

Maciej Gwoździewicz, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wrocław

SILNIK SYNCHRONICZNY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM Z INDUKOWANYMI BIEGUNAMI

INDUCED POLE LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Streszczenie: Artykuł przedstawia konstrukcję i wyniki badań eksperymentalnych silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim z indukowanymi biegunami. W zbudowanym modelu fizycznym silnika synchronicznego wykorzystano konstrukcję czterobiegunowego silnika indukcyjnego typu Sh 90L-4. W modelu tym wykonano badania właściwości eksploatacyjnych i rozruchowych.

Abstract: The paper deals with induced pole line start permanent magnet synchronous motor. Built physical motor model is based on the four-pole induction motor Sh 90 L-4. Running and starting properties of the motor were investigated.

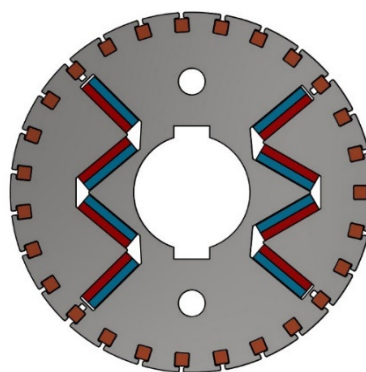
Słowa kluczowe: maszyna elektryczna, silnik synchroniczny, magnesy trwałe, bieguny indukowane
Keywords: electric machine, synchronous motor, permanent magnet, induced pole

1. Wstęp

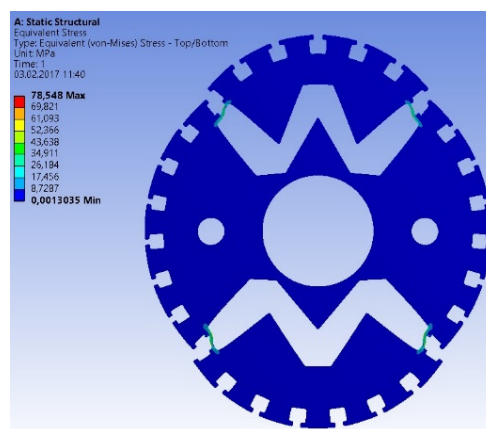
W pracy [1] przedstawiono koncepcję silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z indukowanymi biegunami (z ang. induced pole LSPMSM). W silnikach tego typu magnesy trwałe ułożone są co drugi biegun. Części wirnika nieuzbrojone w magnesy tworzą indukowane bieguny, które powstają przez zamykanie się linii pola magnetycznego od magnesów trwałych. Takie rozwiązanie umożliwia dwukrotne zmniejszenie liczby magnesów, czasu potrzebnego na uzbrojenie wirnika i zmniejszenie czasu wykonania silnika.

2. Konstrukcja wirnika

Na rysunkach 1 i 3 pokazano konstrukcję magnetowodu wirnika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i indukowanymi biegunami. Silnik zbudowano wykorzystując konstrukcję mechaniczną 4-biegunowego silnika indukcyjnego typu Sh 90L-4 o mocy $P_n=1,5$ kW. Magnetowód wirnika wykonano z blachy gatunku M400-50A cięte metodą laserową. Wirnik ma klatkę rozruchową wykonaną z prętów, a pierścienie wycięte z blachy miedzianej również metodą laserową. Do wzbudzenia silnika zastosowano magnesy trwałe typu N45SH. Przed wysuwaniem się poosiowym magnesów zastosowano tarcze miedziane skręcone szpilkami ze stali magnetycznej.



Rys. 1. Przekrój magnetowodu silnika badanego silnika



Rys. 2. Obliczone odkształcenia blachy wirnika od naprężeń mechanicznych dla prędkości $n=3600$ obr/min

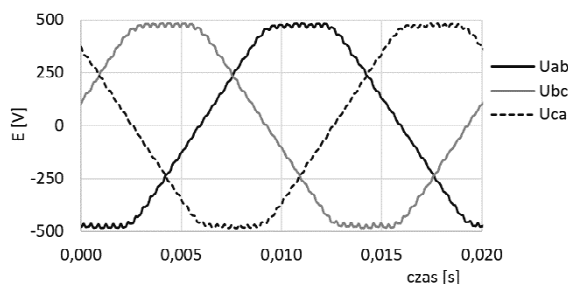
W trakcie projektowania silnika zbadano naprężenia w blasze wirnika celem doboru wysokości szczerbinki między żłobkami na pręty klatki, a żłobkami na magnesy dokonano na podstawie obliczeń występujących naprężeń mechanicznych. Wyniki badań właściwości mechanicznych blachy pokazano na rysunku 2. Na rysunku 3 pokazano widok wirnika w procesie uzbrajania w magnesy trwałe.



Rys. 3. Widok wirnika silnika w czasie instalowania magnesów trwałych

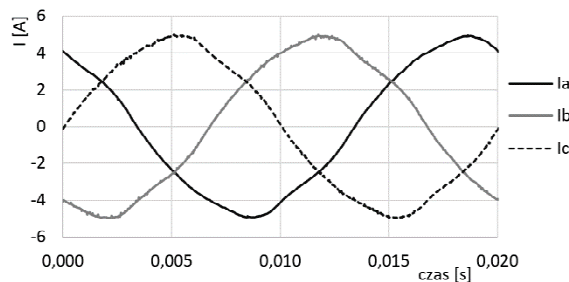
3. Wyniki badań eksperymentalnych

Na rysunku 4 pokazano pomierzone wykresy siły elektromotorycznej silnika w czasie biegu jałowego. W stanie cieplnie ustalonym silnika siła elektromotoryczna od magnesów trwałych wynosi $E_{\text{magn}}=353 \text{ V}=0,88U_n$.



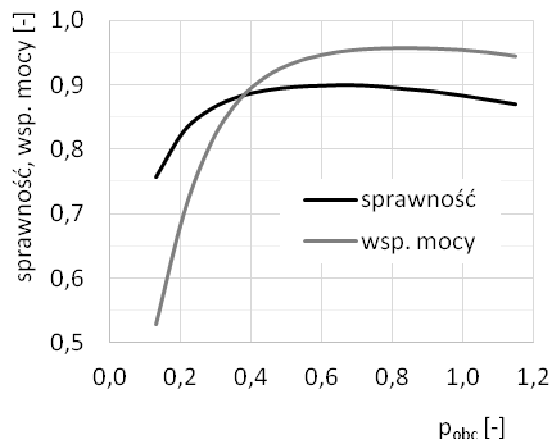
Rys. 4. Przebieg SEM badanego silnika w stanie jałowym

Na rysunku 5 pokazano przebiegi prądów uzwojenia stojana silnika w czasie obciążenia znamionowego. Prądy te są nieznacznie odkształcone z powodu niesinusoidalnego przebiegu sił elektromotorycznych indukowanych od magnesów trwałych.



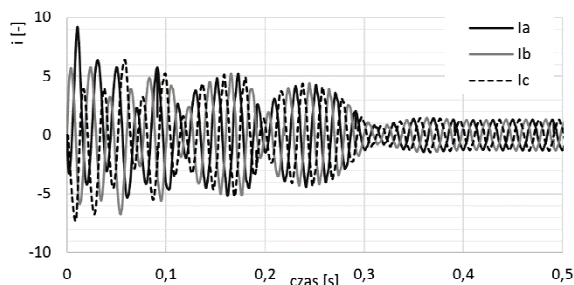
Rys. 5. Przebieg prądów uzwojenia stojana silnika w czasie obciążenia znamionowego

Na rysunku 6 pokazano wykresy sprawności i współczynnika mocy silnika w funkcji obciążenia. Maksymalna sprawność silnika wynosi $\eta_{\text{max}}=90\%$ i występuje w zakresie obciążenia $(0,6-0,7)P_n$. Współczynnik mocy $\cos\varphi>0,95$ występuje w zakresie obciążenia $(0,6-1,1)P_n$. Jest on mniejszy od jedności ze względu na wyraźną różnicę między wartością siły elektromotorycznej od magnesów trwałych a wartością napięcia zasilającego. Znamionowa sprawność silnika wynosi $\eta_n=88,2\%$, zaś znamionowy współczynnik mocy $\cos\varphi_n=0,954$.

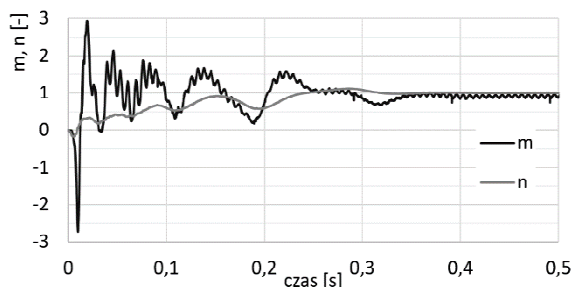


Rys. 6. Wykres sprawności i współczynnika mocy silnika w funkcji obciążenia silnika

Na rysunkach 7 i 8 pokazano przebiegi prądów stojana, prędkości obrotowej i momentu silnika w czasie rozruchu. Podczas badań właściwości rozruchowych silnika wyznaczono maksymalny stały moment obciążenia ($M_{R_{\text{max}}}=0,9M_n$), przy którym możliwy jest udany rozruch i synchronizacja silnika. Bezwładność układu napędowego wynosiła $J_{\text{układ}}=3J_{\text{wirnik}}$ zaś silnik zasilany był napięciem znamionowym $U_n=400 \text{ V } 50 \text{ Hz}$.

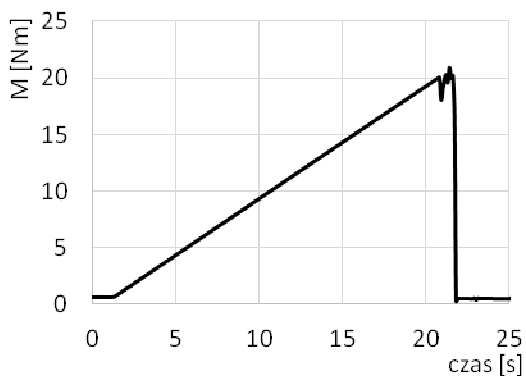


Rys. 8. Przebieg prądów pobieranych z sieci w czasie rozruchu silnika obciążonego stałym momentem 11 Nm



Rys. 9. Przebieg momentu i prędkości w czasie rozruchu silnika obciążonego stałym momentem 11 Nm

Na rysunku 10 pokazano wyniki badania przeciążalności silnika. W czasie wyznaczania momentu maksymalnego silnika zastosowano liniowe zwiększanie obciążenia silnika z narostem obciążenia 1 Nm/1 s. Maksymalny moment silnika jest nieznacznie większy od 20 Nm a przeciążalność wynosi $M_{max}/M_n=1,57$.



Rys. 10. Wykres badania przeciążalności silnika

4. Właściwości silnika przy regulacji częstotliwości napięcia zasilania

Silnik zasilono ze źródła napięcia sinusoidalnego o zmiennej częstotliwości. Zbadano właściwości silnika w I-szej i II-giej strefie regulacji prędkości obrotowej [2].

W I-szej strefie regulacji prędkości obrotowej (strefa stałego momentu) utrzymywano stały

stosunek siły elektromotorycznej do częstotliwości napięcia zasilającego zgodnie ze wzorami (1–3):

$$U = E_n \cdot \frac{f}{f_n} + \Delta U_{R_{stojan}} \quad (1)$$

$$\Delta U_{R_{stojan}} = \sqrt{3} \cdot R_{stojan} \cdot I_n \quad (2)$$

$$E_n = U_n - \Delta U_{R_{stojan}} \quad (3)$$

w których:

U – napięcie zasilania [V],

E_n – znamionowa siła elektromotoryczna uzwojenia stojana [V],

f – częstotliwość napięcia zasilania [Hz],

f_n – częstotliwość znamionowa, $f_n = 50$ Hz,

$\Delta U_{R_{stojan}}$ – spadek napięcia na rezystancji stojana [V],

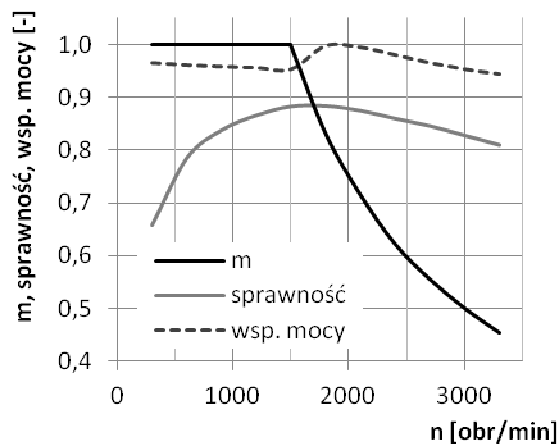
R_{stojan} – rezystancja stojana $R_{stojan} = 5,32 \Omega$,

I_n – prąd znamionowy silnika $I_n = 3,45$ A,

U_n – napięcie znamionowe silnika, $U_n = 400$ V.

W II-giej strefie regulacji prędkości obrotowej (strefa stałej mocy) utrzymywano stałe napięcie zasilania $U=U_n=400$ V.

Na rysunku 11 pokazano wykres sprawności i współczynnika mocy silnika w I-szej i II-giej strefie regulacji prędkości obrotowej. Silnik osiąga maksimum sprawności i współczynnika mocy dla prędkości obrotowej $n \approx 1800$ obr/min. Dla tej prędkości obrotowej zmniejszony strumień silnika równy jest strumieniowi od magnesów trwałych, co skutkuje jednostkowym współczynnikiem mocy silnika. Ze względu na ograniczenia stanowiska pomiarowego nie zwiększano prędkości obrotowej powyżej 3400 obr/min.



Rys. 11. Wykres sprawności i współczynnika mocy silnika w I-szej i II-giej strefie regulacji prędkości obrotowej

5. Podsumowanie

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim z indukowanymi biegunami może stanowić alternatywę dla standardowych konstrukcji silników tego typu [3], [4], [5]. Silnik z indukowanymi biegunami ma dwukrotnie mniejszą liczbę magnesów trwałych, co znacząco przyspiesza proces technologiczny uzbrajania wirnika w magnesy. Masa magnesów jest taka sama jak w silnikach PMSM ze względu na możliwość ich odmagnesowania. Około dwukrotnie większa wysokość magnesów zmniejsza prawdopodobieństwo ich uszkodzenia w trakcie instalowania w wirniku. W tabeli 1 zestawiono porównanie parametrów badanego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi i indukowanymi biegunami z odpowiadającym mu silnikiem indukcyjnym typu Sh 90L-4.

Tabela 1. Porównanie parametrów silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi i indukowanymi biegunami z odpowiadającym mu silnikiem indukcyjnym typu Sh 90L-4

		LSPMSM z indukowanymi biegunami	silnik indukcyjny Sh 90L-4
P_n	kW	2,0	1,5
U_n	V	400	
n_n	obr/min	1500	1410
η_n	%	88,2	79,0
$\cos\varphi_n$	--	0,95	0,78

6. Literatura

- [1]. R. T. Ugale, B. B. Chaudhari, S. Baka, S. S. Dambhare, A. Pramanik, „Induced pole rotor structure for line start permanent magnet synchronous motors”, *IET Electric Power Applications*, Volume: 8, Issue: 4, April 2014.
- [2]. R. Rossa, E. Król, „Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 81, rok 2009
- [3]. T. Zawilak, J. Zawilak, „Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 111, rok 2016
- [4]. M. Gwoździwicz, M. Mikołajczak, „Zastosowanie skosu stojana w jednofazowym silniku synchronicznym z magnesami trwałymi”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 111, rok 2016
- [5]. M. Gwoździwicz, P. Zalas, J. Zawilak, „Starting process of medium power line start permanent magnet synchronous motor”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2, rok 2017

Autorzy

dr inż. Maciej Gwoździwicz – adiunkt w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej
e-mail: maciej.gwozdziwicz@pwr.edu.pl

dr hab. inż. Jan Zawilak – profesor w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej
e-mail: jan.zawilak@pwr.edu.pl

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 400.