

# Badania symulacyjne rozruchu i pracy silnika LSPMSM w napędzie przenośnika taśmowego

Andrzej Dzikowski, Piotr Dukalski, Robert Rossa

## 1. Wstęp

Węgiel kamienny jest obecnie wydobywany z coraz to głębszych pokładów. Im głębszy pokład, tym zwykle pogarszają się warunki środowiskowe poprzez wzrost temperatury i wilgotności. Zwiększa się także występujące stężenie metanu i w związku z tym wzrasta zagrożenie wybuchem. W kopalniach niemetalicznych do transportu urobku na duże odległości są stosowane przenośniki taśmowe. W artykule przedstawiono badania symulacyjne napędu przenośnika taśmowego wyposażonego w pojedynczą jednostkę napędową z silnikiem asynchronicznym klatkowym i przekładnią. Przedstawione badania symulacyjne mają dać odpowiedź na pytanie, jaką poprawę parametrów napędowych można uzyskać przy zastosowaniu do napędu przenośnika silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi [1][2], przystosowanego do rozruchu bezpośredniego typu LSPMSM (oznaczenie anglojęzyczne *Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor*).

## 2. Model matematyczny silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi typu LSPMSM

Model matematyczny silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, przystosowany do rozruchu bezpośredniego typu LSPMSM, który został użyty do przeprowadzenia badań symulacyjnych przenośnika taśmowego, został dokładnie opisany w artykule pt.: „Obliczenia obwodu elektromagnetycznego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi i z klatką rozruchową, do zastosowania w napędzie przenośnika taśmowego”, zamieszczonego w tym samym numerze „Napędów i Sterowania” co niniejszy artykuł.

## 3. Badania symulacyjne przenośnika taśmowego

Do przeprowadzenia symulacji rozruchu i pracy został wybrany przenośnik taśmowy firmy MIFAMA 1000/1x55 [5], który jest wyposażony w pojedynczą jednostkę napędową złożoną z silnika asynchronicznego klatkowego typu 3SGf 250M4-E [4] oraz przekładni. Wielkość przełożenia przekładni można wybierać, uzyskując różną prędkość transportową. W artykule przedstawiono wyniki symulacji dla przełożenia przekładni wynoszącego 1:12,32, przy której prędkość transportowa przenośnika wynosi 2,5 m/s. Wyznaczono występujący na wale silnika napędowego moment obciążenia i moment bezwładności przy założeniu długości przenośnika wynoszącej 400 m oraz przy średnim wypełnieniu przenośnika urobkiem węgla kamiennego wynoszącego 117 kg/m długości przenośnika. Takie założenia przy poziomym usytuowaniu przenośnika dają następujące

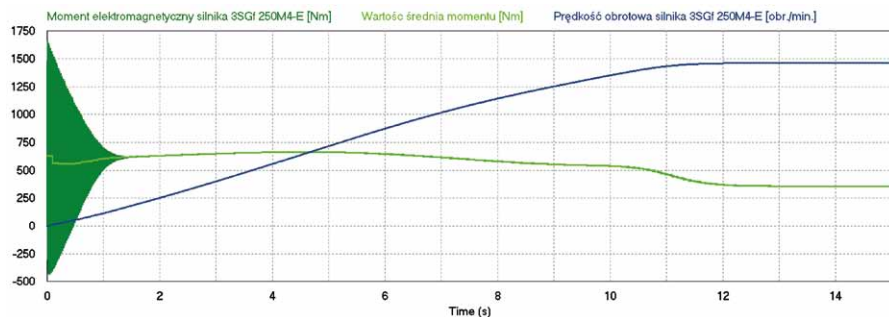
**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych rozruchu i pracy przenośnika taśmowego przy zastosowaniu do jego napędu silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim typu LSPMSM (*Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor*). W artykule szczegółowo przedstawione zostały wyniki symulacji komputerowej rozruchu i pracy przenośnika z napędem oryginalnym oraz w przypadku zastosowania do jego napędu zaproponowanego modelu matematycznego silnika LSPMSM. W programie symulacyjnym został zamodelowany cały układ napędowy, składający się z silnika napędowego oraz obciążenia. Symulowany był rozruch i praca przenośnika dla różnych prędkości transportowych ustalanych przełożeniem przekładni. W artykule przedstawione zostały wyniki symulacji rozruchu i pracy przenośnika dla wybranej prędkości transportowej, natomiast w podsumowaniu została przedstawiona analiza porównawcza parametrów elektrycznych i mechanicznych nowego napędu w stosunku do napędu oryginalnego dla 3 prędkości transportowych oraz 2 napięć zasilających.

Słowa kluczowe: silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi LSPMSM, przenośniki taśmowe

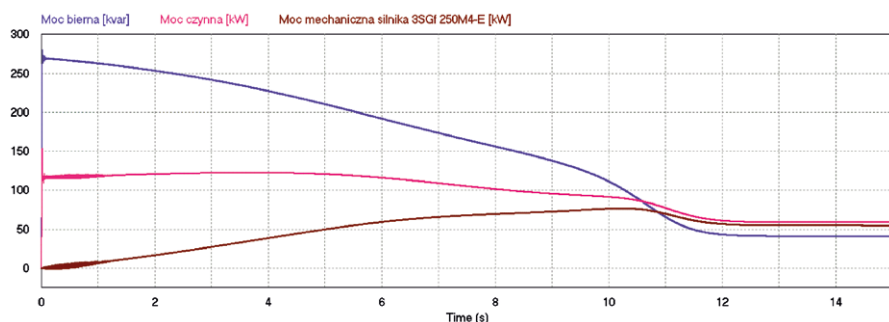
## SIMULATION STUDIES OF ENGINE STARTING AND OPERATING OF LSPMSM IN THE DRIVE OF CONVEYOR BELT

**Abstract:** The article presents of simulation studies of engine starting and operating of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor in the drive of conveyor belt. The article presents in detail the results of a computer simulation of the drive start and drive the conveyor belt with the original motor and the proposed mathematical model engine LSPMSM. The simulation program was modeled a drive motor and a load. Simulated was a start-up and operation of the conveyor belt for different transport speed fixed gear ratio. The article presents the results of a simulation start-up and operation of the conveyor belt for the selected transport speed, while the summary was presented comparative analysis of electrical and mechanical parameters of the new drive in relation to the original drive for a 3-speed transport and 2 voltages.

Keywords: Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor, mining conveyor.



Rys. 1. Moment elektromagnetyczny i prędkość silnika 3SGf 250M4-E



Rys. 2. Moc bierna, czynna i mechaniczna silnika 3SGf 250M4-E

wartości obciążeń na wale silnika napędowego:  $M = 355,1 \text{ Nm}$ ,  $J = 17,63 \text{ kgm}^2$ .

Symulacje prowadzono z użyciem symulatora układów energoelektronicznych PSIM [3].

Symulacje wykonano przy napięciu zasilania wynoszącym 500 V.

### 3.1. Badania symulacyjne rozruchu i pracy przenośnika z napędem oryginalnym

Na rys. 1 zostały przedstawione przebiegi momentu elektromagnetycznego i prędkości rozwijanej przez silnik 3SGf 250M4-E. Czas rozruchu w tym przypadku wynosi około 12 sekund. W pierwszej fazie rozruchu występują gasnące oscylacje momentu, które trwają około 1,3 s. Względnie płaski przebieg momentu przez znaczną część rozruchu powoduje, że prędkość silnika (i przenośnika) narasta w przybliżeniu liniowo. Po około 12 s prędkość osiąga wartość zbliżoną do znamionowej, wynoszącej 1475 obr./min, zaś moment elektromagnetyczny spada do wartości niezbędnej do utrzymania tej prędkości, który wynosi 360 Nm.

Na rys. 2 zostały przedstawione przebiegi wartości chwilowych mocy biernej, czynnej oraz mechanicznej silnika napędowego przenośnika podczas rozruchu. Jak widać na rysunku, moc czynna pobierana przez silnik po załączeniu osiąga w tym przypadku ponad dwukrotnie większą od znamionowej wartość, wynoszącą około 120 kW, która następnie wolno maleje, by po czasie ok. 12 s osiągnąć wartość ustaloną równą około 58,86 kW. Moc mechaniczna, wytworzona na wale silnika, jest w pierwszym momencie nieznaczna (mała prędkość obrotowa po załączeniu), jednak w trakcie rozruchu narasta, a w drugiej połowie okresu rozruchu przewyższa nieco moc mechaniczną w stanie ustalonym, w wyniku sumowania się statycznego momentu obciążenia z momentem dynamicznym (iloczyn tej sumy z prędkością kątową  $\omega$  stanowi moc mechaniczną). Po rozruchu moment dynamiczny zanika i następuje stan ustalony, w którym moc czynna pobierana przez silnik z sieci przewyższa nieznacznie moc mechaniczną, która wynosi 54,38 kW. Różnica tych mocy stanowi straty w silniku,

które stosunkowo małe w stanie ustalonym (około 4,48 kW), przybierają znaczną wartość zwłaszcza w pierwszym momencie rozruchu (około 120 kW). Duże straty mocy podczas rozruchu, wielokrotnie przewyższające straty w stanie ustalonym, powodują silne nagrzewanie się uzwojeń silnika, zwłaszcza zaś klatki rozruchowej wirnika.

Jeżeli obliczymy energię cieplną wydzieloną w silniku w czasie 12 sekund trwania rozruchu, to wynosi ona  $E_{sil} = 705$  kJ, przy czym 95% tej energii wydziela się w pierwszych 9 sekundach. Jeżeli wziąć pod uwagę, że w wirniku wydziela się około 60% tej energii, to w rozbiu na wirnik i stojan mamy następujące wartości energii:  $E_w = 423$  kJ,  $E_{st} = 282$  kJ.

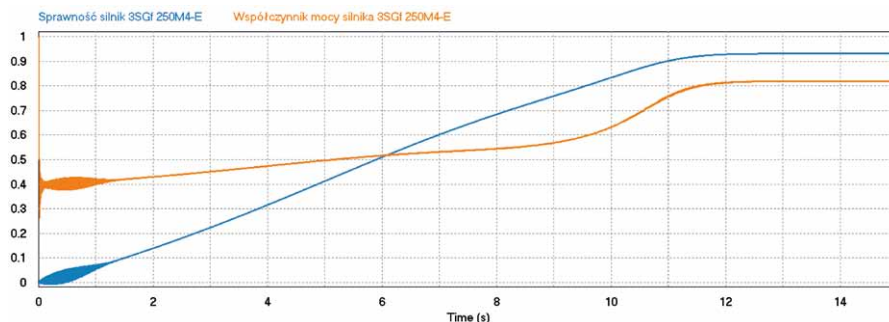
Moc bierna, jaką obciąża silnik sieć zasilającą w czasie rozruchu, ma przez praktycznie cały czas rozruchu dużą wartość, a w początkowej fazie rozruchu największą, wynoszącą około 270 kvar. W drugiej fazie rozruchu moc bierna zmniejsza się. Po zakończeniu rozruchu, podczas pracy z ustaloną prędkością, wartość mocy biernej ustala się i wynosi około 41,2 kvar.

Relacje pomiędzy mocą czynną i mocą mechaniczną silnika ujmuje sprawność silnika, a jej przebieg w czasie rozruchu przedstawia rys. 3. W pierwszej fazie, gdy moc mechaniczna jest bardzo mała, sprawność jest bliska wartości zerowej. W miarę zwiększania mocy mechanicznej, sprawność zaczyna rosnąć, by w stanie ustalonym osiągnąć wartość na poziomie 92,4%.

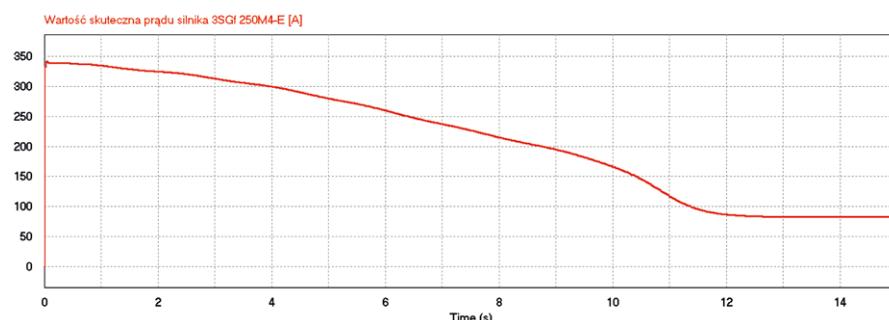
Przebieg współczynnika mocy, także przedstawiony na rys. 3, osiąga relatywnie niską wartość w pierwszej części rozruchu (po załączeniu napędu  $\cos\varphi \approx 0,4$ ) i przez cały czas rozruchu wzrasta, przy czym najszybszy wzrost następuje w końcowej fazie rozruchu, osiągając wartość  $\cos\varphi = 0,819$  po zakończeniu rozruchu.

Na rys. 4 przedstawiono przebieg wartości skutecznej prądu silnika podczas rozruchu, który przez znaczną część rozruchu ma charakter zbliżony do przebiegu mocy biernej. Wynika to z tego, że przy dużej mocy biernej w prądzie dominuje również składowa bierna.

W pierwszej części rozruchu wartość skuteczna prądu silnika jest wysoka (po



Rys. 3. Sprawność i współczynnik mocy silnika 3SGf 250M4-E



Rys. 4. Wartość skuteczna prądu silnika 3SGf 250M4-E

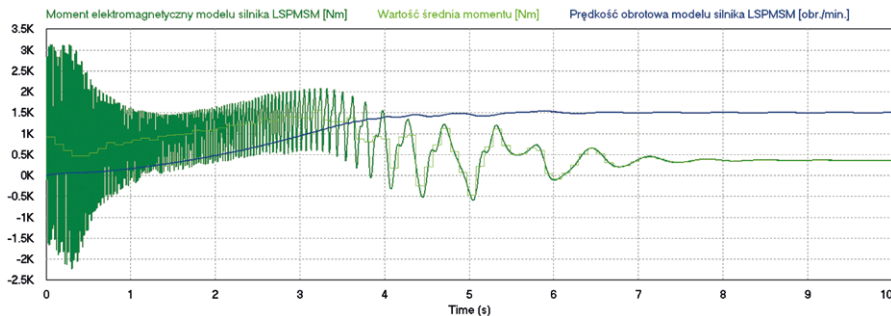
załączeniu napędu wynosi około 340 A). Pod koniec rozruchu wartość skuteczna prądu silnika maleje, stabilizując się na wartości 82,9 A.

### 3.2. Badania symulacyjne rozruchu i pracy przenośnika z napędem silnikiem LSPMSM

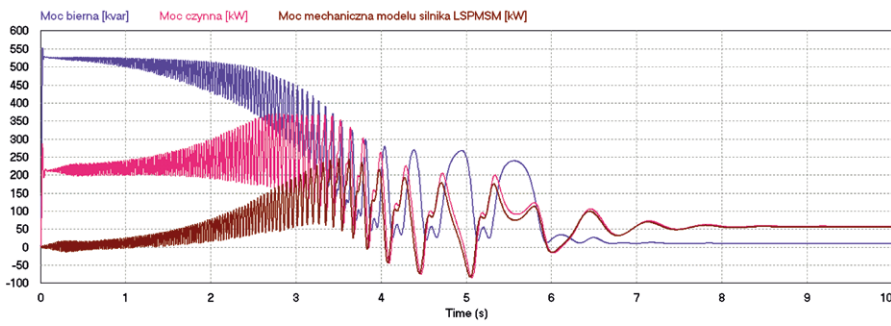
Na rys. 5 zostały przedstawione przebiegi momentu elektromagnetycznego i prędkości rozwijanej przez model silnika LSPMSM. Czas rozruchu w tym przypadku wynosi około 8 sekund. Moment elektromagnetyczny narasta przez cały czas rozruchu, by w końcowej fazie rozruchu zmaleć do wartości średniej wynikającej z obciążenia przenośnika przy prędkości ustalonej. Następuje prawidłowa synchronizacja, prędkość obrotowa modelu silnika ustala się na wartości 1500 obr./min. Prawidłowa synchronizacja jest warunkiem koniecznym, aby model silnika LSPMSM można było zastosować do napędu przenośnika. Jak widać na rys. 5, podczas praktycznie całego czasu rozruchu występują silne oscylacje momentu. Na początku rozruchu mają one częstotliwość sieci zasilającej (50 Hz), potem w miarę wzrostu prędkości modelu silnika ich częstotliwość maleje. Po zakończeniu rozruchu oscylacje momentu zanikają. Średnia wartość momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez model silnika LSPMSM wynosi w tym czasie 360 Nm.

Na rys. 6 zostały przedstawione przebiegi wartości chwilowych mocy biernej, czynnej oraz mechanicznej modelu silnika typu LSPMSM podczas rozruchu. Jak widać na rysunku, moc czynna pobierana przez silnik osiąga po załączeniu wartość 4-krotnie większą od znamionowej, wynoszącą około 215 kW, która podczas rozruchu najpierw lekko wzrasta, a później maleje. Po rozruchu, podczas pracy z ustaloną prędkością, wartość mocy czynnej pobieranej z sieci przez model silnika wynosi około 58,07 kW, natomiast mocy mechanicznej oddawanej 55,85 kW. Różnica tych mocy stanowi straty w silniku, które stosunkowo małe w stanie ustalonym (około 2,22 kW), przybierają znaczną wartość zwłaszcza w pierwszym momencie rozruchu (około 215 kW). Duże straty mocy podczas rozruchu, wielokrotnie przewyższające

straty w silniku, które stosunkowo małe w stanie ustalonym (około 2,22 kW), przybierają znaczną wartość zwłaszcza w pierwszym momencie rozruchu (około 215 kW). Duże straty mocy podczas rozruchu, wielokrotnie przewyższające



Rys. 5. Moment elektromagnetyczny i prędkość modelu silnika LSPMSM 54kW



Rys. 6. Moc bierna, czynna i mechaniczna modelu silnika LSPMSM 54kW

straty w stanie ustalonym i utrzymujące się praktycznie przez cały czas rozruchu, powodują silne nagrzewanie się uzwojeń silnika, zwłaszcza zaś klatki rozruchowej wirnika, pod którą, jak należy pamiętać, znajdują się magnesy trwałe, które mogą zostać trwale rozmagnesowane, jeżeli ich temperatura przekroczy temperaturę Curie. To zaś spowoduje uszkodzenie silnika, ze względu na utratę strumienia wzbudzenia silnika.

Jeżeli obliczymy energię cieplną wydzieloną w silniku w czasie 8 sekund trwania rozruchu, to wynosi ona  $E_{sil} = 677$  kJ, przy czym 95% tej energii wydzielą się w pierwszych 4 sekundach. Jeżeli wziąć pod uwagę, że w wirniku wydzielą się około 60% tej energii, to w rozbiu na wirnik i stojan mamy następujące wartości energii:  $E_w = 406$  kJ,  $E_{st} = 271$  kJ.

Moc bierna, jaką obciąża silnik sieć zasilającą w czasie rozruchu, ma przez praktycznie cały czas rozruchu bardzo dużą wartość wynoszącą około 525 kvar w początkowej fazie rozruchu. W drugiej fazie rozruchu moc bierna zmniejsza się. Po zakończeniu rozruchu, podczas

pracy z ustaloną prędkością, wartość mocy biernej ustala się i wynosi około 10,3 kvar.

Moc mechaniczna, uzyskiwana na wale silnika, jest w pierwszej fazie rozruchu nieznacząca, co wynika z małej prędkości obrotowej, jednak w trakcie rozruchu wolno rośnie. Po zakończeniu rozruchu, podczas pracy z ustaloną prędkością, wartość mocy mechanicznej ustala się i wynosi około 55,85 kW. Jest to wartość nieco wyższa od mocy znamionowej modelu silnika, co jednak jeszcze pozwala na prawidłową pracę modelu silnika LSPMSM w napędzie tego przenośnika.

Relacje pomiędzy mocą czynną silnika i mocą mechaniczną ujmuje sprawność silnika, której przebieg przedstawia rys. 7. W pierwszej fazie, gdy moc mechaniczna jest bardzo mała, sprawność jest bliska wartości zerowej. W miarę zwiększania mocy mechanicznej sprawność zaczyna rosnąć, aby w stanie pracy z ustaloną prędkością osiągnąć wartość na poziomie 96,2%.

Przebieg współczynnika mocy także jest przedstawiony na rys. 7. W początkowej fazie rozruchu jest on niski

i wynosi około 0,38. W czasie rozruchu jego wartość rośnie, aby w stanie pracy z ustaloną prędkością osiągnąć wartość na poziomie 0,985.

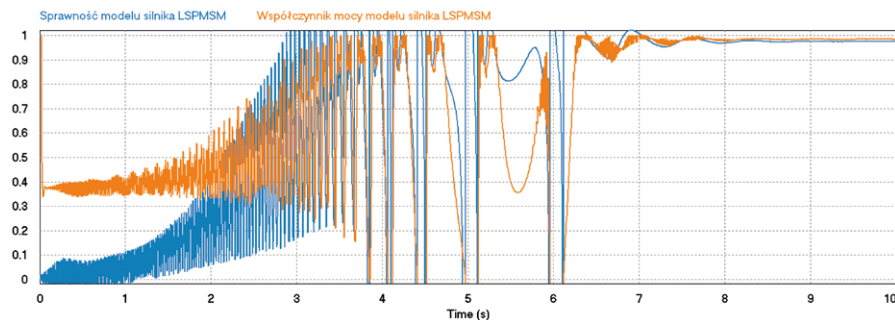
Na rys. 8 przedstawiono wartość skuteczną prądu podczas rozruchu. Wartość skuteczna prądu modelu silnika w pierwszej fazie rozruchu jest wysoka i tuż po włączeniu wynosi około 665 A. Jest to dziesięciokrotność prądu znamionowego ( $I_N = 66$  A) modelu silnika. Następnie podczas rozruchu wartość skuteczna prądu rozruchowego maleje. Jej przebieg przez znaczną część rozruchu ma charakter zbliżony do przebiegu mocy biernej. Wynika to z tego, że przy dużej mocy biernej w prądzie dominuje również składowa bierna.

Pod koniec rozruchu następuje zmniejszenie wartości skutecznej prądu. Podczas pracy z ustaloną prędkością wartość skuteczna prądu ustala się na wartości 68,1 A. Jest to wartość nieco wyższa od prądu znamionowego modelu silnika, co jednak jeszcze pozwala na prawidłową pracę modelu silnika LSPMSM w napędzie tego przenośnika.

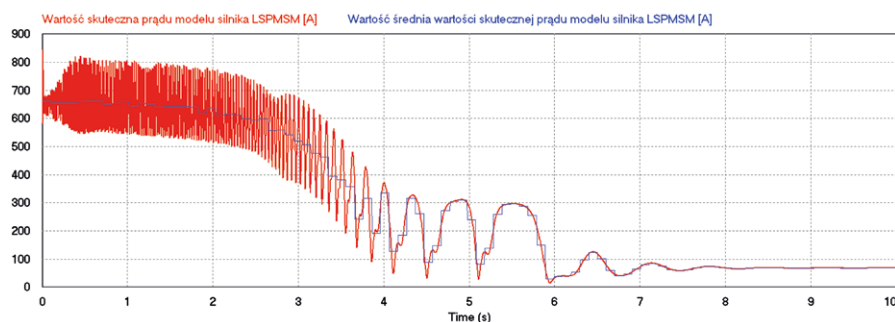
## 4. Porównanie uzyskanych parametrów napędowych

W celu dokonania rzetelnego porównania parametrów napędowych przeprowadzono badania symulacyjne rozruchu i pracy przenośnika taśmowego typu MIFAMA 1000/1x55 o długości 400 m, usytuowanego poziomo, dla trzech wartości przełożeń przekładni i związanych z tym prędkości transportowych: 1:20,41 – 1,5 m/s, 1:15,31 – 2 m/s oraz 1:12,32 – 2,5 m/s. Badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla 2 najczęściej występujących w kopalniach napięć zasilających, wynoszących 500 V oraz 1000 V.

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych i analiz przenośnika napędzanego silnikiem asynchronicznym klatkowym typu 3SGf 250M4-E oraz modelem matematycznym silnika typu LSPMSM należy stwierdzić, że model matematyczny silnika LSPMSM o mocy 54 kW nadaje się do napędu tego przenośnika. Model silnika napędowego typu LSPMSM niezależnie od zastosowanego przełożenia przekładni głównej i tym samym określonej prędkości transportowej bez problemu wchodzi w pracę synchroniczną, co zostało przedstawio-



Rys. 7. Sprawność i współczynnik mocy modelu silnika LSPMSM 54 kW



Rys. 8. Wartość skuteczna prądu modelu silnika LSPMSM 54 kW

ne w punkcie 3.2, a co jest warunkiem koniecznym dla stabilnej pracy napędu.

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych i analiz zostało dokonane porównanie parametrów elektrycznych i mechanicznych analizowanego układu napędowego przenośnika taśmowego typu MIFAMA 1000/1x55 o długości 400 m, które przedstawia tabela 1.

Na podstawie parametrów przedstawionych w tabeli 1 można stwierdzić, że model silnika LSPMSM pobiera z sieci zasilającej niższą moc czynną, co obecnie stosowany do napędu tego przenośnika silnik indukcyjny typu 3SGf 250M4-E. Moc mechaniczna, jaką model silnika LSPMSM przy tym oddaje na swoim wale napędowym, jest za to większa. Oznacza to, że wydajność i prędkość transportowa uzyskiwana przez przenośnik również wzrośnie ze względu na nieco wyższą prędkość obrotową synchroniczną silnika typu LSPMSM w stosunku do prędkości asynchronicznej silnika indukcyjnego. Będą to jednak niewielkie wzrosty tych parametrów.

Współczynnik mocy jest za to o wiele wyższy w przypadku zastosowania do napędu silnika typu LSPMSM. Również

sprawność silnika typu LSPMSM jest wyższa niż silnika indukcyjnego. Oznacza to, że wartość skuteczna prądu obciążenia sieci będzie niższa w przypadku zastosowania do napędu przenośnika modelu silnika LSPMSM niż w chwili obecnej przy stosowaniu silników indukcyjnych.

## 5. Podsumowanie

Dla analizowanego układu napędowego przenośnika taśmowego układ ten nie wymaga regulacji prędkości i jego rozruch odbywa się poprzez bezpośrednie włączenie silnika napędowego do sieci zasilającej. W tym przypadku silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi, który może zastąpić obecnie wykorzystywany do napędu tego urządzenia silnik asynchroniczny klatkowy, musi być przystosowany do asynchronicznego rozruchu również poprzez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej. Wymaga to specjalnej konstrukcji silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi wyposażonego dodatkowo w klatkę rozruchową pozwalającą na jego asynchroniczny rozruch poprzez bezpośrednie włączenie

Tabela 1. Porównanie parametrów w napędzie przonośnika typu MIFAMA 1000/1x55 o długości 400 m przy zastosowaniu silników typu 3SGf 250M4-E oraz modelu silnika LSPMSM

Typ przonośnika	MIFAMA 1000/1x55					
Warunki pomiaru parametrów	Prędkość transportowa 1,5 m/s		Prędkość transportowa 2 m/s		Prędkość transportowa 2,5 m/s	
Parametry	Silnik napędowy					
	Indukcyjny 3SGf 250M4-E	LSPMSM	Indukcyjny 3SGf 250M4-E	LSPMSM	Indukcyjny 3SGf 250M4-E	LSPMSM
Napięcie zasilania	500 V					
Moc mechaniczna oddawana	33,44 kW	33,63 kW	44,23 kW	44,75 kW	54,38 kW	55,85 kW
Moc elektryczna pobierana	35,77 kW	35,37 kW	47,39 kW	46,63 kW	58,86 kW	58,07 kW
Współczynnik mocy	0,8	0,95	0,822	0,978	0,819	0,985
Sprawność silnika	93,5%	95,1%	93,3%	96%	92,4%	96,2%
Wartość skuteczna prądu silnika	51,4 A	43 A	66,6 A	55,2 A	82,9 A	68,1 A
Napięcie zasilania	1000 V					
Moc mechaniczna oddawana	33,44 kW	33,63 kW	44,23 kW	44,76 kW	54,38 kW	55,84 kW
Moc elektryczna pobierana	35,8 kW	35,37 kW	47,42 kW	46,59 kW	58,89 kW	58,08 kW
Współczynnik mocy	0,801	0,95	0,823	0,978	0,82	0,985
Sprawność silnika	93,4%	95,1%	93,3%	96,1%	92,3%	96,1%
Wartość skuteczna prądu silnika	25,7 A	21,5 A	33,4 A	27,8 A	41,4 A	34 A

do sieci zasilającej. Obecnie stosowany do napędu analizowanego przonośnika silnik asynchroniczny klatkowy jest wyposażony w zalewane w jednym procesie technologicznym dwie klatki aluminiowe o różnych przekrojach czynnych (tzw. klatkę rozruchową oraz klatkę pracy). Silniki dwuklatkowe charakteryzują się dużym momentem rozruchowym i mniejszą krotnością prądu rozruchowego od silników jednoklatkowych i głębokożłobkowych. Silnik LSPMSM, który może być zamiennikiem stosowanego obecnie silnika, jest wyposażony w dwie klatki rozruchowe umożliwiające rozruch asynchroniczny tego silnika i wejście w pracę synchroniczną przy obciążeniu momentem znamionowym lub wyższym charakterystycznym dla napędów przonośników taśmowych. Ze względu jednak na dużą wymaganą przeciążalność momentem model silnika LSPMSM charakteryzuje się bardzo dużą krotnością prądu rozruchowego, która dla powyższego modelu silnika osiąga wartość 10. Jest to wartość bardzo duża, niespotykana w silnikach asynchronicznych klatkowych. Zastosowanie zatem proponowanego modelu silnika LSPMSM w napędzie przonośnika będzie się wiązać z przystosowaniem układu zasilającego do tak dużych przeciążeń prądowych występujących w cza-

si rozruchu przonośnika napędzanego silnikiem typu LSPMSM.

Ze względu na duży moment bezwładności rozruch przonośników taśmowych, przede wszystkim przy stosowaniu małego przełożenia przekładni mechanicznych w celu uzyskania dużych prędkości transportowych, jest wydłużony i trwa kilka, kilkanaście sekund. Przy rozruchu asynchronicznym poprzez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej w klatce rozruchowej płyną kilkukrotnie większe prądy w stosunku do prądu znamionowego silnika. Powoduje to szybkie rozgrzewanie się klatki rozruchowej, która znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie magnesów trwałych umieszczonych w wirniku silnika LSPMSM. Należy wziąć to pod uwagę w czasie projektowania silnika LSPMSM przeznaczonego do napędu przonośnika taśmowego, ponieważ magnesy trwałe pierwiastków ziem rzadkich umieszczone w wirniku mają na tyle niską temperaturę Curie, że w skrajnym przypadku może dojść do ich rozmagnesowania.

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”.

## Literatura

- [1] DUKALSKI P., GAWRON S., DZIKOWSKI A.: *Wysoko sprawne silniki z magnesami trwałymi w napędach górniczych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 102/2014, s. 77–83.
- [2] 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.
- [3] Symulator układów energoelektrycznych PSIM: <http://www.powersimtech.com/download.html>
- [4] Katalogi producenta silników elektrycznych do zastosowań górniczych firmy Celma indukta SA.
- [5] Katalogi producenta przonośników taśmowych do zastosowań górniczych firmy MIFAMA.

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

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