

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

WPLYW POŚLIZGU NA PROCES SYNCHRONIZACJI SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z PRĘDKOŚCI NADSYNCHRONICZNEJ

THE INFLUENCE OF SLIP ON THE SYNCHRONIZATION PROCESS OF SYNCHRONOUS MOTOR OUT OF OVER SYNCHRONOUS SPEED

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wpływu poślizgu na proces synchronizacji z prędkości nadsynchronicznej dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy o przełączalnych uzwojeniach stojana i wirnika. Analizowane są procesy realizowane od strony sieci zasilającej stojan oraz od strony magneśnicy. Numeryczną analizę procesu zmiany prędkości wirowania i synchronizacji przeprowadzono wykorzystując opracowany i zweryfikowany pomiarowo polowo-obwodowy model silnika.

Abstract: The paper presents an analysis of the influence of slip on the synchronization process of two speed, high power synchronous motor with switchable armature and field magnet windings out of over synchronous speed. The synchronization processes from the stator supply voltage side and from the field magnet windings side were also analyzed. Numerical analysis of the process of changing the rotational speed and synchronization was performed using a specially developed (and validated by measurements) field-circuit model of the motor.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silnik synchroniczny, synchronizacja, obliczenia MES, bieguny wydane, silnik dwubiegowy

Keywords: electrical machines, synchronous motor, synchronization, FEM calculation, salient poles, two-speed motor

1. Wstęp

Łagodna synchronizacja dwubiegowych silników synchronicznych dużej mocy o wzbudzeniu elektromagnetycznym [2, 8] oraz silników wzbudzanych magnesami trwałymi [1] o rozruchu dwustopniowym i jednej dedykowanej prędkości znamionowej może być realizowana z prędkości nadsynchronicznej [5], podczas zmiany prędkości wirowania z większej na mniejszą. Przy znaczącej wartości momentu obciążenia silnika, wynikającej np. z uszkodzenia elementów mechanicznych odpowiedzialnych za sterowanie przepływem powietrza w napędach wentylatorów głównych kopalni głębinowych, synchronizacja z prędkości nadsynchronicznej okazuje się jedyną metodą na skuteczny przebieg tego procesu [5]. W przypadku silników o wzbudzeniu elektromagnetycznym proces synchronizacji z prędkości nadsynchronicznej może być realizowany od strony magneśnicy lub sieci zasilającej stojan. Dla metody klasycznej najkorzystniejszymi warunkami do skutecznego przebiegu tego procesu są: jednoczesne osiągnięcie mniejszej prędkości synchronicznej oraz współfazowość pól stojana i wirnika. W przypadku synchronizacji od stro-

ny sieci zasilającej stojan wzbudzonej maszyny to również: osiągnięcie mniejszej prędkości synchronicznej i możliwość kontrolowanego załączenia napięć zasilających stojan. Spełnienie jednocześnie obu warunków łagodnej synchronizacji zaproponowanymi metodami jest w praktyce jednak bardzo trudne do osiągnięcia. Brak ustalonego stanu pracy w procesie synchronizacji z prędkości nadsynchronicznej utrudnia sterowanie przebiegiem tego procesu i kształtowanie stanów przejściowych.

W artykule przedstawiono analizę wpływu poślizgu na proces synchronizacji z prędkości nadsynchronicznej dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy o przełączalnych uzwojeniach stojana i wirnika [8], realizowany od strony sieci zasilającej stojan oraz od strony magneśnicy.

2. Numeryczna analiza procesu

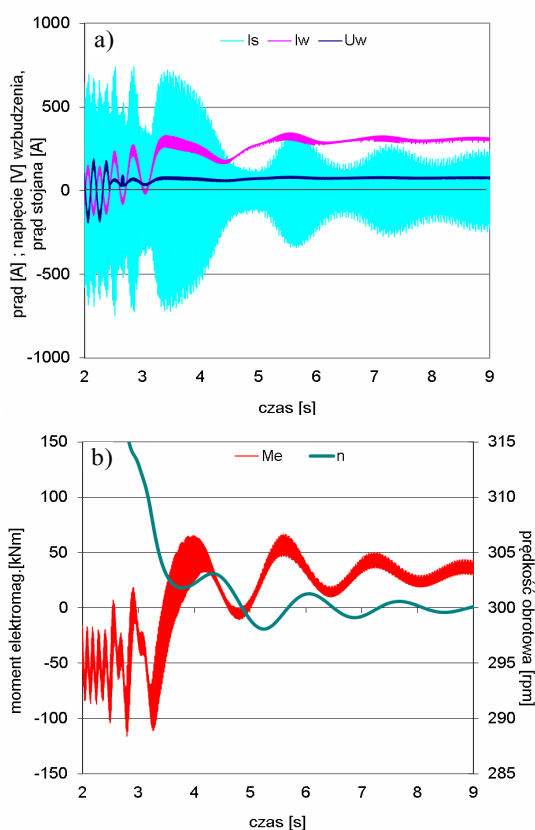
W celu analizy wpływu wartości poślizgu silnika w chwili inicjacji procesu synchronizacji, realizowanego z prędkości nadsynchronicznej, na jego przebieg oraz skuteczność wykonano numeryczne obliczenia tego procesu, wykorzy-

stując opracowany dwuwymiarowy, polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy typu GAe 1716/20t [4]. Podstawowe parametry badanego silnika pokazano w tabeli 1. Model obliczeniowy został zweryfikowany na podstawie pomiarów rzeczywistego silnika pracującego w napędzie wentylatora WPK 5.3 Zakładu Górniczego [4].

Tabela 1

Dane znamionowe dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t

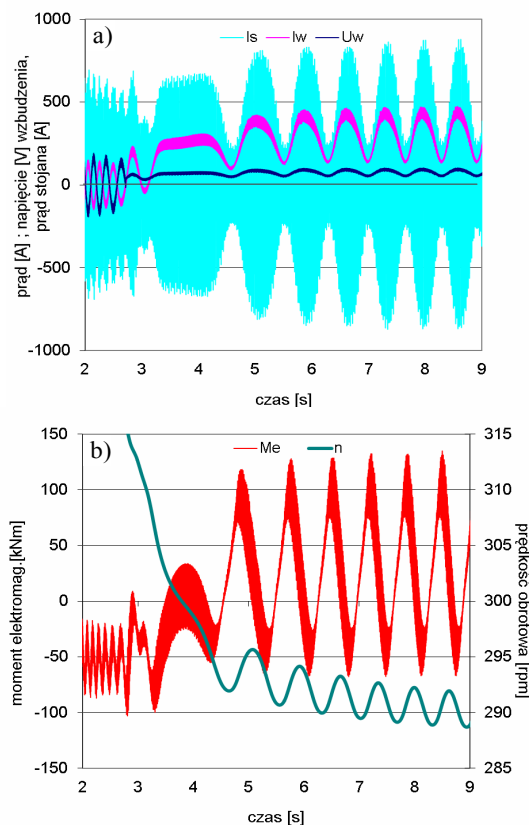
moc znamionowa	kW	2600	1200
napięcie stojana	V	6000 YY	6000 Y
prąd stojana	A	292	186
napięcie wzbudzenia	V	86	78
prąd wzbudzenia	A	337	300
prędkość obrotowa	obr/min	375	300
współczynnik mocy	-	0,9 poj.	0,77 ind.
sprawność	%	95,5	81,0



Rys. 1. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 323$ obr/min, $p=10$

Na rysunkach 1, 2 pokazano obliczone przebiegi czasowe prądu stojana I_s , prądu wzbudzenia I_w , napięcia U_w na zaciskach uzwojenia

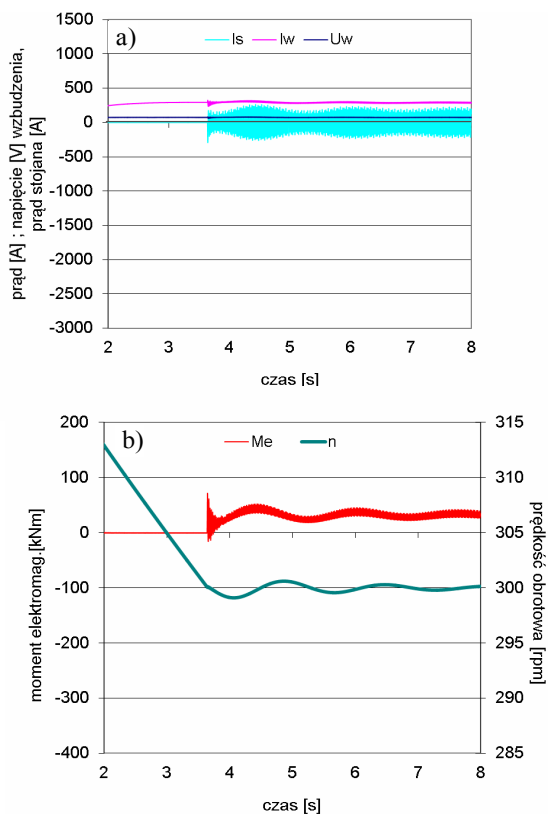
wzbudzenia (a), prędkości obrotowej oraz momentu elektromagnetycznego (b) podczas procesów synchronizacji badanego silnika z prędkości nadsynchronicznej do mniejszej prędkości obrotowej ($p=10$), realizowanych od strony magnesu. W obliczeniach przyjęto znamionową wartość napięcia wzbudzenia oraz uwzględniono wypadkowy moment bezwładności układu napędowego wentylatora $J_z \approx 40000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Przyjęto również moment obciążenia o wartości $0,8 M_n$, co odpowiada obciążeniu, jakie stanowi wentylator typu WPK 5.3 bez dławienia przepływu powietrza [4, 5]. W obu procesach (rys. 1a, 2a) załączenie napięcia stałego do uzwojeń magnesu było realizowane dla kąta $\delta = 0^\circ$, w odstępie jednego pełnego obrotu elektrycznego, gdzie δ jest kątem między osią pola stojana, a osią pola wirnika.



Rys. 2. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 317$ obr/min, $p=10$

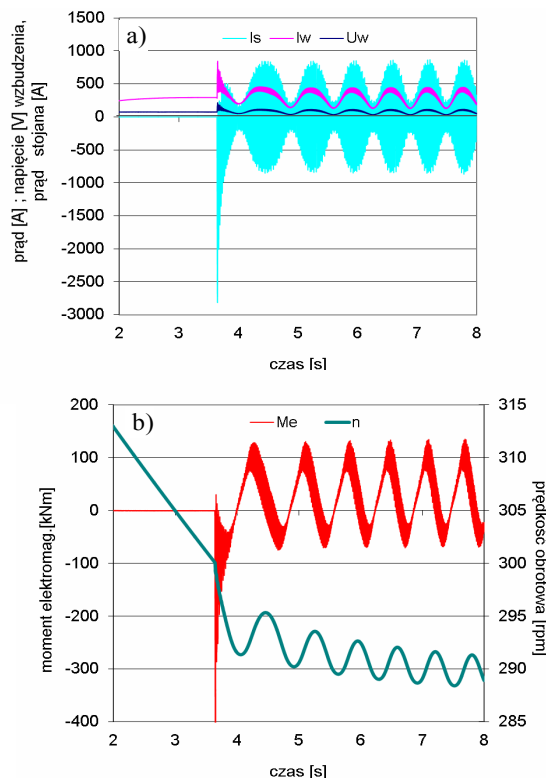
Na podstawie analizy wyników wykonanych obliczeń stwierdzono, że pomimo załączenia napięcia wzbudzenia w korzystnych warunkach tak, aby wartość prądu wywołanego załączeniem napięcia stałego (rys. 1a, 2a) wspomagała wartość prądu płynącego w zwartym uzwojeniu wzbudzenia wywołanego składową

przebiegi napięcia indukowanego w tym uzwojeniu [3], proces przebiega w sposób przypadkowy, losowo wpływając na poprawność procesu. O skuteczności synchronizacji zdecydowanie nie chwila załączenia napięcia wzbudzenia, ale wzajemne położenie biegunów pola stojana (rys. 1b, 2b) względem biegunów pola wirnika w chwili osiągnięcia prędkości synchronicznej.

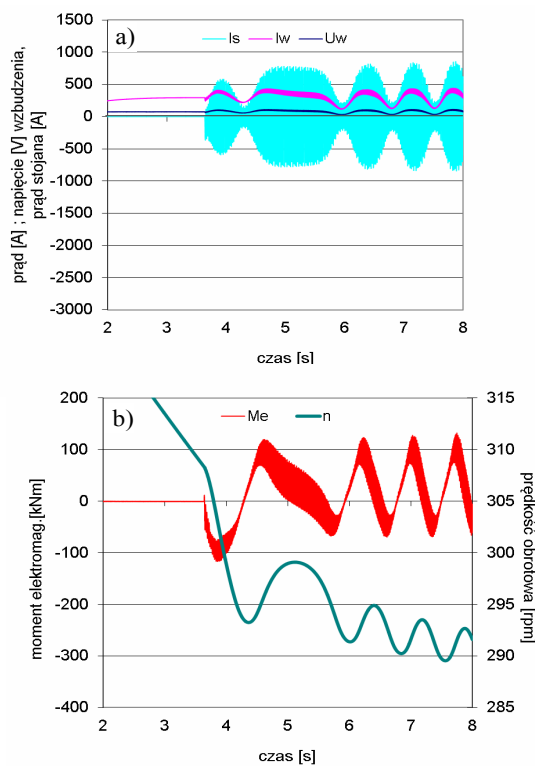


Rys. 3. Przebiegi czasowe wielkości podczas nieprzypadkowej synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 300$ obr/min , $p=10$

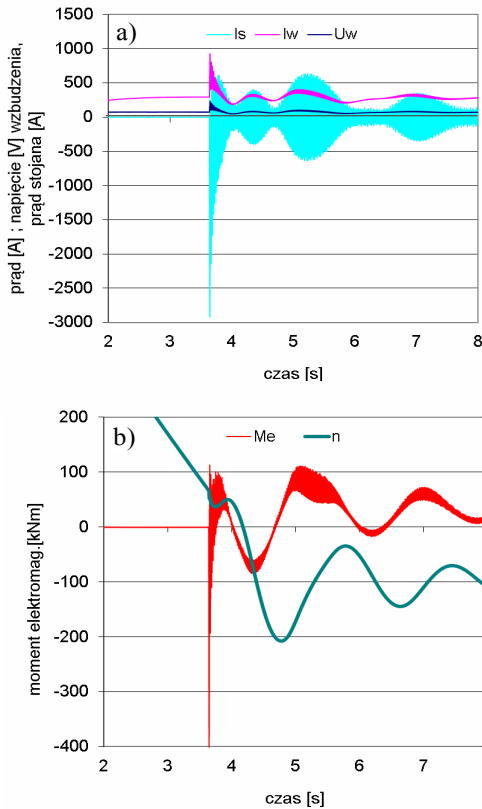
Na rysunkach 3 - 8 pokazano wyniki obliczeń obserwowanych wielkości podczas procesów synchronizacji realizowanych poprzez załączenie napięć zasilających stojan wzbudzonej maszyny dla różnych wartości chwilowych prędkości obrotowych silnika. Obliczenia wykonano dla przyjętych wcześniej warunków pracy układu napędowego wentylatora oraz uwzględniono napięcie wzbudzenia o wartości znamionowej, załączane w warunkach pracy nad synchronicznej, po przełączeniu uzwojeń silnika do pracy z większą liczbą par biegunów. Załączenie napięć zasilających stojan zostało w obliczeniach przyjęte dla prędkości $n \approx 300$ obr/min, $n \approx 308$ obr/min oraz dla $n \approx 316$ obr/min.



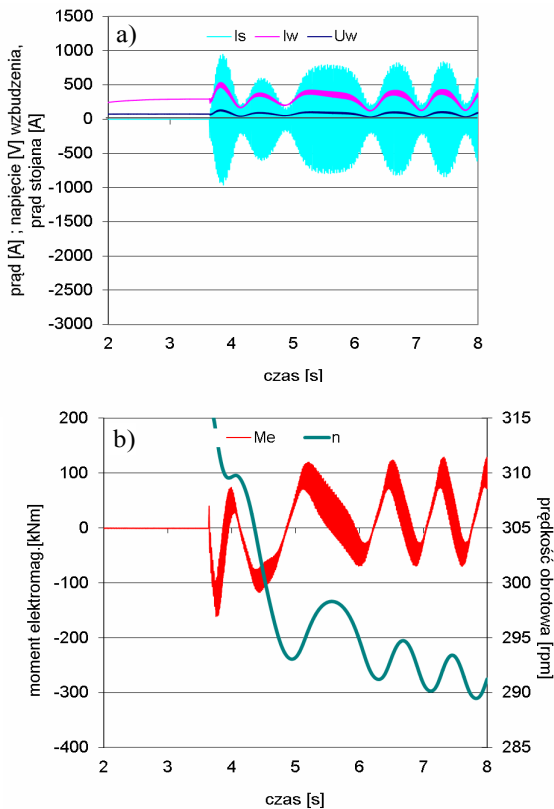
Rys. 4. Przebiegi czasowe wielkości podczas przypadkowej synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 300$ obr/min , $p=10$



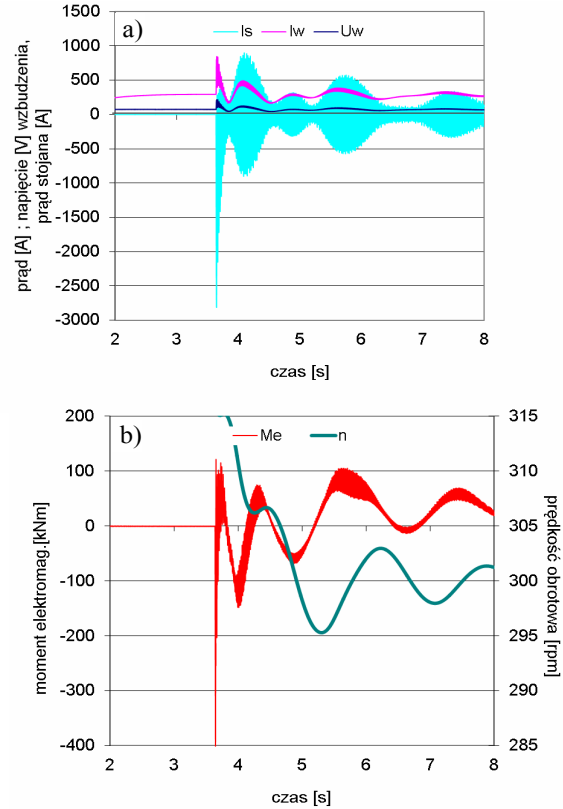
Rys. 5. Przebiegi czasowe wielkości podczas nieprzypadkowej synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 308$ obr/min , $p=10$



Rys. 6. Przebiegi czasowe wielkości podczas przypadkowej synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 308$ obr/min, $p=10$



Rys. 7. Przebiegi czasowe wielkości podczas nieprzypadkowej synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 316$ obr/min, $p=10$



Rys. 8. Przebiegi czasowe wielkości podczas przypadkowej synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 316$ obr/min, $p=10$

Procesy załączania znamionowej wartości napięć zasilających stojan podczas obliczeń były realizowane w sposób (rys. 3, 5, 7) kontrolowany, minimalizując udary prądów oraz momentu elektromagnetycznego w chwili inicjacji procesu oraz w sposób niekontrolowany, przypadkowy (rys. 4, 6, 8).

Proces synchronizacji zaproponowaną metodą, realizowany prawidłowo, poprzez kontrolowane załączenie napięć zasilających stojan dla małej wartości poślizgu silnika może przebiegać w sposób łagodny i skuteczny, znacząco skracając czas trwania stanów przejściowych (rys. 3) oraz łagodząc udary prądów i momentu silnika. Synchronizacja silnika przebiega łagodniej (rys. 3) niż ma to miejsce podczas zastosowania klasycznych metod realizacji tego procesu [4, 5]. Dla większych wartości poślizgu silnika kontrolowane załączenie napięć stojana w warunkach nadsynchronicznych nie jest wystarczającym warunkiem skutecznego przebiegu procesu (rys. 5, 7). Pomimo ograniczenia niekorzystnych stanów przejściowych w chwili rozpoczęcia procesu (rys. 5, 7), może on przebiegać nieskutecznie. Istoty wpływ na przebiegi analizowanych procesów ma składowa przemienna napięcia indukowana w uzwojeniu wzbudzenia

w stanie pracy nadsynchronicznej. Wywołuje ona moment hamujący oraz ogranicza wypadkową wartość prądu wzbudzenia, co znacząco wpływa na wartość momentu synchronizującego w chwili osiągnięcia przez silnik prędkości synchronicznej. Takie zjawisko nie będzie utrudniać procesu synchronizacji silników wzbudzanych magnesami trwałymi o rozruchu dwustopniowym. Można się spodziewać w tym przypadku, że skuteczność zaproponowanej metody będzie znacznie większa, nawet dla większej wartości poślizgu silnika.

Niekontrolowane, przypadkowe załączenie silnika na sieć zasilającą, ze względu na indukowane przez pole wzbudzenia siły elektromotoryczne w uzwojeniach fazowych twornika, może wywołać znaczące, niedopuszczalne udary prądów (rys. 4a, 6a, 8a) oraz momentu silnika (rys. 4b, 6b, 8b). Proces synchronizacji przebiega wówczas w sposób przypadkowy, niekontrolowany, ale może kończyć się skuteczną synchronizacją (rys. 6, 8). Jednak zjawiska występujące w chwili inicjacji procesu stanowią znaczące zagrożenia dla elementów mechanicznych układu napędowego oraz obwodów elektrycznych silnika. Może to doprowadzić, w krótkim przedziale czasowym do uszkodzenia zarówno silnika, jak i układu napędowego.

3. Wnioski

Analiza wyników wykonanych obliczeń wykazała znaczący wpływ wartości poślizgu silnika w chwili inicjacji procesu synchronizacji z prędkości nadsynchronicznej na przebieg tego procesu i jego skuteczność. Zapewnienie skutecznego i łagodnego przebiegu procesu realizowanego metodą klasyczną od strony magnetyzacji silnika, rozpoczętego w warunkach pracy nadsynchronicznej, wymaga zastosowania dodatkowego układu sterowania [6, 7] wartością, kształtem oraz polaryzacją napięcia wzbudzenia. Synchronizacja silnika z prędkości nadsynchronicznej realizowana przez kontrolowane załączenie napięć zasilających uzwojenia stojana wzbudzonej maszyny minimalizuje udary prądów oraz momentu i może przebiegać łagodniej, niż ma to miejsce podczas zastosowania klasycznych metod [5] realizacji tego procesu. Sterowanie przebiegiem takiego procesu jest jednak trudne. Zagadnienie to wymaga dalszych badań.

4. Literatura

- [1]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Gliwice, Wyd. Pol. Śl. 2002
- [2]. Glinka T., Jakubiec M.: *Napędy elektryczne wielobiegunowe*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 71, s. 135–141.
- [3]. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
- [4]. Zalas P., Zawilak J.: *Gentle synchronization of two-speed synchronous motor with asynchronous starting*. Electrical Engineering (Berlin) 2012, vol. 94, nr 3, s. 155-163.
- [5]. Zalas P., Zawilak J.: *Proces synchronizacji silnika synchronicznego dużej mocy z prędkości nadsynchronicznej*. SME 2014, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 103, s. 37–40, 2014.
- [6]. Zalas P., Zawilak J.: *Wpływ przemiennego napięcia wzbudzenia na synchronizację dwubiegunowego silnika synchronicznego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2010, nr 85, s. 13–16.
- [7]. Zalas P., Zawilak J.: *Synchronizacja silników synchronicznych napięciem przemiennym*. SME 2008, Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 62, Studia i Mat. nr 28, 2008, s. 542-548.
- [8]. Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegunowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Prace Naukowe IMiNE PWr. 1986.

Autorzy

Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn,
 Napędów i Pomiarów Elektrycznych
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
 e-mail: pawel.zalas@pwr.edu.pl
 jan.zawilak@pwr.edu.pl