

## Proces rozruchu silnika synchronicznego dużej mocy

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych procesu rozruchu i synchronizacji silnika synchronicznego dużej mocy o wzbudzeniu elektromagnetycznym i rozruchu bezpośrednim.

**Abstract.** The paper presents the results of numerical research of the startup process and synchronization of high power synchronous motor with electromagnetic excitation and direct starting.  
(Starting process of large power synchronous motor)

**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny, rozruch, synchronizacja, uzwojenie wzbudzenia, moment rozruchowy, moment wpadu  
**Keywords:** synchronous motor, motor start, synchronization, field winding, starting torque, pull-in torque

### Wstęp

W układach napędowych najwyższych mocy z silnikami synchronicznymi o wzbudzeniu elektromagnetycznym najczęściej stosowaną metodą rozruchu jest rozruch asynchroniczny [5, 7]. Ze względu na moc silników napędowych proces rozruchu oraz synchronizacji jest jednym z ważniejszych zagadnień dotyczących ich eksploatacji [6, 9]. W celu łagodzenia procesów rozruchowych tych maszyn mogą być stosowane (jeżeli pozwalają na to warunki rozruchu) rozwiązania analogiczne jak w przypadku typowych silników indukcyjnych klatkowych. Dąży się do ograniczenia prądu pobieranego przez silnik z sieci zasilającej (w celu minimalizacji spadków napięć na transformatorze zasilającym oraz zmniejszenia nagrzewania się silnika podczas rozruchu), łagodzenia udarów w przebiegu momentu rozruchowego [4, 8] oraz wytworzenia odpowiedniego momentu dynamicznego dopasowanego do rzeczywistej charakterystyki obciążenia i dostosowanie jego zmienności (jeśli jest to wymagane) do określonego procesu technologicznego.

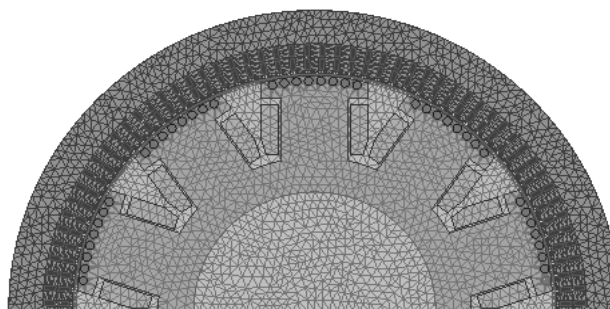
Poprawę właściwości rozruchowych silników synchronicznych o jawno-biegunowej konstrukcji wirnika można uzyskać przez odpowiedni dobór materiałów na pręty klatki rozruchowej. Jednak poprawa właściwości rozruchowych wiąże się z pogorszeniem zdolności do skutecznej synchronizacji silnika po dokonaniu rozruchu asynchronicznego. Kształtowanie tego procesu poprzez odpowiednie sterowanie amplitudą i polaryzacją napięcia wzbudzenia znacząco zwiększa skuteczność tego procesu [11, 12]. Skuteczny niekontrolowany przebieg tego procesu wymaga rozpoczęcia go w warunkach pracy asynchronicznej ustalonej [10].

W artykule przedstawiono wyniki badań procesu rozruchu oraz synchronizacji silnika synchronicznego dużej mocy o wzbudzeniu elektromagnetycznym.

### Opis modelu

Dwuwymiarowy model połowo-obwodowy badanego silnika synchronicznego o wzbudzeniu elektromagnetycznym i rozruchu bezpośrednim zbudowano w programie Maxwell firmy Ansys. Podstawowe parametry analizowanej maszyny to: moc znamionowa  $P_n=1250$  kW, napięcie  $U_{sn}=6000$  V, częstotliwość  $f_n=50$  Hz, wznios wału  $H=760$  mm. W obwodzie wzbudzenia uwzględniono wzbudnicę statyczną z możliwością przewzbudzenia silnika w celu forsowania prądu podczas synchronizacji oraz kompensacji mocy bierniej w warunkach pracy synchronicznej, co stanowi jedną z głównych zalet tego typu konstrukcji. Wirnik posiada klatkę rozruchową umieszczoną w nabiegunniku każdego bieguna. Klatkę stanowi 80 okrągłych prętów zwartych wspólnym

pierścieniem miedzianym. Proces rozruchu i synchronizacji badanego silnika analizowany był dla prętów z brązu typu B4 (CuSn4), B6 (CuSn6), B8 (CuSn8) oraz B12 (CuSn12) i z mosiądzu typu M63 (CuZn37). Fragment magnetowodu silnika stanowiący część połową modelu numerycznego [2] pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Fragment magnetowodu wraz z siatką dyskretyzacyjną badanego silnika synchronicznego:  $P_n=1250$  kW,  $2p=10$

### Badanie procesu rozruchu i synchronizacji

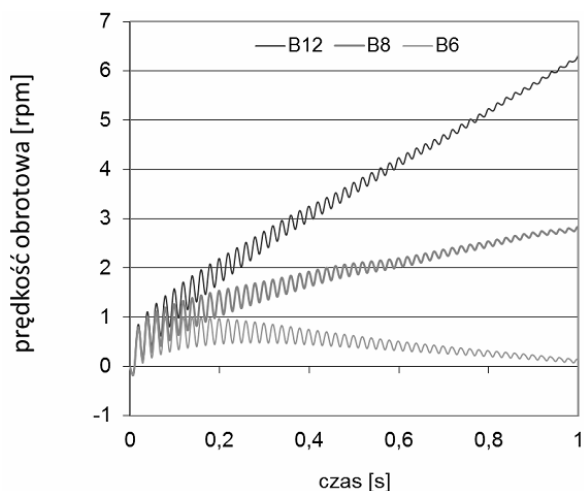
Zbadano wpływ materiału na pręty klatki rozruchowej na proces rozruchu i wartość momentu rozruchowego  $m_r$  badanej konstrukcji silnika synchronicznego dużej mocy. Moment rozruchowy wyznaczono jako moment asynchroniczny dla poślizgu  $s=1$  i napięcia znamionowego  $U_{sn}$ . Różne wartości momentów rozruchowych zostały osiągnięte przez zastosowanie różnych materiałów w klatce wirnika – brązy: B4 ( $\gamma=11,8$  MS/m), B6 ( $\gamma=9,0$  MS/m), B8 ( $\gamma=7,5$  MS/m) i B12 ( $\gamma=6,2$  MS/m) oraz mosiądz: M63 ( $\gamma=15$  MS/m). Wartości względne momentów rozruchowych odniesione do momentu znamionowego silnika zestawiono w tabeli 1. Przykładowy udany i nieudany rozruch badanego silnika synchronicznego pokazano na rysunku 2. Założono znamionowy moment obciążenia o charakterystyce stałej  $T_{load}=\text{const}$  oraz wypadkowy moment bezwładności układu napędowego 10-cio krotnie większy od momentu inercji wirnika silnika napędowego.

Tabela 1. Moment rozruchowy badanego silnika:  $P_n=1250$  kW,  $2p=10$

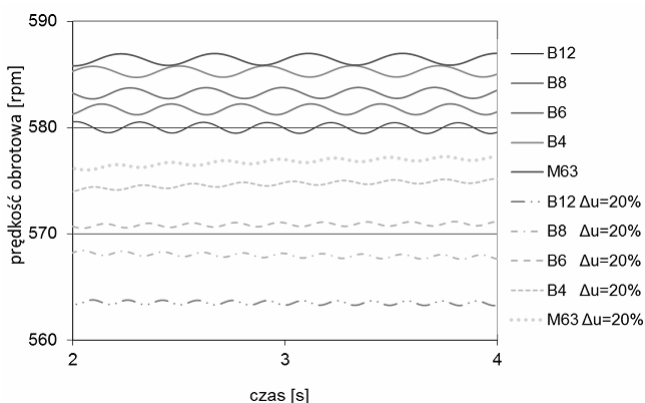
materiał klatki	B12	B8	B6	B4	M63
$m_r$ [-]	1,16	1,05	0,97	0,86	0,8

Zbadano wpływ materiału na pręty klatki rozruchowej na wartość poślizgu na jakim się ustala praca asynchroniczna badanego silnika po dokonaniu rozruchu. Założono znamionowy moment obciążenia o charakterystyce wentylatorowej oraz wypadkowy moment bezwładności

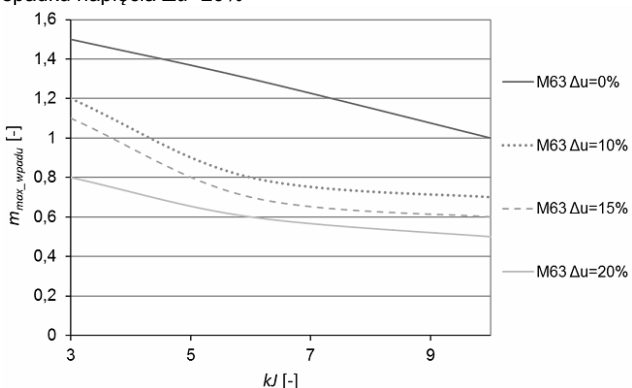
układu napędowego 10-cio krotnie większy od momentu inercji wirnika silnika napędowego. Wyniki badań, w których uwzględniono napięcie znamionowe  $U_{sn}$  oraz spadek napięcia  $\Delta u = 20\%$  występujące w trakcie rozruchu, pokazano na rysunku 3.



Rys.2. Przebiegi prędkości obrotowej w początkowym etapie rozruchu badanego silnika dla momentu obciążenia  $T_{load} = T_n$  o stałej charakterystyce, znamionowego napięcia zasilania  $U_{sn}$  i prętów klatki wirnika z brązu B6, B8 i B12



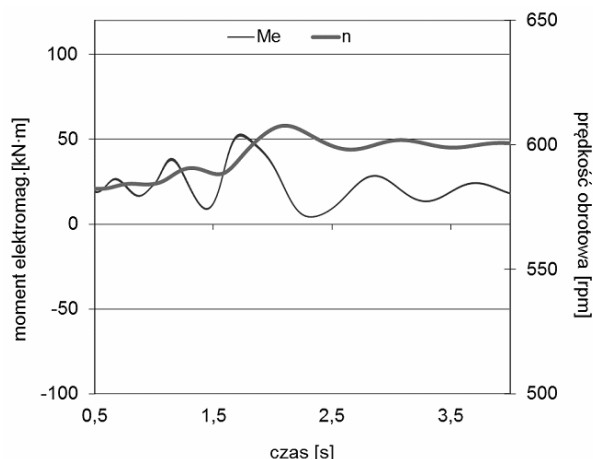
Rys.3. Wpływ materiału klatki rozruchowej na wartość poślizgu silnika w stanie asynchronicznym ustalonym dla napięcia  $U_{sn}$  oraz spadku napięcia  $\Delta u = 20\%$



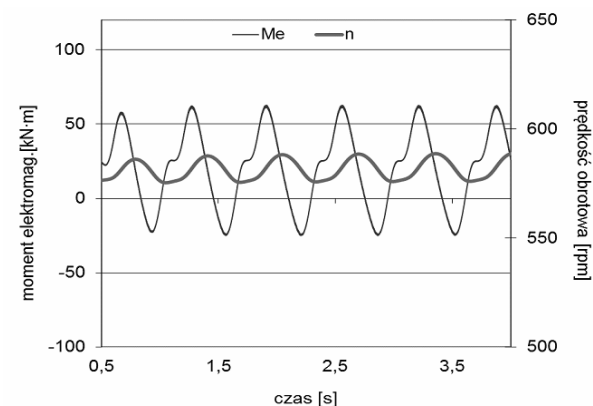
Rys.4. Wpływ względnego momentu bezwładności  $kJ$  na maksymalny moment wpadu badanego silnika: materiał klatki wirnika-mosiądz M63, spadek napięcia w trakcie rozruchu  $\Delta u = 0\% + 20\%$

Zbadano wpływ spadku napięcia w trakcie rozruchu  $\Delta u$ , względnego momentu bezwładności układu napędowego  $kJ$  oraz momentu obciążenia o charakterystyce wentylatorowej na proces synchronizacji badanego silnika dla wybranego materiału na pręty klatki rozruchowej. Wyznaczono

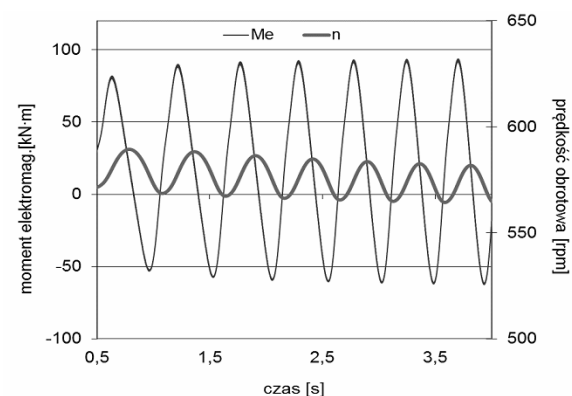
maksymalne wartości momentu wpadu  $m_{max\_wpadu}$ , zdefiniowanego jako największy moment obciążenia, przy którym jest możliwa skuteczna synchronizacja silnika dla założonych: względnego momentu bezwładności układu napędowego z badanym silnikiem  $kJ$ , spadku napięcia w trakcie rozruchu  $\Delta u$  i znamionowej wartości napięcia zasilającego obwód wzbudzenia. Wyznaczono również znamionową wartość momentu wpadu  $m_{n\_wpadu}$  dla różnych materiałów klatki rozruchowej. Wielkość tę określono jako moment asynchroniczny silnika, dla poślizgu  $s = 0,5\%$ . Wyniki badań przedstawiono na rysunku 4 oraz w tabeli 2. Przykładowe przebiegi prędkości oraz momentu elektromagnetycznego silnika w trakcie udanej i nieudanej synchronizacji pokazano na rysunkach 5-7.



Rys.5. Przebiegi momentu elektromagnetycznego oraz prędkości podczas udanej synchronizacji silnika



Rys.6. Przebiegi momentu elektromagnetycznego oraz prędkości podczas nieudanej synchronizacji silnika: znamionowe napięcie wzbudzenia



Rys.7. Przebiegi momentu elektromagnetycznego oraz prędkości podczas nieudanej synchronizacji silnika: forsowanie prądu wzbudzenia

Tabela 2. Znamionowa wartość momentu wpadu badanego silnika:  
 $P_n=1250$  kW,  $2p=10$

materiał klatki	B12	B8	B6	B4	M63
$m_n$ wpadu [-]	0,83	0,93	1,03	1,21	1,28

Miarodajne ilościowe określenie wpływu zastosowanych materiałów na pręty klatki rozruchowej, a tym samym uzyskanie różnej wartości znamionowego momentu wpadu oraz uwzględnienie spadków napięcia  $\Delta u$  podczas rozruchu, krotności momentu bezwładności układu napędowego oraz momentu obciążania na skuteczność procesu synchronizacji badanego silnika może być wyznaczone jedynie, gdy każdorazowo proces załączenia napięcia wzbudzenia będzie realizowany w warunkach asynchronicznych ustalonych (rysunek 5) [1, 3]. Rozpoczęcie procesu synchronizacji w warunkach pracy asynchronicznej nieustalonej, mimo identycznych warunków pracy i zasilania silnika, powoduje nieskuteczny przebiegiem procesu (rysunek 6). Zwiększenie napięcia wzbudzenia (forsowanie prądu) w tych warunkach (rysunek 7) wywołuje dodatkowy moment hamujący utrudniający skuteczną synchronizację. Fakt ten znacząco komplikuje badanie tego procesu oraz istotnie wydłuża czas obliczeń. Zagadnienie to będzie analizowane w dalszych badaniach nad synchronizacją silników synchronicznych o wzbudzeniu elektromagnetycznym i rozruchu bezpośrednim.

#### Podsumowanie

Odpowiedni dobór materiałów na pręty klatki rozruchowej zapewni poprawę właściwości rozruchowych i udany rozruch silnika obciążonego stałym momentem o wartości ponad znamionowej. Uzyskanie równocześnie udanego startu oraz synchronizacji silnika wymaga kształtowania przebiegu tego procesu od strony obwodu wzbudzenia silnika [10-12]. Skuteczny przebieg procesu synchronizacji dla znamionowej, stałej wartości napięcia wzbudzenia wymaga rozpoczęcia procesu po ustaleniu się asynchronicznego stanu pracy silnika

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

#### Autorzy:

dr inż. Paweł Zalas, e-mail: [pawel.zalas@pwr.edu.pl](mailto:pawel.zalas@pwr.edu.pl), dr inż. Maciej Gwoździwicz, e-mail: [maciej.gwozdziwicz@pwr.edu.pl](mailto:maciej.gwozdziwicz@pwr.edu.pl), prof. Jan Zawilak, e-mail: [jan.zawilak@pwr.edu.pl](mailto:jan.zawilak@pwr.edu.pl), Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

#### LITERATURA

- [1] Cundev M. D., Petkovska L. B., and Popnikolova-Radevska M., Solid salient pole synchronous motor analysis, in *Proc. MELECON, May 18–20, 1998*, vol. 2, pp. 1140–1144
- [2] Mi, Chunting Chris; Li, Yongbin; Karmaker, Haran, Modeling of the Starting Performance of Large Solid-Pole Synchronous Motors Using Equivalent Circuit Approach, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume.45, Issue.12, pp.5399, 2009
- [3] Karmaker H. and Mi C., Improving the starting performance of large salient-pole synchronous machines, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 4, pp. 1920-1928, 2004
- [4] Li, Yongbin; Mi, Chris; Karmaker, Haran, Modeling of the Starting Performance of Large Solid-pole Synchronous Motors Using Equivalent Circuit Approach, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp. 1 – 6
- [5] Li, Y. B.; Ho, S. L.; Fu, W. N.; Liu, W. Y. An Interpolative Finite-Element Modeling and the Starting Process Simulation of a Large Solid Pole Synchronous Machine, *Magnetics, IEEE Transactions on*, pp. 4605-4608, Volume: 45, Issue: 10, Oct. 2009
- [6] Neumayer, F.; Schlemmer, E.; Ramsauer, F., Finite element analysis of the starting behaviour of large salient pole machines, *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on*, pp. 164 – 169
- [7] Popnikolova-Radevska M., *Solid salient pole synchronous motor analysis*, Proc. MELECON, vol. 2, pp. 1140-1144, 1998
- [8] Preston T. W., Timothy M. A., and Sitzia A. M., 3-dimensional evaluation of the end parameters of large solid salient pole synchronous machines, in *Proc. 9th Int. Conf. Electr. Mach. Drives, Sep. 1–3, 1999*, pp. 100–104
- [9] Silva S. M., Cardoso Filho B. J., Murta M., Cardoso G. and Rocha Braga M., Blower drive system based on synchronous motor with solid salient-pole rotor: Performance under starting and voltage sag conditions, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 1429-1435, 2003
- [10] Widger G. F. T. and Adkins B., Starting performance of synchronous motors with solid salient poles, *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 115, pp. 1471, 1968
- [11] Zalas P., Zawilak J., Gentle synchronization of two-speed synchronous motor with asynchronous starting, *Electrical Engineering (Berlin). 2012, vol. 94, nr 3*, pp. 155-163
- [12] Zalas P., Zawilak J.: Wpływ przemiennego napięcia wzbudzenia na synchronizację dwubiegowego silnika synchronicznego, *Rytm 26-28.05.2010, Katowice, BOBRME Komel 2010, nr 85*, pp. 13–16
- [13] Zalas P., Zawilak J., Synchronizacja silników synchronicznych napięciem przemiennym, *SME 2008, Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 62, Studia i Mat. nr 28, 2008*, pp. 542-548