

Adam Gozdowiak*, Szymon Lipiński**

* Politechnika Wroclawska, Wroclaw

**Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych, Wroclaw

PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO SYNCHRONIZOWANEGO Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM WZBUDZANYM MAGNESAMI TRWAŁYMI O ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM

COMPARISON OF OPERATING PROPERTIES OF SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS MOTOR WITH LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Streszczenie: W artykule porównano właściwości eksploatacyjne dwóch maszyn: silnika asynchronicznego synchronizowanego (SASf-1612LX) oraz zamiennego montażowo silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (GZM-1612L) o mocach znamionowych równych 3200 kW. Porównaniom poddano parametry rozruchowe, przeciążalność, sprawność oraz obsługowość obu maszyn.

Abstract: This article presents the comparison of two machines: synchronized asynchronous motor (SASf-1612LX) and a replacement assembly of line start permanent magnet synchronous motor (GZM-1612L) with nominal power of 3200 kW. The starting current, overloading, efficiency and maintenance of both machines are compared.

Słowa kluczowe: silnik asynchroniczny synchronizowany, silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi, właściwości eksploatacyjne

Keywords: synchronized asynchronous motor, line start permanent magnet synchronous motor, operating properties

1. Wstęp

W dobie poszukiwań oszczędności w poborze energii elektrycznej oraz zmniejszaniu liczby roboczogodzin personelu obsługującego zespoły maszynowe w zakładach przemysłowych, dużą popularność zyskuje silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (z ang. LSPMSM). Na przestrzeni ostatnich lat powstało wiele prototypowych silników LSPMSM [1 - 7]. Badania na małych silnikach pozwoliły na wypracowanie wzorców konstrukcyjnych pozwalających na budowę coraz to większych maszyn [1, 3].

Ostatnie wyniki badań i budowa silników powyżej 1000 kW [4] wskazują, że większość problemów w silnikach LSPMSM zostało rozwiązanych. Problemami tymi były: zbyt wysokie prądy rozruchowe, niska przeciążalność, niski moment wpadu w synchronizm, wysoki moment zaczepowy i rozkład indukcji w szczelinie z wysokimi wyższymi harmonicznymi. Należy spodziewać się w najbliższych latach większego zainteresowania tymi silnikami. Jest to wynik pozytywnych recenzji pracujących prototypowych silników.

Wychodząc naprzeciw wątpliwościom stawianym przez użytkowników dużych silników elektrycznych, co do słuszności wyboru zakupu nowych maszyn w artykule porównano właściwości eksploatacyjne silnika asynchronicznego synchronizowanego (SASf-1612LX) z silnikiem synchronicznym wzbudzany magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (GZM-1612L) o mocach $P=3200$ kW. Dane znamionowe powyższych maszyn zawarto w tabeli 1.

2. Silnik SAS, typ: SASf-1612LX

Silnik asynchroniczny synchronizowany (SASf-1612LX) jest szczególnym przypadkiem silnika dwustronnie zasilanego, którego uzwojenie wirnika jest zasilane napięciem stałym w celu uzyskania synchronicznej prędkości obrotowej. SAS uruchamiany jest podobnie jak silnik indukcyjny pierścieniowy poprzez dołączenie trójfazowego rozrusznika do uzwojenia wirnika za pomocą pierścieni ślizgowych. W ten sposób łączy się zalety silnika pierścieniowego, jaką jest łagodny rozruch z zaletą sil-

nika synchronicznego, jaką jest praca z wysokim współczynnikiem mocy.

Tab. 1. Dane znamionowe badanych silników

Parametr	SASf-1612LX	GZM-1612L
P_N [kW]	3200	3200
n_N [obr/min]	500	500
f_N [Hz]	50	50
U_N [V]	6000	6000
I_N [A]	355	323
$\cos\varphi_N$ [-]	0,9 poj.	0,97 ind.
η [%]	96,3	98,3
I_R/I_N [-]	5,6 *	6,8
M_R/M_N [-]	1,0 *	2,0
M_{MIN}/M_N [-]	-	1,2

*prąd i moment rozruchowy został wyznaczony dla wartości rezystancji rozrusznika równej $0,08 \Omega$, która jest minimalną rezystancją dodatkową włączoną w obwód wirnika pozwalającą na rozruch silnika z pełnym obciążeniem

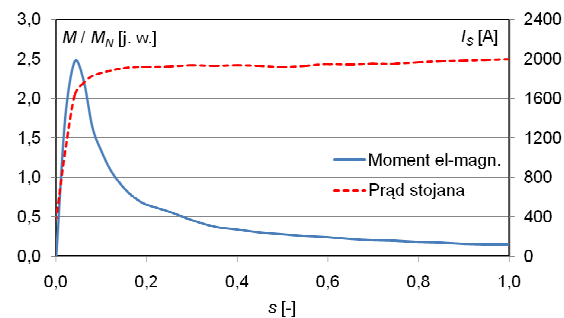
Widok silnika SASf-1612LX będącego na stacji prób w 2016 roku przedstawiono na rysunku 1. Silnik ten z racji dużych strat został zaprojektowany, jako maszyna przewietrzana z promieniowymi kanałami wentylacyjnymi w stojanie i wirniku.



Rys. 1. Widok silnika asynchronicznego synchronizowanego nad silnikiem synchronicznym, typ: SASf-1612LX.

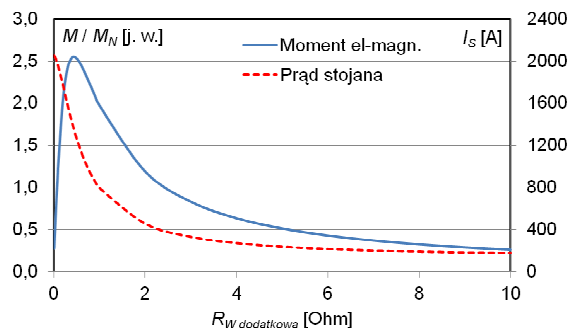
Przewagą silnika asynchronicznego synchronizowanego nad silnikiem synchronicznym o wzbudzeniu elektromagnetycznym jest znacznie większy moment rozruchowy, który może być regulowany poprzez zmianę rezystancji rozrusznika dołączonego do uzwojenia wirnika. Rozruch bez dodatkowej rezystancji w obwodzie wirnika, jedynie przy zwartych zaciskach uzwojenia umożliwia rozruch silnika jedynie przy obciążeniu nie przekraczającym $0,1M_N$

(rysunek 2). Przy tak małym momencie może okazać się, że rozruch bez obciążenia trwać będzie na tyle długo, że dojdzie do przegrzania uzwojeń na skutek zbyt małego zapasu momentu asynchronicznego przy odpowiednio wysokim momencie bezwładności napędzanego urządzenia.



Rys. 2. Wartości prądu stojana i momentu elektromagnetycznego w funkcji poślizgu, SASf-1612LX

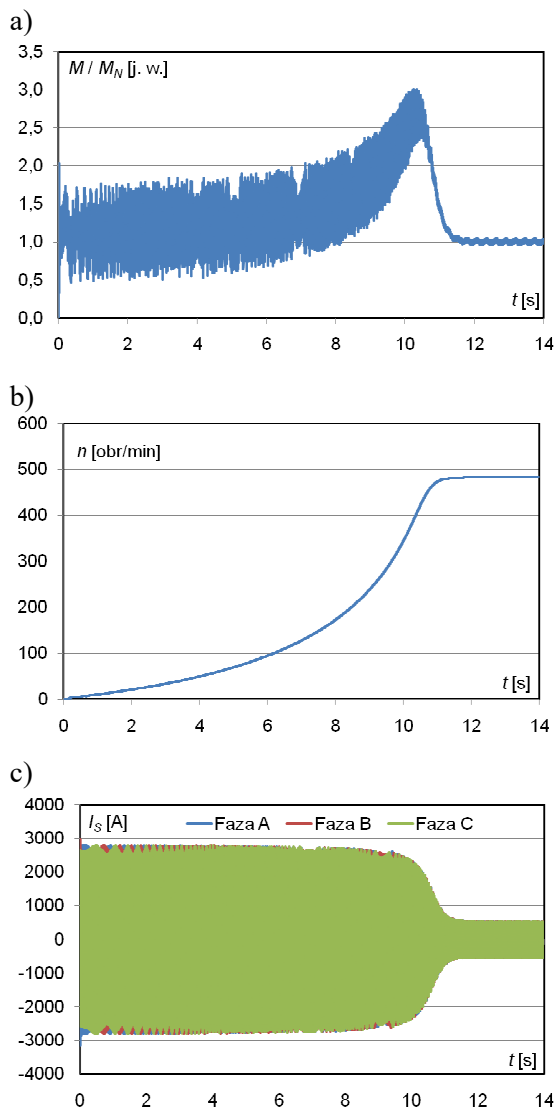
W silniku SAS maksymalna wartość prądu rozruchowego występuje dla zerowej rezystancji rozrusznika. Wzrost tej rezystancji przyczynia się do zmniejszania wartości prądu rozruchowego (rysunek 3). Moment rozruchowy natomiast jest największy dla rezystancji rozrusznika (R_W dodatkowa) równej $0,4 \Omega$.



Rys. 3. Wartości prądu stojana i momentu rozruchowego w funkcji rezystancji dodatkowej w uzwojeniu wirnika dla $s=1$, SASf-1612LX

Silniki SAS posiadają inną konstrukcję uzwojenia wirnika w odróżnieniu od klasycznych silników pierścieniowych. W czasie rozruchu do trójfazowego uzwojenia wirnika dołączony jest rozrusznik. Natomiast po osiągnięciu prędkości asynchronicznej wirnik zostaje zasilony napięciem stałym i następuje synchronizacja. Pełen obraz procesu rozruchu pokazują przebiegi momentu, prędkości i prądu stojana, które zamieszczono na rysunku 4. Przyjęto, że rezystancja dodatkowa dołączona do uzwojenia wirnika wynosi $0,08 \Omega$. Wartość ta jest najmniejszą wartością umożliwiającą rozruch silnika przy

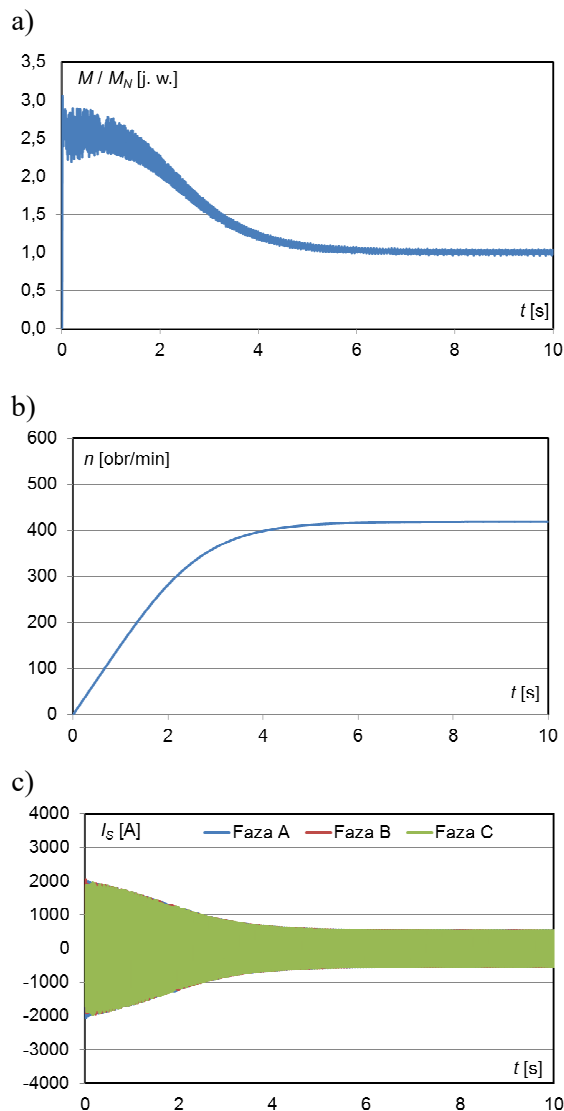
$M_{OBC}=M_N$ bez dodawania układu regulacji rozrusznika (rysunek 3). Dla takiej rezystancji wykazano największy prąd stojana, jaki może pojawić się podczas rozruchu przy znamionowym obciążeniu. Założono również, że moment bezwładności obciążenia wynosi 2000 kgm^2 , natomiast samego silnika 1900 kgm^2 .



Rys. 4. Przebiegi czasowe a) momentu elektromagnetycznego; b) prędkości obrotowej oraz c) prądów stojana w czasie rozruchu silnika SASf-1612LX dla $M_{OBC}=M_N$ oraz $R_{Wdodatkowa}=0,08 \Omega$

Dla porównania na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki rozruchowe dla rezystancji dodatkowej równej $0,4 \Omega$, która to umożliwia zredukowanie rozruchowego prądu stojana, przy jednoczesnym uzyskaniu maksymalnej wartości momentu rozruchowego. Maksymalna wartość rezystancji rozrusznika pozwalająca na rozruch silnika przy znamionowym obciążeniu wynosi $2,2 \Omega$. Niestety im większa wartość rezystancji

rozrusznika tym większy poślizg w pracy asynchronicznej i dlatego rezystancję podczas rozruchu należy stopniowo zmniejszać, aby zbliżyć prędkość obrotową do prędkości synchronicznej, a następnie zapoczątkować proces synchronizacji silnika.



Rys. 5. Przebiegi czasowe a) momentu elektromagnetycznego; b) prędkości obrotowej oraz c) prądów stojana w czasie rozruchu silnika SASf-1612LX dla $M_{OBC}=M_N$ oraz $R_{Wdodatkowa}=0,4 \Omega$

Synchronizacja silnika nastąpi wówczas, gdy zostanie doprowadzony w odpowiedniej chwili czasowej i o odpowiedniej wartości prąd stały do uzwojenia wirnika. Podczas pracy synchronicznej dwie fazy wirnika są połączone równolegle oraz szeregowo z fazą trzecią. W takim rozkładzie w jednej fazie płynie prąd o podwójnej wartości niż w pozostałych dwóch. Dlatego też uzwojenie jednej fazy posiada szer-

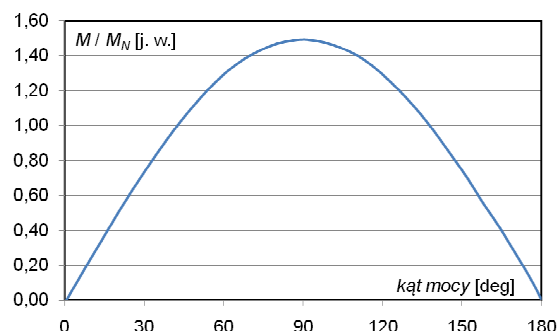
szy żłobek, aby pomieścić dwa razy więcej prętów miedzianych, po to, aby gęstość prądu we wszystkich fazach była jednakowa.

Synchronizacja silników SAS to istotne zagadnienie procesu rozruchu. Im większa moc silnika, tym trudniejsza synchronizacja. Przynajmniej przyłączenie prądu wzbudzenia powoduje powstanie niekorzystnych, dynamicznych zjawisk elektromechanicznych. Niejednokrotnie w celu dokonania synchronizacji forsuje się prąd wzbudzenia. Jest to wynik błędnie dobranej chwili załączenia prądu wzbudzenia. Podczas forsowania tego prądu silnik wytwarza moment elektromagnetyczny znacznie większy od znamionowego, doprowadzając do synchronizacji. Taki sposób synchronizacji posiada wiele wad, takich jak:

- powstanie dużych sił dynamicznych wytwarzających naprężenia w uzwojeniach i elementach konstrukcyjnych,
- pojawienie się drgań promieniowych obciążających łożyska,
- indukowanie sił elektromotorycznych o innym przesunięciu fazowym niż napięcie sieci, wobec czego układ izolacyjny uzwojenia stojana jest poddawany naprężeniom dochodzącym do podwójnej wartości i może ulec przebiciu lub przyspieszyć proces starzeniowy izolacji, prowadząc do awarii silnika.

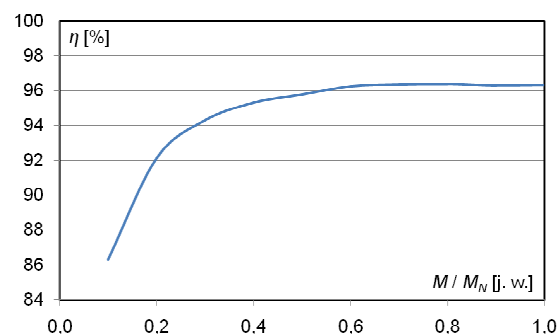
Wadą silników SAS jest jego mała przeciążalność wynikająca z małej szczeliny powietrznej. Badany silnik posiada maksymalny moment elektromagnetyczny równy $1,5 M_N$ podczas pracy pojemnościowej ze współczynnikiem mocy równym 0,9 (rysunek 6). W tym stanie maszyna jest przewzbudzona i oddaje do sieci moc bierną indukcyjną, pracując jako kompensator. Wielu użytkowników zaprzestaje korzystania z zalety silników SAS, jaką jest kompensacja mocy biernej. Taki zabieg jest widoczny szczególnie w zakładach przemysłowych, wykorzystujących powszechnie baterie kondensatorów. Powoduje to, że silnik pracujący ze współczynnikiem mocy równym 1, potrzebuje zdecydowanie mniejszego prądu wzbudzenia, co wiąże się z mniejszym poborem mocy przez silnik, a tym samym ze wzrostem jego sprawności. Jednakże zmniejszenie prądu wirnika przyczynia się do zmniejszenia przeciążalności i tak dla badanej maszyny spadnie on z poziomu 1,5 do 1,2. W konsekwencji przy nagłym wzroście ob-

ciążenia i niestabilnej pracy może dojść do wypadnięcia silnika z synchronizmu.



Rys. 6. Zależność momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta mocy, SASf-1612LX

Na rysunku 7 przedstawiono sprawność silnika w funkcji obciążenia. Silnik utrzymuje wysoką sprawność w zakresie powyżej $0,5 M_N$, natomiast poniżej tej wartości drastycznie maleje.



Rys. 7. Sprawność silnika SASf-1612LX

3. Silnik LSPMSM, typ: GZM-1612L

Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami o rozruchu bezpośrednim został zaprojektowany na potrzeby prezentowanego artykułu. W fazie koncepcji założono, że silnik ten będzie zamienny montażowo za silnik asynchroniczny synchronizowany, SASf-1612LX. Zastosowanie magnesów trwałych w wirniku zredukowało całkowicie straty wzbudzenia, które w silniku SAS stanowią aż 31 % strat całkowitych. Minimalizacja strat, a tym samym ilość wydzielanego ciepła w silniku pozwoliła na wykonanie maszyny w obudowie zamkniętej z chłodzeniem powietrznym powierzchniowym. Przykładowy widok silnika ($P = 1000$ kW, $n = 187,5$ obr/min, $U = 6$ kV, $\eta = 97,5$ %, $\cos\varphi = 0,99$) o takiej konstrukcji pokazano na rysunku 8. W fazie projektowania silnika LSPMSM uzyskano sinusoidalny kształt napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika poprzez odpowiedni dobór liczby żłobków stojana i wirnika, jak również rozkład magnesów.

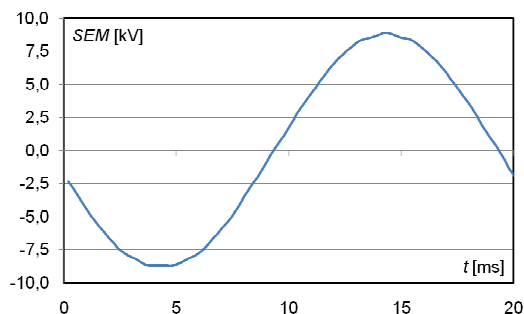


Rys. 8. Widok silnika LSPMSM, SMH-1732M

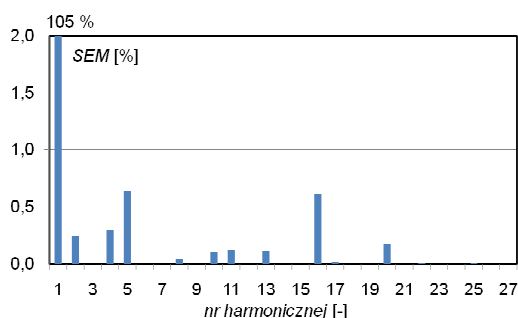
Widok tego napięcia wraz z rozkładem na wyższe harmoniczne pokazano na rysunku 9.

Wartość współczynnika THD wynosi 1,0 %.

a)

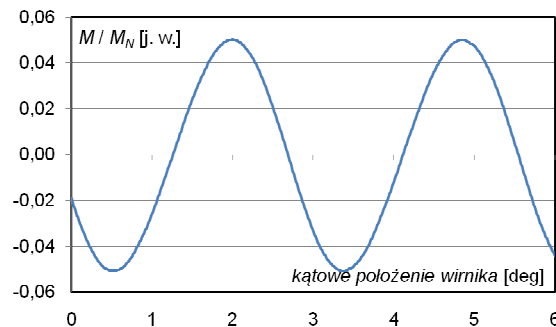


b)



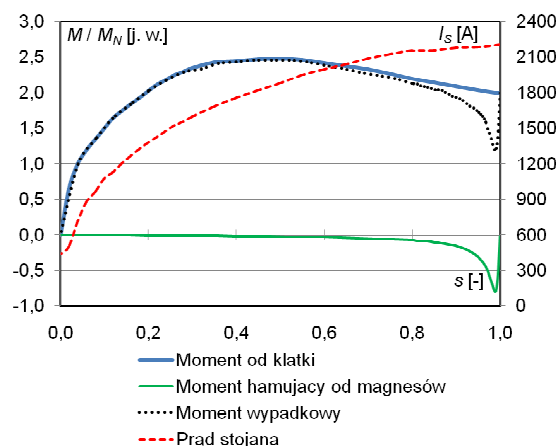
Rys. 9. Przebieg a) napięcia indukowanego oraz b) jego analiza harmoniczna

Poprawny dobór liczby żłobków stojana i wirnika umożliwił zminimalizowanie momentu zaczepowego do wartości nie przekraczającej 0,05 M_N . Na rysunku 10 przedstawiono przebieg momentu zaczepowego w funkcji kąta położenia wirnika dla dwóch podziałek żłobkowych stojana. Właściwości ruchowe silników LSPMSM istotnie wpływają na właściwości eksploatacyjne. W początkowej fazie rozruchu powstaje znacznych wartości moment hamujący od magnesów trwałych utrudniający rozruch.



Rys. 10. Przebieg momentu zaczepowego w funkcji położenia wirnika

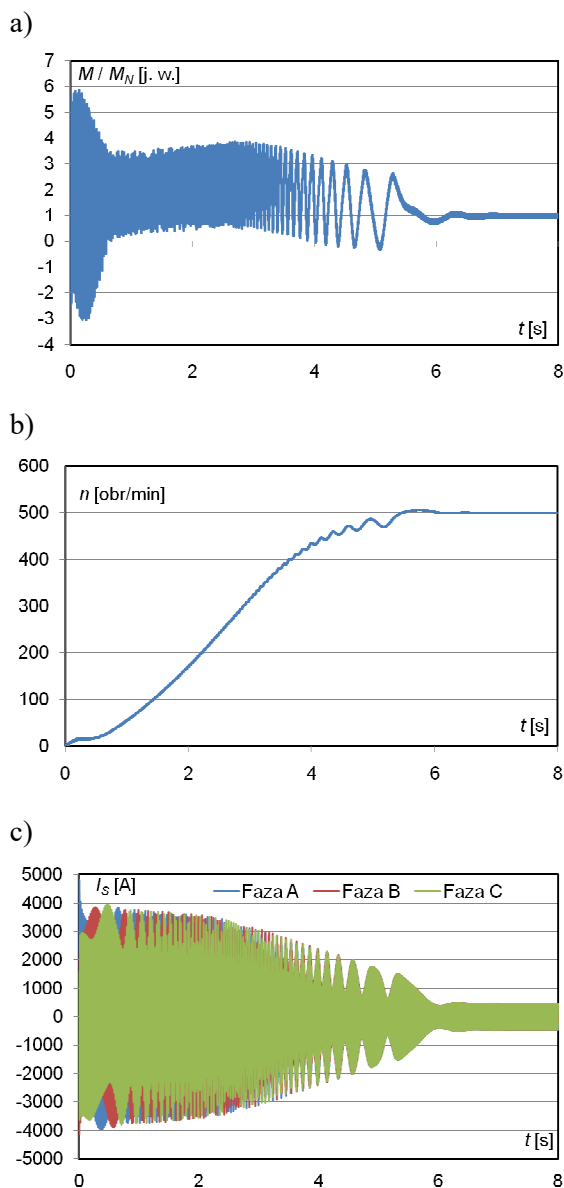
Wytworzony moment asynchroniczny od klatki rozruchowej wirnika powinien być na tyle duży, aby przeciwstawić się momentowi hamującemu i obciążenia oraz na tyle duży, aby była zachowana nadwyżka skracająca czas rozruchu. Taki zabieg eliminuje zjawisko rozmagnesowania magnesów na skutek przekroczenia dopuszczalnej temperatury klasy, z jakiej zostały wykonane magnesy. W zaprojektowanym silniku zastosowano dwie klatki w wirniku uzyskując odpowiednio wysoki moment rozruchowy (wypadkowy, rysunek 11). Poprawnie zaprojektowanie klatki umożliwiło uzyskanie momentu wpadu w synchronizm na poziomie 1,3 M_N (rysunek 14). Wysoka wartość momentu wpadu gwarantuje, że silnik wpadnie w synchronizm podczas rozruchu przy znamionowym obciążeniu, jak i w warunkach obniżonego napięcia zasilania, na skutek rozruchu.



Rys. 11. Przebieg prądu stojana, momentu elektromagnetycznego i hamującego podczas rozruchu silnika GZM-1612L

Istotnym zagadnieniem w procesie projektowania silnika LSPMSM jest rozruch. Wymaga on dokonania kompromisu pomiędzy odpowiednio wysokim momentem elektromagnetycznym

przy jednoczesnym ograniczaniu prądu rozruchowego. Przebiegi momentu, prędkości i prądów stojana podczas rozruchu dla $M_{OBC}=M_N$ przedstawiono na rysunku 12.

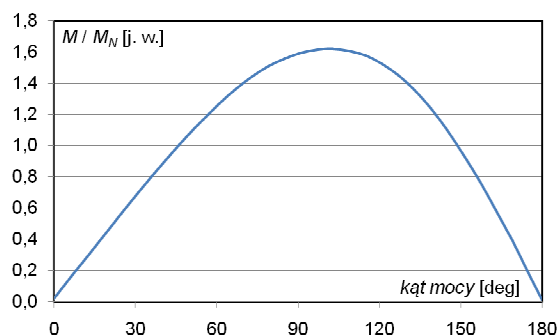


Rys. 12. Przebiegi czasowe a) momentu elektromagnetycznego; b) prędkości obrotowej oraz c) prądów stojana w czasie rozruchu silnika GZM-1612L dla $M_{OBC}=M_N$

Moment bezwładności obciążenia wynosi 2000 kgm^2 , natomiast samego silnika 1650 kgm^2 . Maksymalna chwilowa wartość momentu wynosi $6 M_N$, czyli znacząco więcej niż w przypadku silnika SAS (rysunek 4), dlatego przy zamianie silników należy sprawdzić wytrzymałość sprzęgła na obliczoną wartość momentu. W pierwszej chwili rozruchu występuje krótkotrwały skok prądowy wynoszący $8,8 I_{SN}$, nie trwający dłużej niż $0,02 \text{ s}$. Wysoki

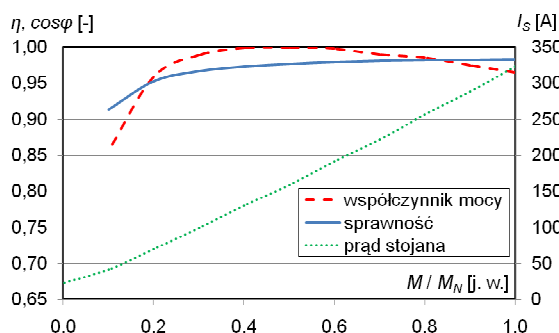
moment wpadu, gwarantuje synchronizację silnika, przez co wirnik osiąga prędkość synchroniczną.

Na rysunku 13 przedstawiono charakterystykę momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta mocy. Dla badanego silnika uzyskano przeciążalność równą $1,6 M_N$, czyli zgodną z wymaganiami normy [7]. Przeciążalność uzyskano poprzez odpowiedni dobór liczby zwojów na biegun i fazę oraz zwiększenie szczeliny powietrznej w odniesieniu do omawianego silnika SAS.



Rys. 13. Charakterystyka przeciążalności silnika GZM-1612L

Na rysunku 14 widoczne są charakterystyki elektromechaniczne tj. sprawności, współczynnika mocy oraz prądu stojana w funkcji obciążenia. Cechą charakterystyczną silnika LSPMSM jest to, że posiada współczynnik mocy i sprawność na wysokim poziomie w szerokim zakresie obciążenia od $0,2$ do $1 M_N$.



Rys. 14. Charakterystyki elektromagnetyczne silnika GZM-1612L

4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników obliczeń można stwierdzić, że możliwe jest zastąpienie silnika asynchronicznego synchronizowanego silnikiem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim zamiennym montażowo. Silnik LSPMSM posiada zdecydowanie większą

sprawność, która jest praktycznie stała w szerokim zakresie obciążania. Obecnie silniki SAS nie są wykorzystywane w tak dużym stopniu do kompensacji mocy biernej. Zaproponowany silnik z magnesami o wysokim współczynniku mocy powyżej 0,97 w zakresie obciążenia 0,2-1M_N w pełni zastępuje silnik SAS.

Ponadto silnik LSPMSM jest maszyną bezobsługową nie wymagającą rozrusznika do rozruchu, ani wzbudnicy zasilającej uzwojenie wirnika. Brak urządzenia szczotkowego eliminuje częste przeglądy i wymianę zużytych szczotek. W omawianym silniku nie jest wymagany proces synchronizacji silnika przez obsługę lub dodatkowe układy łagodnej synchronizacji.

Obudowa zamknięta gwarantuje, że do wnętrza silnika nie przedostanie się niepożądany element mogący doprowadzić do zwarcia, a tym samym uszkodzeń. W szczególnych nieprzewidzianych przypadkach, zamknięta obudowa chroni maszynę przed zalaniem.

5. Literatura

- [1]. T. Zawilak, J. Zawilak, „Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 3, str. 169-173, 2016.
- [2]. T. Zawilak, J. Zawilak, „Properties and parameters of the synchronous motors with permanent magnets”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R93, nr 11, str. 94-97, 2017.
- [3]. T. Zawilak, „Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie pompy dużej mocy”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 2, str. 247-251, 2015.
- [4]. S. Lipiński, J. Zawilak, „Energooszczędne silniki elektryczne w napędach pomp wirowych”, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów*

Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, nr 70, str. 325-334, 2014.

[5]. S. Lipiński, J. Zawilak, „Analiza stanu ustalonego wymiany ciepła w silniku synchronicznym z magnesami trwałymi”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 3, str. 53-58, 2016.

[6]. T. Zawilak, „Utilizing the deep bar effect on Line start of permanent magnet machines”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R89, nr 2b, str. 177-179, 2013.

[7]. IEC 60034-12 Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors.

[8]. T. Glinka, J. Bernatt: Asynchronous Slip-Ring Motor Synchronized with Permanent Magnet. *Archives of Electrical Engineering*. ISSN 1427-4221. Nr 1/2017. Str. 199-206.

Autorzy

dr inż. Adam Gozdowiak
Politechnika Wrocławska
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
adam.gozdowiak@pwr.edu.pl



Politechnika Wrocławska

mgr inż. Szymon Lipiński
Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych
Sp. z o.o
ul. Fabryczna 10, 53-609 Wrocław
szymon.lipinski@dfme.pl



DOLNOŚLĄSKA FABRYKA MASZYN ELEKTRYCZNYCH
WROCLAW Sp. z o.o.