

Maciej BOGUMIŁ

BADANIA SILNIKA SZEREGOWEGO BEZKOMUTATOROWEGO DO NAPĘDÓW TRAKCYJNYCH

STRESZCZENIE *Artykuł zawiera wyniki badań laboratoryjnych silnika szeregowego bezkomutatorowego CLSM (Commutatorless Series Motor) ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Przedstawiono parametry i charakterystyki maszyny przy zasilaniu z sieci oraz przy zasilaniu z przekształtnika elektronicznego. Silnik ze sterowaniem tworzy nowatorską konstrukcję napędu elektrycznego trakcyjnego o mocy 5 kW. Konstrukcja projektowanej maszyny opiera się na seryjnym silniku pierścieniowym typu SUDg132M-4B.*

Słowa kluczowe: *silnik synchroniczny, silnik szeregowy bezkomutatorowy*

1. WSTĘP

Silnik bezkomutatorowy szeregowy CLSM (Commutatorless Series Motor) jest przeznaczony do pośredniego napędu pojazdów elektrycznych. Napęd pośredni należy rozumieć analogicznie, jak w przypadku napędu z silnikiem spalinowym, jako centralną jednostkę napędową, która przekazuje moment obrotowy przez przekładnie mechaniczne na koła pojazdu.

Zasilanie silnika jest realizowane przez przekształtnik elektroniczny. Pod względem sposobu sterowania, zasada działania silnika bezkomutatorowego szeregowego jest analogiczna do zasady działania silnika szeregowego prądu stałego. Uzwojenie obwodu wzbudzenia jest połączone w szereg z trójfazowym uzwojeniem twornika tak, że prąd wzbudzenia jest proporcjonalny do składowej czynnej prądu twornika.

dr inż. Maciej BOGUMIŁ
e-mail: m.bogumil@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Maszyn Elektrycznych
ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 263, 2013

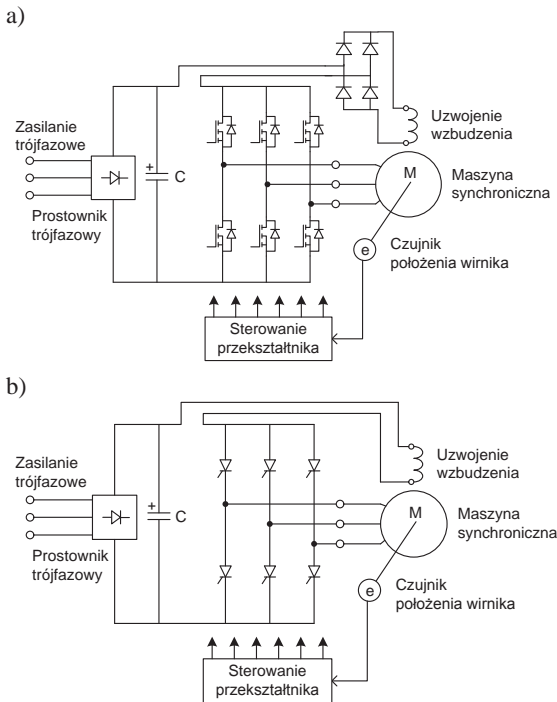
Silnik CLSM należy traktować jako układ elektryczny złożony z:

- trójfazowej maszyny synchronicznej;
- obwodu elektromagnetycznego wzbudzenia maszyny;
- przekształtnika elektronicznego;
- czujników położenia wirnika synchronizującego pracę przekształtnika.

Te cztery elementy konstrukcyjne są w silniku CLSM obecne fizycznie i stanowią zwartą budowę. Już na etapie projektowania konstrukcja maszyny musi być odpowiednio dobrana do budowy przekształtnika elektronicznego, ze względu na szeregowe połączenie uzwojeń wzbudzenia i twornika, a więc bezpośrednią zależność prądu wzbudzenia od obciążenia silnika. Konstrukcja projektowanej maszyny opiera się na seryjnym silniku pierścieniowym typu SUDg132M-4B, w którym trójfazowe uzwojenie wirnika zastąpiono uzwojeniem wzbudzenia, rozłożonym w żłobkach (bieguny utajone), tak, jak w typowej maszynie synchronicznej z wirnikiem cylindrycznym.

Do zastosowań trakcyjnych często stosowany jest silnik szeregowy prądu stałego ze względu na charakterystykę mechaniczną $M = f(n)$. Jednak jego istotną wadą jest obecność mechanicznego komutatora. Takiej niedoskonałości nie ma przedstawiony w tym artykule silnik szeregowy bezkomutatorowy CLSM (Commutatorless Series Motor).

W literaturze światowej opis napędu z silnikiem CLSM można spotkać jedynie u naukowców indyjskich z Indian Institute of Technology w Kharagpur [4-6]. Publikacje te zawierają opis napędu pod kątem sposobu zasilania silnika synchronicznego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym w układzie szeregowym. Przedstawione są różne układy przekształtników elektronicznych (rys. 1a, b) oraz metody ich sterowania.



Uzwojenie wzbudzenia silnika CLSM włączone szeregowo do pośredniczącego obwodu napięcia stałego przekształtnika zapewnia samoczynną regulację prądu wzbudzenia maszyny. Sterowanie silnika CLSM można zrealizować za pomocą przekształtnika z obwodem pośredniczącym prądu stałego lub cyklokonwertera oraz czujnika kąta przesunięcia wirnika (np. czujnika Halla, enkodera). W porównaniu do silnika synchronicznego z klasycznym zasilaniem, silnik CLSM oferuje poprawę stabilności i zachowanie w stanach dynamicznych

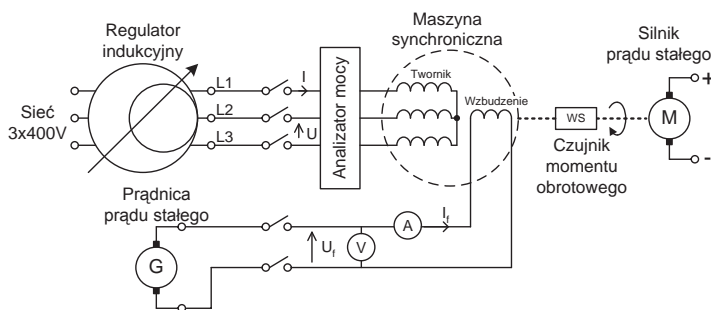
Rys. 1. Schemat elektryczny napędu z bezkomutatorowym silnikiem szeregowym:

- a) tranzystorowy;
b) tyrystorowy

podobne do szeregowego silnika prądu stałego. Natomiast w porównaniu do napędów z silnikiem indukcyjnym, osiąga wyższy współczynnik mocy i sprawność. Ponadto przy pracy z pojemnościowym współczynnikiem mocy możliwa jest tyrystorowa komutacja siły elektromotorycznej. Eliminuje to potrzebę stosowania złożonych i drogich obwodów komutacyjnych, stanowiąc silnik bardziej atrakcyjnym do napędów dużej mocy, jak kompresory, główne linie trakcyjne, magazyny energii z kołem zamachowym etc. [4].

2. WYNIKI BADAŃ

Przedstawione wyniki badań dotyczą głównie maszyny synchronicznej o mocy $P = 5 \text{ kW}$, zasilanej z sieci trójfazowej i wzbudzonej z obcego źródła. Badana maszyna jest przeznaczona do pracy z szeregowym połączeniem uzwojeń twornika i wzbudzenia (rys. 1). Zatem przy pracy znamionowej prąd wzbudzenia jest proporcjonalny do składowej czynnej prądu twornika. Próby obciążenia prądnicy wykonano przy zasilaniu uzwojeń twornika i wzbudzenia z osobnych źródeł napięcia, zachowując jednakowe wartości skuteczne prądów w uzwojeniu wzbudzenia I_f oraz twornika I . Takie parametry pracy przy współczynniku mocy $\cos\varphi = 1$ określają moc maszyny. Badania wykonano klasycznymi metodami opisanymi w literaturze [2, 3]. Układ pomiarowy pokazano na rysunku 2. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.



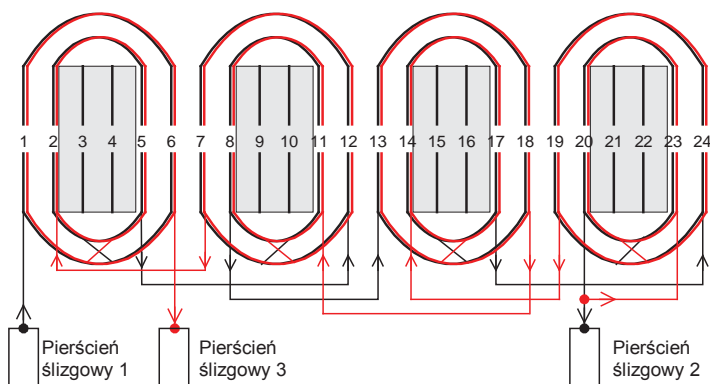
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do badań maszyny synchronicznej

Uzwojenie wzbudzenia składa się z dwóch sekcji połączonych ze sobą szeregowo (rys. 3), a punkt łączenia jest wyprowadzony przez pierścień ślizgowy do skrzynki zaciskowej maszyny. Podział liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia wynosi 9:1 i został wykonany w celu zbadania, przy której liczbie zwojów można osiągnąć większą moc maszyny.

TABELA 1

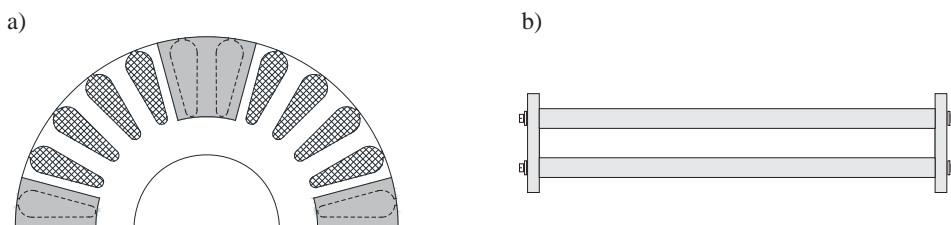
Parametry prądnicy szeregowej przy prędkości synchronicznej $n = 1500 \text{ obr/min}$

Parametr	Wartość		Jednostka
z_w	90	100	%
U	300,2	300,8	V
U_f	20,3	14,6	V
I	8,63	5,73	A
I_f	8,60	5,72	A
P	4498	2982	W
M	30,6	20,1	Nm



Rys. 3. Uzwojenie magnety silnika CLSM

Pozostałe wolne żłobki wypełniono prętami stalowymi ze stali konstrukcyjnej St3, pokrytej lakierem izolacyjnym. Każdą parę prętów przypadającą na biegun zwarto na końcach stalowymi elementami w kształcie wycinków pierścienia, tworząc klatkę rozruchowo-tłumiącą (rys. 4).



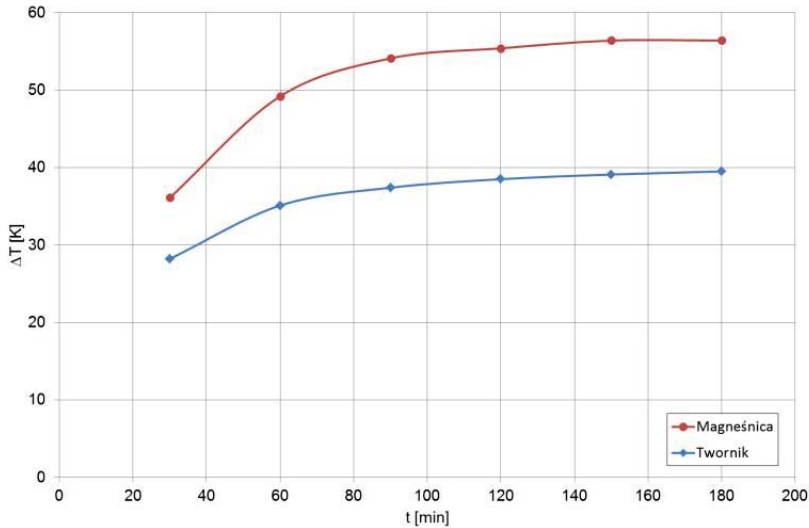
Rys. 4. Klatka rozruchowo tłumiąca silnika CLSM:

a) blacha magnetyczna z wycinkami pierścienia zwierającymi pręty klatki rozruchowo-tłumiącej;
b) pręty klatki rozruchowo-tłumiącej przypadające na biegun, zwarte wycinkami pierścienia

Badania wykazały, że zmniejszenie liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia z_w o 10% pozwala zwiększyć moc oddawaną prądnicy o 50%. Obciążenie prądnicy regulowano tak, aby prąd twornika miał wartość taką samą jak prąd wzbudzenia i jednocześnie regulowano napięcie wzbudzenia tak, aby uzyskać rezystancyjny współczynnik mocy ($\cos \varphi = 1$).

Mniejsza liczba zwojów uzwojenia wzbudzenia pociąga za sobą konieczność zwiększenia prądu w tym uzwojeniu, a więc i prądu w uzwojeniu twornika. Zatem moc oddawana prądnicy będzie większa, niż przy większej liczbie zwojów uzwojenia wzbudzenia i równych wartościach prądów wzbudzenia i twornika. Aby uzyskać odpowiednie zwiększenie prądu wzbudzenia przy współczynniku mocy $\cos \varphi = 1$ i mniejszej liczbie zwojów, należało zwiększyć także napięcie wzbudzenia, co w efekcie spowodowało zwiększenie strat w uzwojeniu wzbudzenia. Ograniczeniem mocy strat w uzwojeniach oraz mocy oddawanej prądnicy był przyrost temperatury uzwojeń na skutek wzrostu strat w uzwojeniach.

Próba nagrzewania silnika obciążonego przyjętą mocą znamionową $P_N = 5 \text{ kW}$ wykazała, że przyrost temperatury uzwojenia twornika nie przekroczył 40 K, zaś przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia nie przekroczył 57 K (rys. 5).



Rys. 5. Przebieg nagrzewania silnika przy obciążeniu znamionowym $P_N = 5 \text{ kW}$

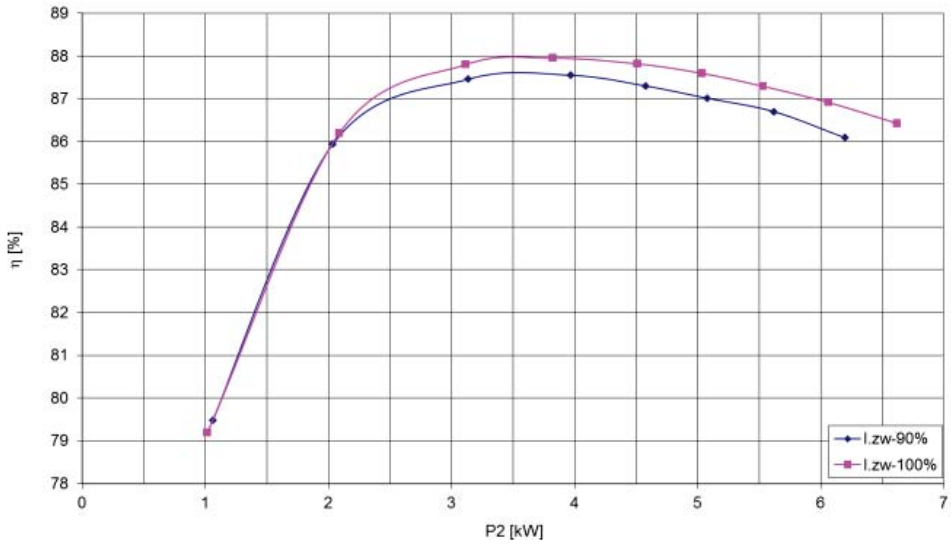
Na podstawie zmierzonych przyrostów temperatur uzwojeń szacuje się, że obciążenie znamionowe silnika można zwiększyć o około 20%. Zwiększenie obciążenia maszyny pogorszyłoby jej przeciążalność u , wyznaczoną z pomiarów na poziomie $u = 1,08$ przy współczynniku mocy $\cos\varphi = 1$, zaś przy $\cos\varphi = 0,8$ przeciążalność wynosiła $u = 1,35$.

Zmniejszenie liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia przy stałym współczynniku mocy $\cos\varphi = 1$ powoduje pogorszenie sprawności silnika. Przeprowadzono badania sprawności silnika ze wzbudzeniem obcym oraz przy dwóch różnych liczbach zwojów uzwojenia wzbudzenia (rys. 6a). Pomiarzy wykonane metodą bezpośrednią wykazały, że największą efektywność $\eta = 88\%$ silnik osiąga przy pełnej liczbie zwojów uzwojenia wzbudzenia $z_w = 100\%$ i mocy na wale $P = 3,5 \text{ kW}$, zaś przy mocy $P = 5 \text{ kW}$ zarejestrowano sprawność $\eta = 87,6\%$. Natomiast przy zmniejszonej liczbie zwojów uzwojenia wzbudzenia $z_w = 90\%$ i mocy na wale $P = 3,5 \text{ kW}$, silnik osiągnął sprawność $\eta = 87,6\%$, zaś przy mocy $P = 5 \text{ kW}$ zarejestrowano sprawność $\eta = 87,0\%$.

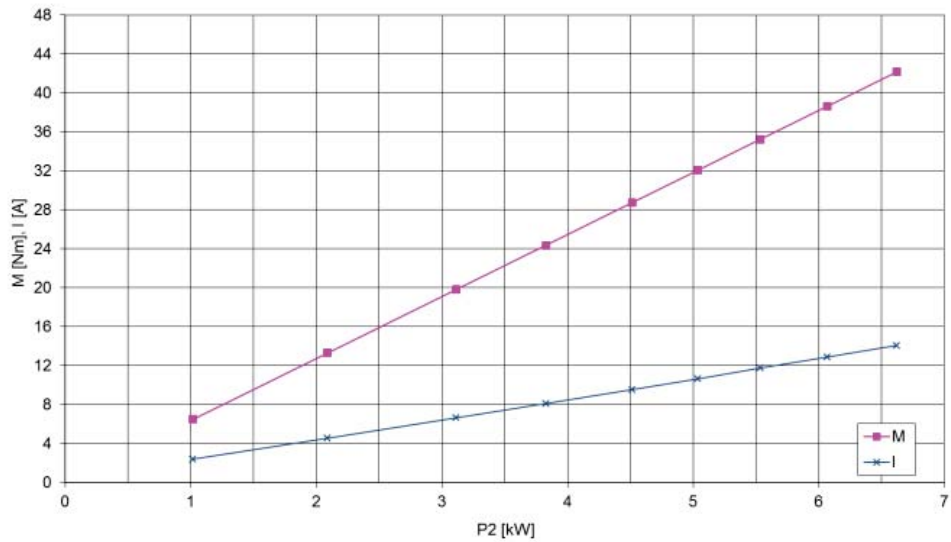
Moment obrotowy mierzony bezpośrednio na wale silnika oraz prąd w uzwojeniu twornika mają przebiegi niezależne od liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia (rys. 6b). Silnik osiąga moment obrotowy $M = 32 \text{ Nm}$, przy mocy $P = 5 \text{ kW}$ i prądzie twornika $I = 10,6 \text{ A}$.

Dodatkowo wyznaczono niektóre reaktancje silnika. Na podstawie charakterystyki biegu jałowego, próby zwarcia oraz zmierzonego punktu D (rys. 7a) z charakterystyki obciążenia przy współczynniku mocy $\cos\varphi = 0$ zbudowano wykres Potiera i wyznaczono reaktancję Potiera X_p .

a)

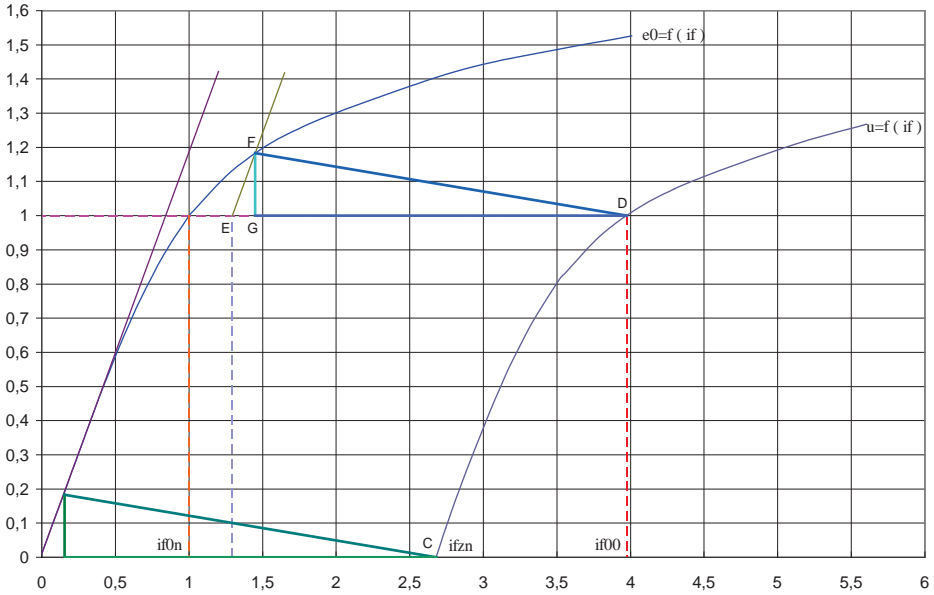


b)

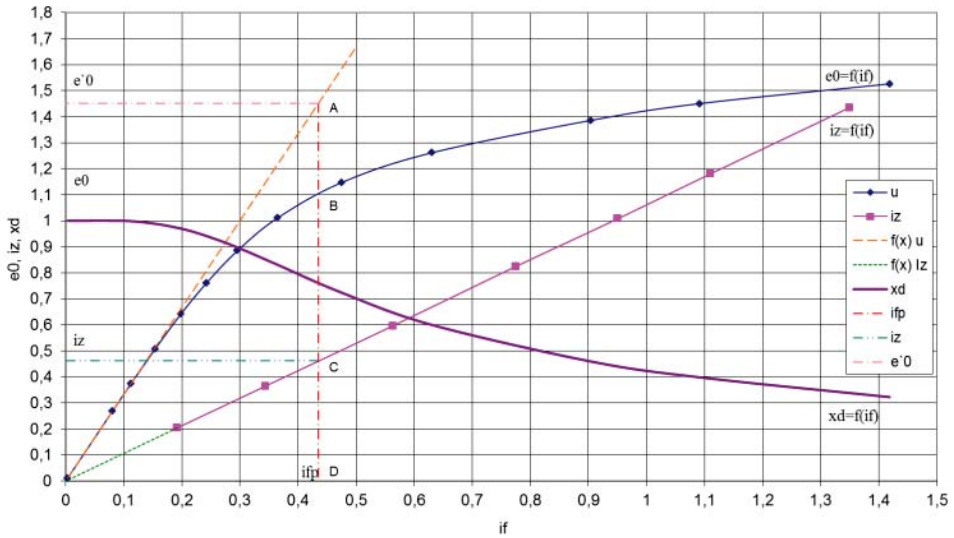


Rys. 6. Charakterystyki silnika przy zasilaniu z sieci:
a) przebieg sprawności;
b) przebieg prądu twornika i momentu obrotowego na wale

a)



b)



Rys. 7. Wyznaczanie reaktancji silnika:

a) wykres Potiera;

b) reaktancja synchroniczna podłużna x_d

Odcinek \overline{ED} określa przepływ wzbudzenia Θ_f przy zwarcu i prądzie twornika $I = I_n$. Bok \overline{GD} jest równy całkowitemu przepływowi twornika Θ_a (przepływ podłużny). Odcinek \overline{EG} określa przepływ wypadkowy Θ_δ według zależności:

$$\overline{EG} = \Theta_\delta = \Theta_f - \Theta_a \quad (1)$$

Przepływ wypadkowy Θ_δ wywołuje wypadkową siłę elektromotoryczną e_x równą odcinkowi \overline{GF} , która w stanie zwarcia jest równa SEM rozproszenia, ponieważ napięcie na zaciskach jest równe zero. Stąd reaktancja Potiera w wartościach względnych jest równa:

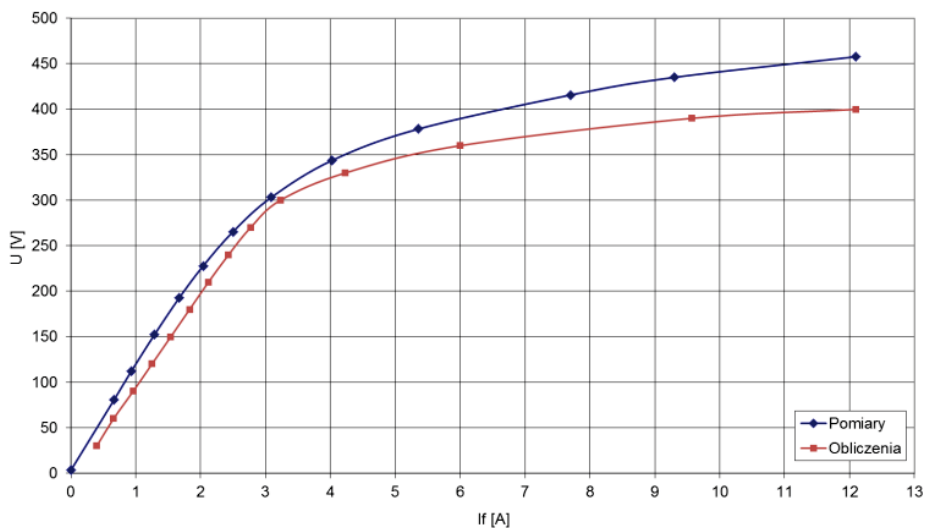
$$x_p = e_x = \overline{GF} = 0,18 \quad (2)$$

oraz w wartościach bezwzględnych:

$$X_p = x_p \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = 2,96 \, \Omega \quad (3)$$

Z charakterystyki biegu jałowego oraz próby zwarcia wykreślono przebieg reaktancji synchronicznej podłużnej (rys. 7b). W stanie nienasyconym reaktancja podłużna wynosiła $X_{dn} = 51,6 \, \Omega$, zaś przy biegu jałowym reaktancja podłużna wynosiła $X_{dp} = 42,9 \, \Omega$.

Badania biegu jałowego prądnicy wykazały różnice w przebiegu charakterystyki magnesowania badanej i obliczeniowej (rys. 8).



Rys. 8. Charakterystyki biegu jałowego przy pracy prądnicowej

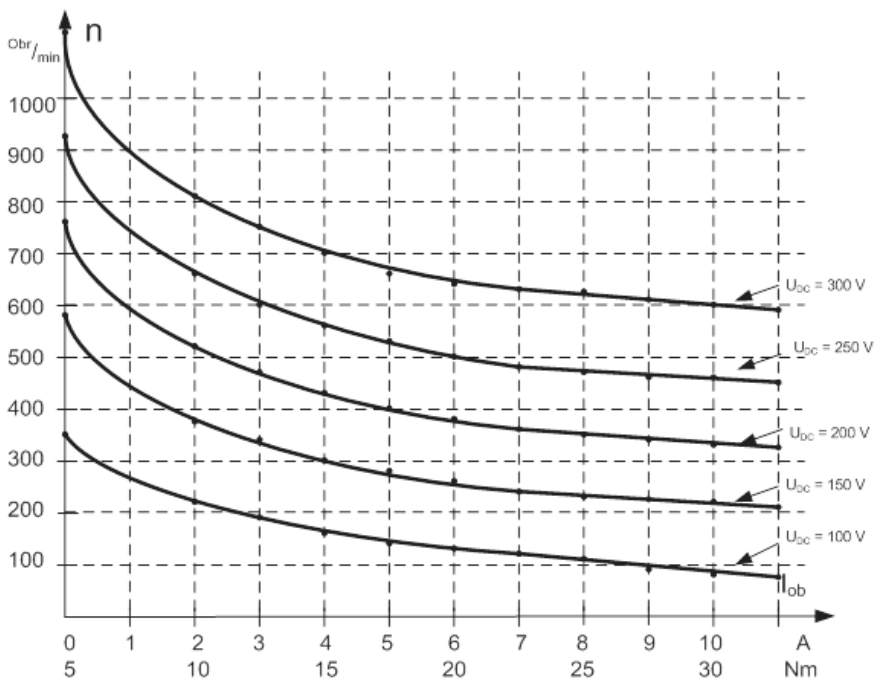
Biorąc pod uwagę SEM twornika w zakresie od zera do napięcia znamionowego $U_N = 300 \text{ V}$, największa różnica między prądem wzbudzenia zmierzonym i policzonym wynosi $\Delta I = 9,3\%$ i występuje przy napięciu indukowanym w uzwojeniu twornika $U = 170 \text{ V}$. Przy wartościach wyższych od napięcia znamionowego różnica pomiędzy charakterystykami biegu jałowego jest rosnąca. Na podstawie rozbieżności pomiędzy prądem wzbudzenia zmierzonym i policzonym zakłada się różnice wartości badanej i obliczeniowej pozostałych parametrów maszyny w granicach do 10%.

Badania całości napędu wykonano w Zakładzie Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki. Szczegółowy opis badań znajduje się w dokumentacji [1]. Silnik CLSM zasilano z przekształtnika tranzystorowego o parametrach:

- napięcie obwodu pośredniczącego regulowane w zakresie: $U_{DC} = 100 - 600 \text{ V}$;
- napięcie wyjściowe regulowane w zakresie: $3 \times 0 - 400 \text{ V}$; $0 - 400 \text{ Hz}$.

Silnik sterowany był napięciem sinusoidalnym, tak jak silnik synchroniczny (sinusoidalny kształt napięcia rotacji).

Charakterystyka mechaniczna rozpatrywanego silnika synchronicznego (rys. 9) jest zbliżona do charakterystyki mechanicznej klasycznego silnika szeregowego prądu stałego. Prędkość obrotowa silnika maleje wraz ze wzrostem momentu obciążającego.



Rys. 9. Charakterystyka mechaniczna napędu z silnikiem CLSM w zależności od napięcia U_{DC} zasilającego przekształtnik

Zależność jest w przybliżeniu proporcjonalna do odwrotności pierwiastka kwadratowego z momentu obciążającego, przy założeniu stałej wartości napięcia zasilania ($U = \text{const}$).

$$\omega \approx \frac{k}{\sqrt{M}} \quad (4)$$

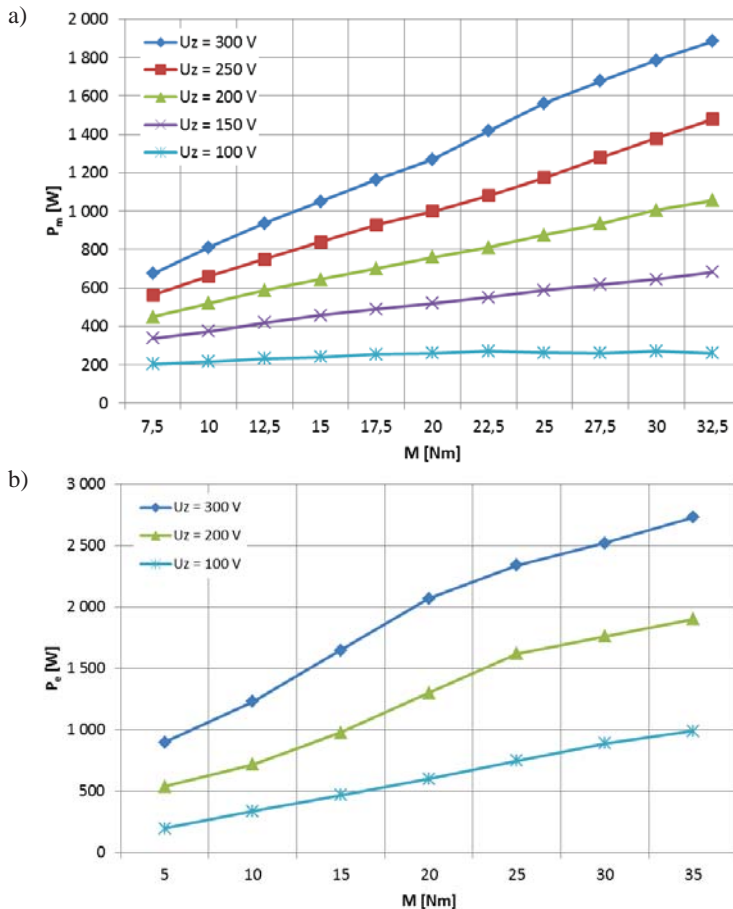
gdzie: k – stała silnika, M – moment obrotowy.

Natomiast moc silnika jest proporcjonalna do napięcia zasilającego i pierwiastka kwadratowego z momentu obciążenia [1]:

$$P_m = \sqrt{\frac{3}{2L_w}} |u| \sqrt{M} \quad (5)$$

gdzie: L_w – indukcyjność uzwojenia wzbudzenia, $|u|$ – moduł amplitudy napięcia.

Zależność (5) jest prawdziwa przy założeniu, że układ falownika pracuje bez modulacji szerokości impulsu (PWM). Wówczas prąd wzbudzenia jest równy prądowi obwodu pośredniczącego oraz amplitudzie prądu fazowego twornika.



Rys. 10. Moc w funkcji momentu obciążenia M i napięcia U_z zasilającego przekształtnik: a) moc mechaniczna P_m na wale silnika; b) moc elektryczna P_e pobierana przez napęd

Charakterystyka mechaniczna samego silnika (rys. 10a) zależy również od napięcia zasilającego i kąta przesunięcia czujników położenia. Przy danym momencie obciążenia osiągnięta przez silnik prędkość obrotowa jest wprost proporcjonalna do napięcia zasilającego i zależna od składowej strumienia indukowanego w uzwojeniach twornika (oddziaływanie twornika). Sprawność całego napędu określona na podstawie badań wstępnych jako stosunek mocy pobieranej przez przekształtnik P_e (rys. 10b) do mocy na wale silnika P_m wynosiła $\eta = 72\%$.

Ze względu na dążenie do minimalizacji gabarytów napędu oraz uproszczenia budowy układów sterowania, zastosowano przekształtnik o stałym stosunku U/f . Zatem przy napięciu znamionowym $U = 300$ V prędkość obrotowa silnika była ograniczona przez indukcyjność uzwojenia wzbudzenia.

LITERATURA

1. Janaszek M., Moradewicz A., Chudzik P., Kwiatkowski K., Miśkiewicz R.: Analiza napędu z silnikiem synchronicznym szeregowym dla pojazdów. Zadanie nr: 500-040000/011. Dokumentacja NNE nr 2134, Nr arch. 14/2012, Warszawa, 2012.
2. Latek W.: Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle, WNT, Warszawa, 1987.
3. Piątek S.: Laboratoryjne badania maszyn elektrycznych, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1975.
4. SenGupta S., Bhadra S.N., Chattopadhyay A.K.: An Inverter-Fed Self-Controlled Commutatorless Series Motor with the Field Winding in the DC Link. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 4, July/August 1997.
5. SenGupta S., Chattopadhyay A.K.: Analysis and performance improvement of a transistorized Commutatorless Series Motor for transit applications. Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives, Conference Publication No. 468, IEE, 1999.
6. SenGupta S., Mukherjee K., Bhattacharya T.K., Chattopadhyay A.K.: Performance of an SCR-Inverter-Based Commutatorless Series Motor with Load Commutation and Unaided Startup Capability. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 4, July/August 2000.

Rękopis dostarczono dnia 15.07.2013 r.

RESEARCH OF THE COMMUTATORLESS SERIES MOTOR TO TRACTION DRIVES

Maciej BOGUMIŁ

ABSTRACT *The article comprises the results of laboratory tastings of Commutatorless Series Motor (CLSM) with electromagnetic excitation. The paper presents parametric and performance of engine powered from the grid and from electronic inverter. The motor with the control are formed*

to be a novel construction of traction electric drive with power 5 KW. The construction of designed motor is based on wound-rotor induction motor SUDg123M-4B type.

Keywords: *synchronous motor, commutatorless series motor*