

Korzyści z zastosowania silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim zamiast silnika asynchronicznego synchronizowanego

Adam Gozdowiak, Szymon Lipiński

1. Wstęp

W dobie poszukiwań oszczędności w poborze energii elektrycznej oraz zmniejszania 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 jednostek napędowych [1, 3].

Ostatnio publikowane wyniki badań i budowa silników powyżej 1000 kW [4] wskazują, że większość problemów w silnikach LSPMSM została rozwiązana. Trudnościami tymi były: zbyt wysokie prądy rozruchowe, niska przeciążalność, niski moment wpadu w synchronizm, wysoki moment zaczepowy i niesinusoidalny rozkład indukcji w szczelinie. Dlatego w najbliższych latach można spodziewać się większego zainteresowania tymi maszynami. 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 wzbudzonym

Streszczenie: W artykule udowodniono słuszność wyboru silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (GZM-1612L) zamiennego montażowo za silnik asynchroniczny synchronizowany (SASf-1612LX). Wywodu tego dokonano poprzez porównanie właściwości eksploatacyjnych obu maszyn o tej samej mocy znamionowej na wale, tj. 3200 kW. Porównaniom poddano właściwości rozruchowe, przeciążalność, sprawność oraz obsługowość obu maszyn.

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

THE ADVANTAGE OF CHOOSING LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR INSTEAD OF SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS MOTOR

Abstract: This article presents the pertinence of choosing a line start permanent magnet synchronous motor (GZM-1612L) replacement assembly of synchronized asynchronous motor (SASf-1612LX). This is done by comparing the operating properties of both machines with the same rated power on the shaft, as 3200 kW. The starting current, overloading, efficiency and maintenance of both machines are compared.

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

Tabela 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
$\cos\phi_N$ [-]	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 zostały wyznaczone dla wartości rezystancji rozrusznika równej 0,08 Ω , która jest minimalną rezystancją dodatkową włączoną w obwód wirnika, pozwalającą na rozruch silnika z pełnym obciążeniem

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. 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



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

pomocą pierścieni ślizgowych. W ten sposób łączy się zaletę silnika pierścieniowego, jaką jest łagodny rozruch, z zaletą silnika synchronicznego, jaką jest praca z wysokim współczynnikiem mocy.

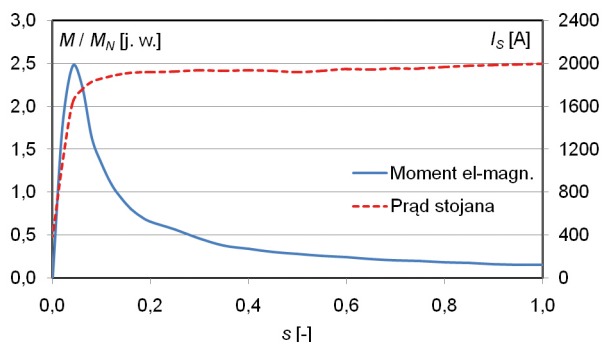
Widok silnika SASf-1612LX, będącego na stacji prób w 2016 roku, przedstawiono na rysunku 1. Silnik ten z racji dużych

strat został zaprojektowany jako maszyna przewietrzana z promieniowymi kanałami wentylacyjnymi w stojanie i wirniku.

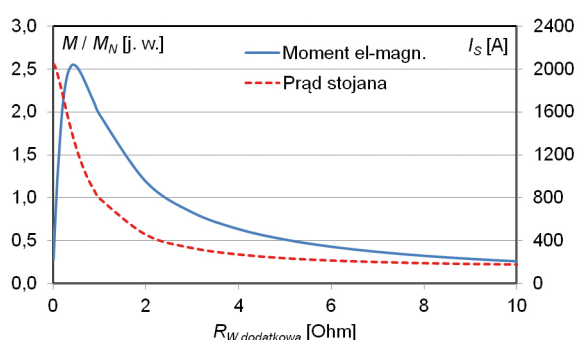
Przewagą silnika asynchronicznego synchronizowanego nad silnikiem synchronicznym o wzbudzeniu elektromagnetycznym jest znacznie większy moment rozruchowy, który może być regulowany poprzez zmianę rezystancji rozrusznika. Rozruch bez dodatkowej rezystancji w obwodzie wirnika, jedynie przy zwartych zaciskach uzwojenia, umożliwi rozruch silnika jedynie przy małym obciążeniu nieprzekraczającym $0,1 M_N$ (rysunek 2). Przy tak małym momencie może się okazać, że rozruch bez obciążenia trwać będzie na tyle długo, iż dojdzie do przegrzania uzwojeń na skutek zbyt małego zapasu momentu asynchronicznego przy odpowiednio wysokim momencie bezwładności urządzenia napędzanego.

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 ($R_{W \text{ dodatkowa}}$) równej $0,4 \Omega$.

Silniki SAS posiadają inną konstrukcję uzwojenia wirnika w odróżnieniu od klasycznych silników pierścieniowych. W czasie rozruchu do trójfazowego uzwojenia wirnika dołączony jest rozrusznik. Po osiągnięciu prędkości bliskiej synchronicznej do uzwojenia wirnika zostaje podane napięcie stałe i następuje synchronizacja.



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

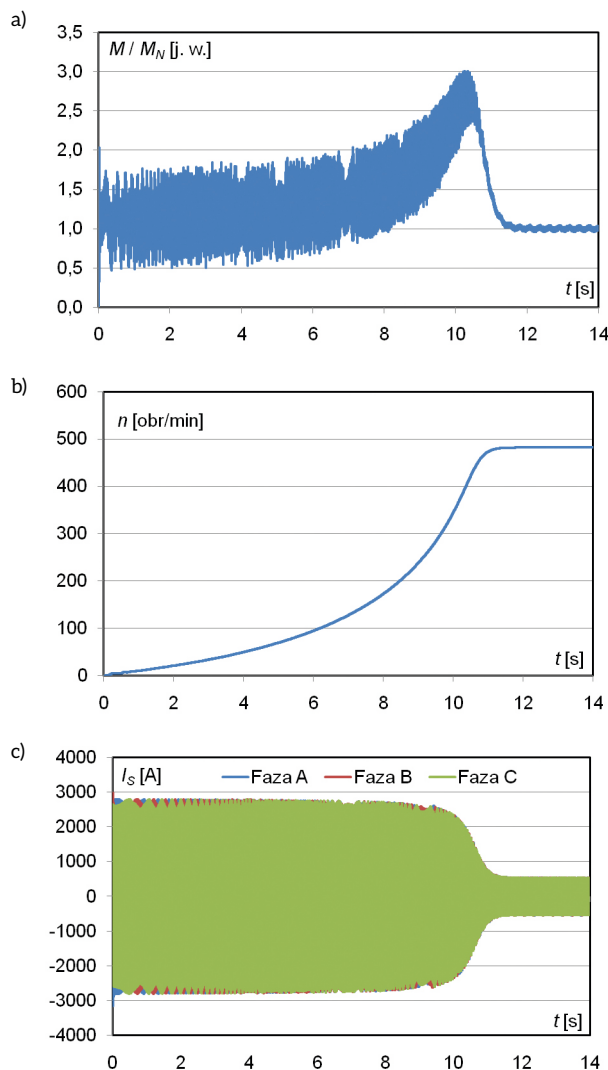


Rys. 3. Wartości prądu stojana i momentu rozruchowego w funkcji rezystancji dodatkowej w uzwojeniu wirnika dla $s = 1$, SASf-1612LX

Pełen obraz procesu rozruchu pokazują przebiegi momentu, prędkości i prądu stojana (rysunek 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. Założono również, że moment bezwładności obciążenia wynosi 2000 kgm^2 , s samego silnika 1900 kgm^2 .

Dla porównania na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki rozruchowe dla rezystancji dodatkowej równej $0,4 \Omega$, która umożliwia zredukowanie prądu rozruchowego 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. Dlatego rezystancję podczas rozruchu należy stopniowo zmniejszać, w celu zbliżenia prędkości obrotowej do prędkości synchronicznej, a następnie zapoczątkować proces synchronizacji silnika.

Synchronizacja silnika nastąpi wówczas, gdy w odpowiedniej chwili czasowej do uzwojenia wirnika zostanie doprowadzony prąd stały o odpowiedniej wartości. Podczas pracy synchronicznej dwie fazy wirnika są połączone równolegle oraz szeregowo z fazą trzecią. W takim rozkładzie w jednej fazie płynie

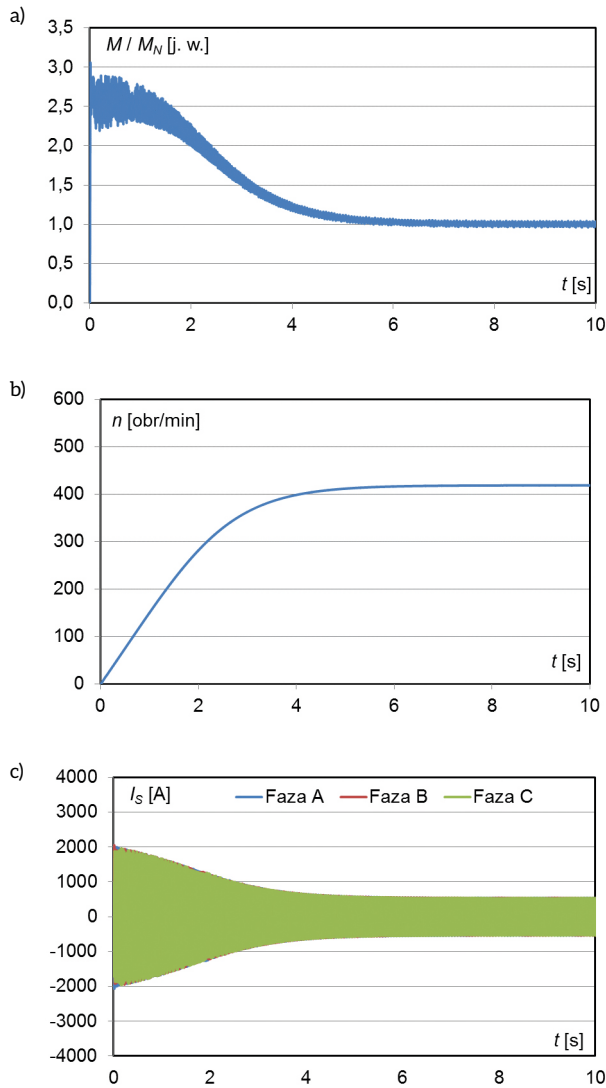


Rys. 4. Przebiegi czasowe: a) momentu elektromagnetycznego; b) prędkości obrotowej; c) prądów stojana w czasie rozruchu silnika SASf-1612LX dla $M_{OBC} = M_N$ oraz $R_{Wdodatkowa} = 0,08 \Omega$

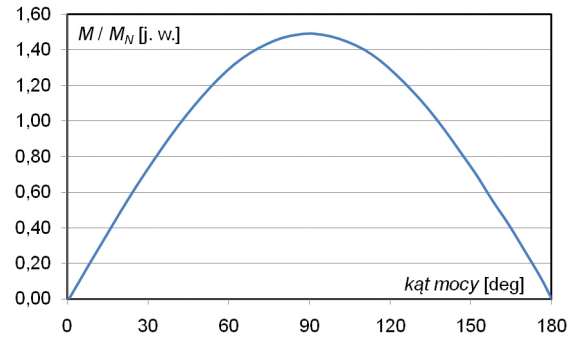
prąd o dwukrotnie wyższej wartości niż w pozostałych dwóch. Dlatego też uzwojenie jednej fazy posiada szerszy żłobek, aby pomieścić dwa razy więcej prętów miedzianych. Jest to zabieg celowy, aby we wszystkich fazach gęstość prądu była jednakowa.

Synchronizacja silników SAS jest istotnym zagadnieniem procesu rozruchu. Im większa moc silnika, tym trudniejsza synchronizacja. Przypadkowe załączenie 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, do których można zaliczyć:

- powstanie dużych sił dynamicznych wytwarzających naprężenia w uzwojeniach i elementach konstrukcyjnych;
- pojawienie się drgań promieniowych obciążających łożyska;



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

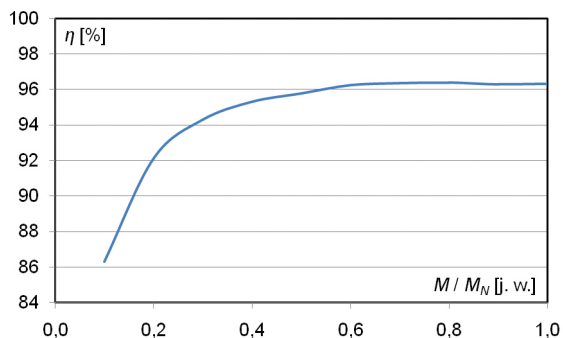


Rys. 6. Zależność momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta mocy, SASf-1612LX

- 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 ich mała przeciążalność, wynikająca głównie z małej szczeliny powietrznej. Rozpatrywany 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. Jest to szczególnie widoczne 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



Rys. 7. Sprawność silnika SASf-1612LX



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

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 obciążenia i niestabilnej pracy może dojść do wypadnięcia silnika z synchronizmu i jego zatrzymania.

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

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 typu SASf-1612LX.

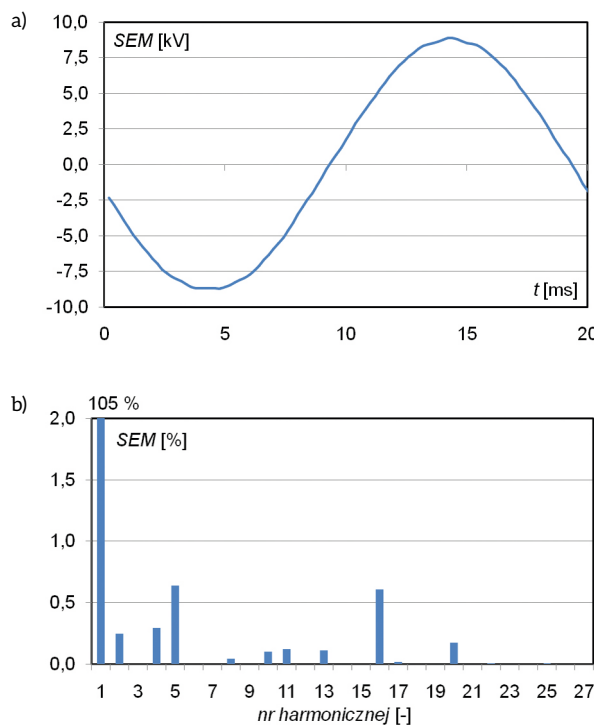
Zastosowanie magnesów trwałych w wirniku zredukowało całkowicie straty wzbudzenia, które w silniku SAS stanowią aż 31% strat całkowitych. Minimalizacja strat, a tym samym ilości wydzielanego ciepła w silniku, pozwoliła na wykonanie maszyny w obudowie zamkniętej z chłodzeniem powietrznym powierzchniowym. 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 właściwy rozkład magnesów. Przebieg tego napięcia wraz z rozkładem na wyższe harmoniczne pokazano na rysunku 9.

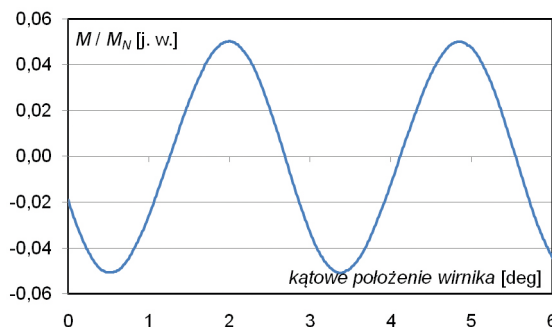
Wartość współczynnika THD wynosi 1,0%.

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.

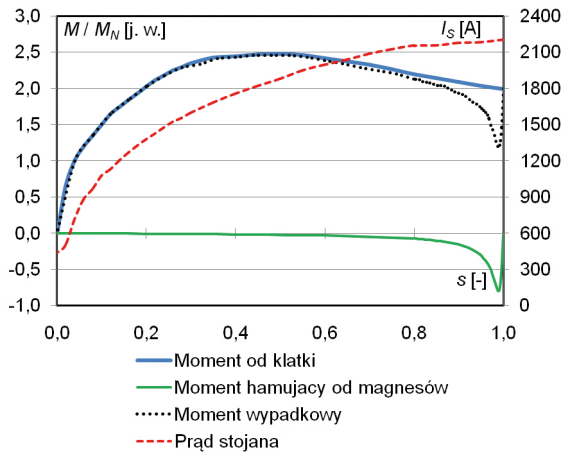
Właściwości ruchowe silników LSPMSM istotnie wpływają na właściwości eksploatacyjne. W początkowej fazie rozruchu powstaje znacznych wartości moment hamujący od magnesów trwałych, który utrudnia rozruch. Wytworzony moment



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



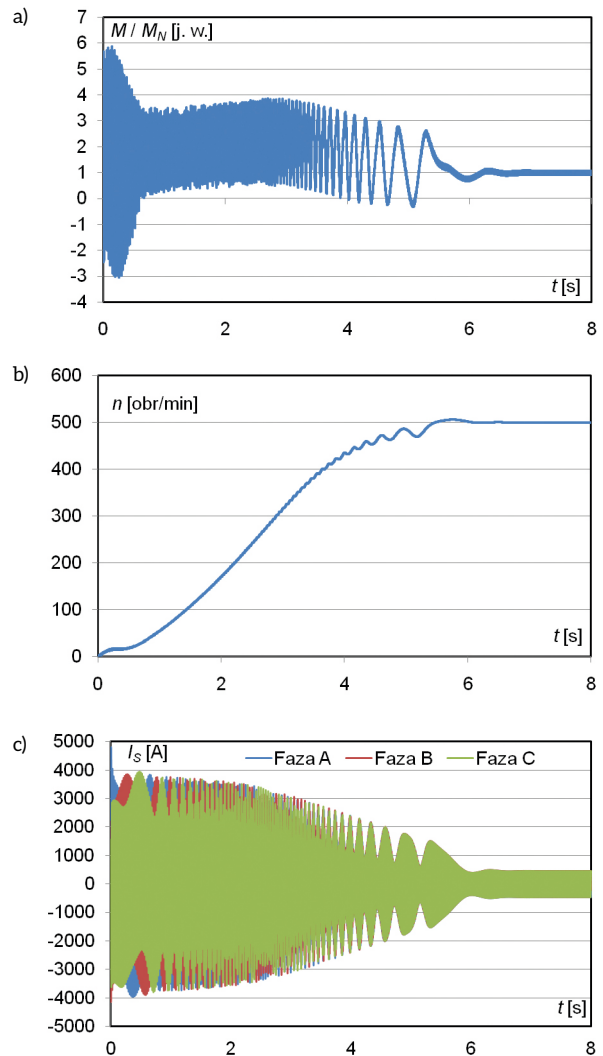
Rys. 10. Przebieg momentu zaczepowego w funkcji położenia wirnika



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

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). Poprawne 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.

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



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

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

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 obliczonej wartości 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 zaleceniami normy [7]. Przeciężalność uzyskano poprzez odpowiedni dobór liczby zwojów na biegun i fazę oraz zwiększenie szczeliny powietrznej w porównaniu do omawianego silnika SAS.

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 on współczynnik mocy i sprawność na wysokim poziomie w szerokim zakresie obciążenia od $0,2$ do $1 M_N$.

4. Podsumowanie

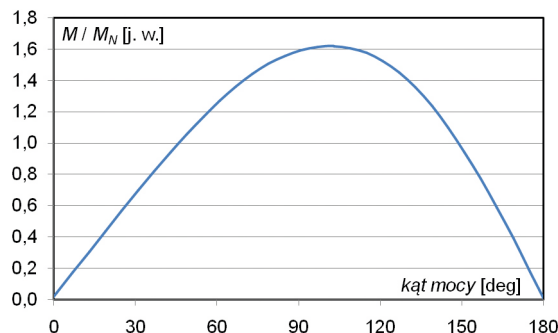
Na podstawie przedstawionych wyników obliczeń można stwierdzić, że możliwe jest zastąpienie silnika asynchronicznego synchronizowanego silnikiem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim zamiennym montażowo. Silnik LSPMSM posiada zdecydowanie większą sprawność, która jest stała w szerokim zakresie obciążenia. 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 od $0,2$ do $1 M_N$ w pełni zastępuje silnik SAS.

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

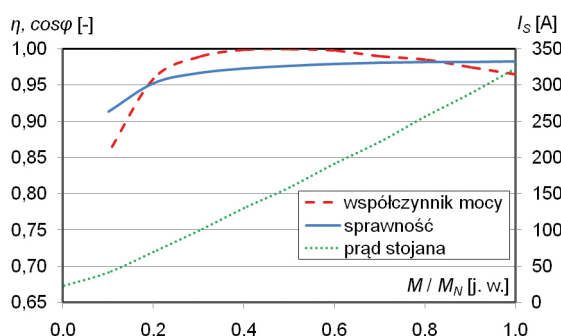
Obudowa zamknięta gwarantuje, że do wnętrza silnika nie przedostanie się niepożądany element, mogący doprowadzić do zwarcia, a tym samym do uszkodzenia. W szczególnych nieprzewidzianych przypadkach zamknięta obudowa chroni maszynę przed zalaniem.

Literatura

- [1] ZAWILAK T., ZAWILAK J.: *Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 3/2016.
- [2] ZAWILAK T., ZAWILAK J.: *Properties and parameters of the synchronous motors with permanent magnets*. „Przegląd Elektrotechniczny” R93, 11/2017.



Rys. 13. Charakterystyka przeciążalności silnika GZM-1612L



Rys. 14. Charakterystyki elektromagnetyczne silnika GZM-1612L

- [3] ZAWILAK T.: *Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie pompy dużej mocy*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2/2015.
- [4] LIPIŃSKI S., ZAWILAK J.: *Energooszczędne silniki elektryczne w napędach pomp wirowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, nr 70, 2014.
- [5] LIPIŃSKI S., ZAWILAK J.: *Analiza stanu ustalonego wymiany ciepła w silniku synchronicznym z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 3/2016.
- [6] ZAWILAK T.: *Utilizing the deep bar effect on Line start of permanent magnet machines*. „Przegląd Elektrotechniczny” R89, 2b/2013.
- [7] IEC 60034-12 Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors.

dr inż. Adam Gozdowiak
 Politechnika Wrocławska
 Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
 e-mail: adam.gozdowiak@pwr.edu.pl

mgr inż. Szymon Lipiński
 Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych Sp. z o.o.
 e-mail: szymon.lipinski@dfme.pl