

Paweł Zalas, Jan Zawilak

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej

## ŁAGODNA ZMIANA PRĘDKOŚCI WIROWANIA DWUBIEGOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO W WARUNKACH ZAKŁÓCENIA ZASILANIA

### GENTLE CHANGE OF ROTATIONAL SPEED OF TWO-SPEED SYNCHRONOUS MOTOR DURING STATOR SUPPLY VOLTAGE DISTURBANCES

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę procesu zmiany prędkości wirowania z większej na mniejszą w dwubiegowym silniku synchronicznym o przełączalnych uzwojeniach stojana i wirnika. Zaproponowano metodę zwiększającą skuteczność tego procesu dzięki zasilaniu obwodu wzbudzenia silnika podczas pracy w warunkach nadsynchronicznych napięciem zmiennym o odpowiednio dobranym kształcie, amplitudzie oraz częstotliwości. Analizowano również wpływ mogących występować podczas pracy zakłóceń w układzie zasilania silnika na przebieg procesu synchronizacji wzbudzonej maszyny od strony sieci zasilającej stojan.

**Abstract:** The paper presents an analysis of the process of changing the rotation speed of from higher to lower in the two-speed synchronous motor with switchable armature and field magnet windings. Proposed a method of increasing the effectiveness of the synchronization by applying the change system of polarization of the field circuit supply DC voltage. The influence of the periodic reduction value of the supply voltages and momentary lack of the supply voltage in one phase on the synchronization processes have also been investigated.

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

**Keywords:** electrical machines, synchronous motor, synchronization, FEM calculation, salient poles,

#### 1. Wstęp

Napędy wentylatorów głównych kopalni głębinowych mają znaczenie niewrażliwe dla funkcjonowania kopalni i możliwości prowadzenia wydobywania. Zapewniają warunki, w których wydobywanie w kopalni w ogóle jest możliwe, ze względu na występowanie niebezpiecznego stężenia gazów wybuchowych. Układy napędowe o tak kluczowym znaczeniu muszą się charakteryzować przede wszystkim pewnością ruchową i niezawodnością. Dotyczy to zarówno części mechanicznej związanej z konstrukcją wentylatora jak i procesów związanych z pracą maszyny napędowej. Oprócz pracy w warunkach znamionowych istotny jest również prawidłowy przebieg stanów przejściowych związanych z procesami rozruchu, synchronizacji silników synchronicznych oraz procesami zmiany prędkości obrotowej silników dwubiegowych i synchronizacji do obu prędkości znamionowych. W analizie warunków pracy tych napędów należy uwzględnić również stany awaryjne oraz zakłócenia, związane np. z uszkodzeniem elementów mechanicznych odpowiedzialnych za sterowanie przepływem powietrza jak i awarie w układach

zasilania silnika. W celu poprawy właściwości rozruchowych oraz ze względów ekonomicznych w napędach tych stosowane są dwubiegowe silniki synchroniczne dużej mocy o wzbudzeniu elektromagnetycznym (możliwość kompensacji mocy biernej). Obecnie stosowane układy sterowania rozruchem i pracą tego typu silników nie zapewniają możliwości zmiany prędkości wirowania z większej na mniejszą przy jednoczesnej łagodnej synchronizacji z prędkości nadsynchronicznej. Proces ten jest obecnie realizowany z podsynchronicznego stanu ustalonego po przełączeniu uzwojeń stojana oraz wirnika i ponownym zasileniu obwodów twornika. W takich warunkach (stan asynchroniczny ustalony), pomimo stosowania układów łagodnej synchronizacji, proces może przebiegać nieskutecznie. Niekiedy synchronizacja z prędkości nadsynchronicznej jest jedynym sposobem na skuteczną realizację tego procesu.

W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesów synchronizacji wybranego modelu dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy z prędkości nadsynchro-

nicznej. Analizowane są przebiegi tych procesów, realizowanych od strony magnesyńcy oraz sieci zasilającej stojan z uwzględnieniem mogących wystąpić zakłóceń w układach zasilania silnika.

## 2. Wyniki analizy numerycznej

Numeryczną analizę procesu zmiany prędkości wirowania i synchronizacji przeprowadzono wykorzystując opracowany model połowo-obwodowy dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy typu GAe 1716/20t, opisanego szerzej w [2], którego podstawowe parametry pokazano w tabeli 1. Model obliczeniowy został zweryfikowany na podstawie pomiarów rzeczywistego silnika pracującego w napędzie wentylatora WPK 5.3 Zakładu Górniczego [2].

Tabela 1

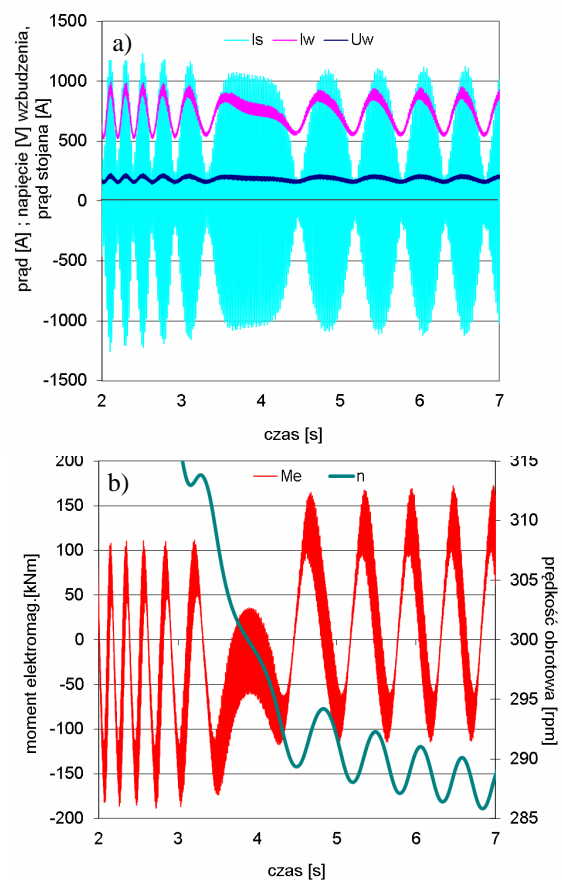
Dane znamionowe dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t

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

Na rysunku 1 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 procesu synchronizacji badanego silnika do mniejszej prędkości obrotowej ( $p=10$ ), na którym napięcie wzbudzenia o wartości  $2,5U_{wn}$  (forsowanie prądu) załączono w stanie pracy nadsynchronicznej, dla prędkości  $n \approx 370$  obr/min. W obliczeniach uwzględniono wypadkowy moment bezwładności układu napędowego wentylatora  $J_z \approx 40\ 000$  kg·m<sup>2</sup> oraz przyjęto moment obciążenia  $0,8 M_n$ , co odpowiada obciążeniu, jakie stanowi wentylator typu WPK 5.3 bez dławienia przepływu powietrza [2, 3].

Uzyskanie warunków do łagodnej i skutecznej synchronizacji silnika synchronicznego dużej mocy z prędkości nadsynchronicznej nie jest procesem prostym (rys. 1). Sam fakt inicjacji procesu w stanie pracy nadsynchronicznej oraz

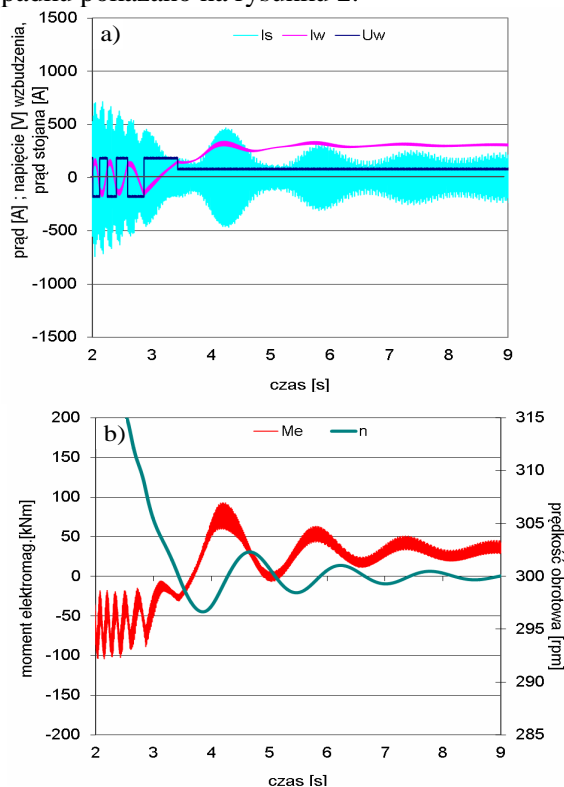
forsowania prądu wzbudzenia (rys. 1a) nie gwarantuje jego skutecznego przebiegu. W warunkach pracy nadsynchronicznej, podczas zmiany prędkości wirowania z większej na mniejszą nie występuje (jak ma to miejsce podczas procesu realizowanego z obu prędkości podsynchronicznych, po dokonaniu rozruchu silnika dla danej liczby par biegunów magnetycznych) stan ustalony, z którego można by proces zainicjować i sterować przebiegiem stanów przejściowych. Podczas tak realizowanego procesu o skuteczności synchronizacji decyduje wzajemne położenie biegunów pola stojana (rys. 1b) względem biegunów pola wirnika w chwili osiągnięcia przez silnik prędkości synchronicznej.



Rys. 1. Przebiegi czasowe wielkości podczas nieudanej synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości  $n \approx 370$  obr/min i forsowania prądu

Dla przyjętych warunków pracy silnika poprawny przebieg procesu synchronizacji można uzyskać przez zasilanie uzwojenia wzbudzenia w stanie pracy nadsynchronicznej napięciem przemiennym o kształcie prostokątnym i częstotliwości zgodnej z przebiegiem napięcia indukowanego [1] w uzwojeniu magnesyńcy. Wymaga to zastosowania sterowanego układu okresowej zmiany polaryzacji napięcia stałego zasilającego

uzwojenie wzbudzenia silnika [3]. Wyniki obliczeń obserwowanych wielkości dla tego przypadku pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości  $n \approx 370$  obr/min oraz układu zmiany polaryzacji napięcia wzbudzenia,  $p=10$

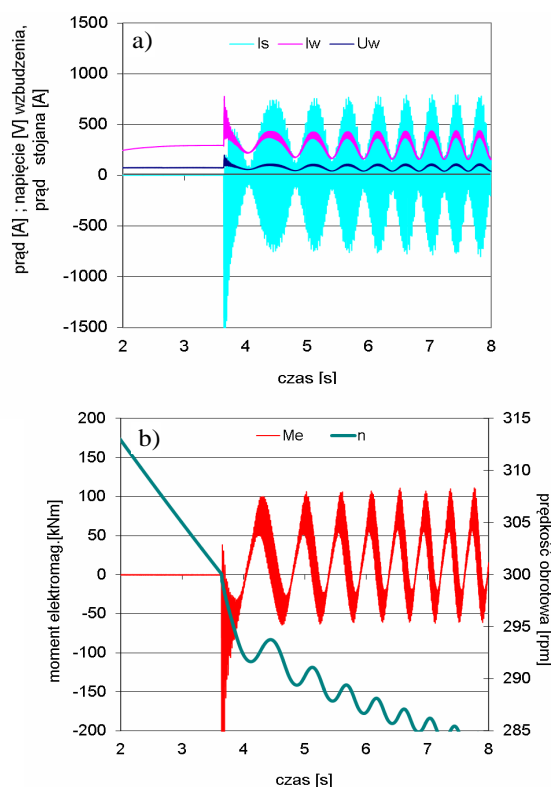
Zaproponowana metoda (rys. 2) zapewnia skuteczny i łagodny przebieg procesu synchronizacji nieznacznie skracając również czas osiągnięcia przez silnik prędkości (rys. 2b) synchronicznej. Wymaga jednak rozbudowanego układu sterowania układem zmiany polaryzacji napięcia wzbudzenia, ale wykorzystując już zainstalowaną wzbudnicę statyczną, to koszt inwestycji nie jest znaczący.

Łagodna synchronizacja dwubiegowych silników synchronicznych dużej mocy o wzbudzeniu elektromagnetycznym [2, 4] oraz silników wzbudzanych magnesami trwałymi o rozruchu dwustopniowym i jednej dedykowanej prędkości znamionowej może być realizowana z prędkości nadsynchronicznej również od strony sieci zasilającej stojan wzbudzonej maszyny. Wyniki obliczeń obserwowanych wielkości podczas takiego procesu dla przyjętych wcześniej warunków pracy silnika i dwóch różnych początkowych, kątowych położenia wirnika, uwzględniając mogące wystąpić podczas pracy rzeczywistego silnika okresowe zmniejszenia

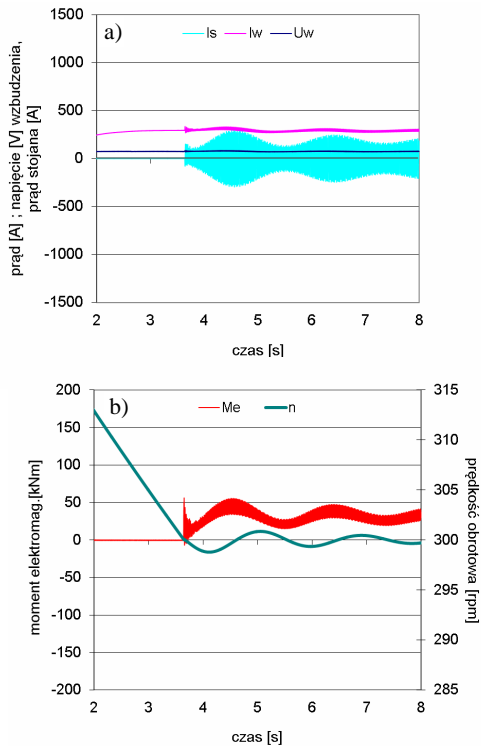
wartości napięć zasilających, pokazano na rysunkach 3 oraz 4.

W obliczeniach załączenie napięcia wzbudzenia o wartości znamionowej następowało w warunkach pracy asynchronicznej, powyżej prędkości synchronicznej a załączenie napięcia zasilających uzwojenia stojana, o wartości o 20% mniejszej od znamionowej, było realizowane w chwili osiągnięcia docelowej prędkości synchronicznej.

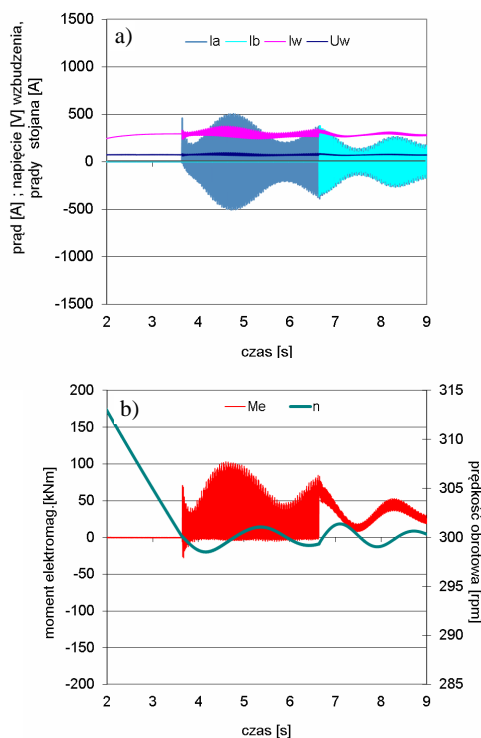
Niekontrolowane, przypadkowe załączenie silnika na sieć zasilającą (rys. 3), ze względu na indukowane przez pole wzbudzenia siły elektromotoryczne w uzwojeniach fazowych twornika, może wywołać znaczące, niedopuszczalne udary prądów (rys. 3a) oraz momentu silnika (rys. 3b). Proces synchronizacji zaproponowaną metodą, realizowany poprzez kontrolowane załączenie napięć zasilających stojan (rys. 4), pomimo zmniejszenia wartości napięć zasilających, przebiega w sposób skuteczny i łagodny.



Rys. 3. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości  $n \approx 300$  obr/min, kąta  $150$  deg i 20%-go zmniejszenia wartości napięć zasilających,  $p=10$



Rys. 4. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości  $n \approx 300$  obr/min, kąta  $10$  deg i 20%-go zmniejszenia wartości napięć zasilających,  $p=10$



Rys. 5. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości  $n \approx 300$  obr/min, kąta  $10$  deg oraz okresowego zaniku napięcia w jednej z faz zasilania,  $p=10$

Wykorzystując zmodyfikowany model obliczeniowy badanego silnika wykonano obliczenia procesu synchronizacji, uwzględniając okresowy zanik napięcia w jednej z faz zasilania w chwili inicjacji procesu, przy znamionowej wartości napięć zasilających pozostałe fazy silnika. Wyniki obliczeń obserwowanych wielkości (w tym prądy dwóch faz:  $I_a, I_b$ ) dla maksymalnego okresu wystąpienia zakłócenia  $T=3$ s (wynikającego z algorytmów działania stosowanych powszechnie układów zabezpieczających tego typu silniki) pokazano na rysunku 5. Okresowy zanik jednej z faz zasilania uzwojeń stojana badanej maszyny wywołał chwilowe pulsacje momentu elektromagnetycznego o znaczących amplitudach oraz nieudarowy wzrost wartości prądów w pozostałych fazach (rys.5a). Stan zakłóceń w zasilaniu nie wpłynął na skuteczność procesu synchronizacji realizowanego zaproponowaną metodą z prędkości nadsynchronicznej. Po przywróceniu poprawnego zasilania (rys. 5;  $t \approx 6,6$ s) w krótkim czasie następuje łagodne ustalenie się prędkości na wartości synchronicznej oraz ustalenie się przebiegów dynamicznych obserwowanych wielkości.

### 3. Wnioski

Proces synchronizacji dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy realizowany przez zasilanie uzwojenia wzbudzenia w stanie pracy nadsynchronicznej napięciem przemiennym o kształcie prostokątnym i częstotliwości zgodnej z przebiegiem napięcia indukowanego w uzwojeniu magnesu przebiega skutecznie, łagodząc stany przejściowe i skracając czas procesu. Zaproponowana metoda synchronizacji od strony sieci zasilającej stojan wzbudzonej maszyny synchronicznej realizowanej w sposób prawidłowy, pomimo wystąpienia typowych zakłóceń w układzie zasilania silnika przebiega skutecznie, znacząco skracając czas procesu, łagodząc udary prądów oraz momentu silnika.

### 4. Literatura

- [1]. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
- [2]. 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.
- [3]. Zalas P., Zawilak J.: Wpływ przemiennego napięcia wzbudzenia na synchronizację dwubie-

gowego silnika synchronicznego. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2010, nr 85, s. 13-16.

[4]. Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegunowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Prace Naukowe IMiNE PWr. 1986.

### **Autorzy**

Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

e-mail:pawel.zalas@pwr.edu.pl, jan.zawilak@pwr.edu.pl