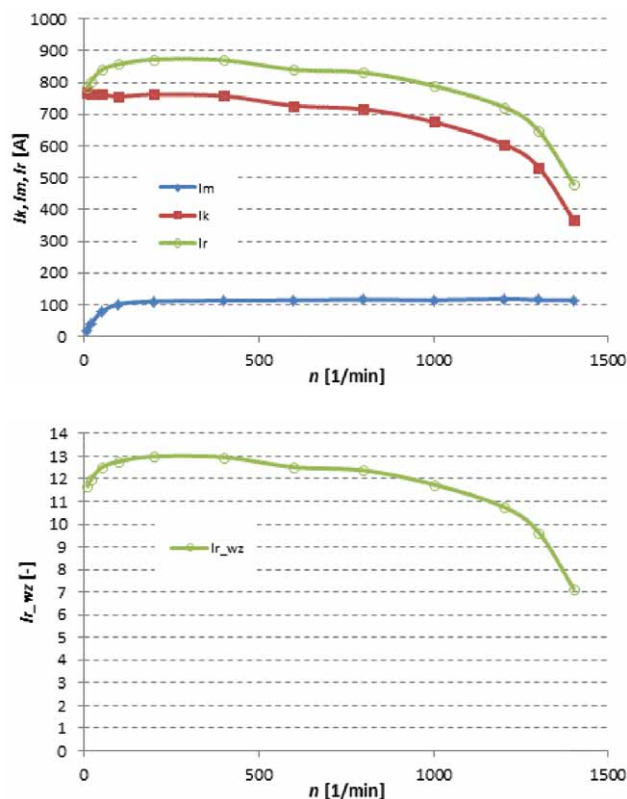
5. Podsumowanie

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 w tabeli 1.

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 zapaść 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



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

Tabela 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

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 krotkość 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] KRÓL E.: *Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, 2/2014 (102).
- [2] PIECZORA E.: *Prognoza rozwoju szynowych systemów transportowych stosowanych w podziemiach kopalń węgla kamiennego*. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” Tom 28/2009, Zeszyt 1/2.
- [3] MRÓZ J., SKUPIEŃ K., DRWIĘGA A., BUDZYŃSKI Z., POLNIK B., CZERNIAK D., DUKALSKI P., BRYMORA L.: *Ciągnik górniczy GAD – nowe możliwości w rozwoju techniki górniczej*. „Przegląd Elektrotechniczny” 06/2013.
- [4] BUDZYŃSKI Z., DEJA P.: *Nowa generacja napędów trakcyjnych lokomotyw kopalnianych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 79/2008.
- [5] DUKALSKI P., GAWRON S., DZIKOWSKI A.: *Wysoko sprawne silniki z magnesami trwałymi w napędach górniczych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 102/2014, s. 77–83.
- [6] MILLER T.J.E.: *Synchronization of line-start permanent-magnet AC motors*. IEEE Trans., vol. PAS-103, July 1984, pp. 1822–1828.
- [7] DZIKOWSKI A., HEFCZYC M., KOZŁOWSKI A.: *Badania symulacyjne wybranych napędów maszyn górniczych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa” 1/2014, s. 51–59.
- [8] Praca współfinansowana ze środków NCBiR zgodnie z umową PBS2/B4/10/2014 jako projekt badawczy pt.: „Wprowadzenie wysoko sprawnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi do napędu dołowych maszyn górniczych”.

 dr inż. Robert Rossa, e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl,
mgr inż. Piotr Dukalski, e-mail: p.dukalski@komel.katowice.pl,
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL;

dr inż. Andrzej Dzikowski, e-mail: a.dzikowski@emag.pl,
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG