

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wrocławska

SYNCHRONIZACJA DWUBIEGOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO DUŻEJ MOCY Z PRĘDKOŚCI NADSYNCHRONICZNEJ

SYNCHRONIZATION PROCESS OF TWO-SPEED, HIGH POWER SYNCHRONOUS MOTOR FROM OVER SYNCHRONOUS SPEED

Abstract: The paper presents the results of synchronization calculations from over synchronous speed for a selected model of two-speed synchronous motor with switchable armature and field magnet windings. The synchronous motor type GAe 1716/20t is used for driving the main fans type WPK 5.3 in deep underground mines. Fans of this type, having an outside diameter of about 9 meters, are characterized by a high moment of inertia, which is about 10 times higher than that of the driving motor's rotor. The synchronization calculations were performed using a specially developed, and validated by measurements, field-circuit calculation model of the motor. The effect of the instant of starting synchronization from over synchronous speed on the process's effectiveness and the dynamic waveforms was studied. The calculation results are presented as diagrams over time.

1. Wstęp

Dwubiegowe silniki synchroniczne dużej mocy o niekonwencjonalnej konstrukcji, w których dla jednej prędkości wirowania liczba biegunów mechanicznych jest inna niż liczba biegunów magnetycznych, są stosowane od wielu lat w napędach wentylatorów głównego przewietrzania kopalni głębinowych [4, 10]. Skokowa zmiana prędkości uzyskiwana przez zmianę liczby biegunów wypadkowego pola magnetycznego [9] zapewnia regulację wydajności oraz zmniejszenie mocy pobieranej przez wentylator [1]. Pozwala to uzyskać w skali roku znaczne ograniczenie zużycia energii i zmniejszenie sumarycznych kosztów wydobycia kopalni [1]. Jedną z takich maszyn jest dwubiegowy silnik typu GAe 1716/20t, którego parametry pokazano w tabeli 1. Silnik ma 16 biegunów wydatnych oraz klatkę rozruchową umieszczoną w nabiegownikach wirnika. Maszyny takie pracują w napędach wentylatorów głównych [5, 7, 8] typu WPK 5.3 kopalni podziemnych.

Proces synchronizacji omawianego silnika na większej prędkości obrotowej przebiega podobnie jak w silniku jednobiegowym. Ze względu na różną liczbę biegunów mechanicznych i magnetycznych wirnika [2, 3], na mniejszej prędkości obrotowej silnika, proces synchronizacji, pomimo zastosowania układów łagodnej synchronizacji oraz forsowania prądu wzbudzenia, nie zawsze przebiega skutecznie [5]. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w napędach o dużych momentach bezwładności, do jakich zalicza się wentylatory głównego przewietrzania

kopalni podziemnych, których średnica zewnętrzna wynosi ok. 9 metrów a moment bezwładności jest ok. dziesięć razy większy od momentu bezwładności wirnika silnika napędowego [5].

Tabela 1. Dane znamionowe dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t

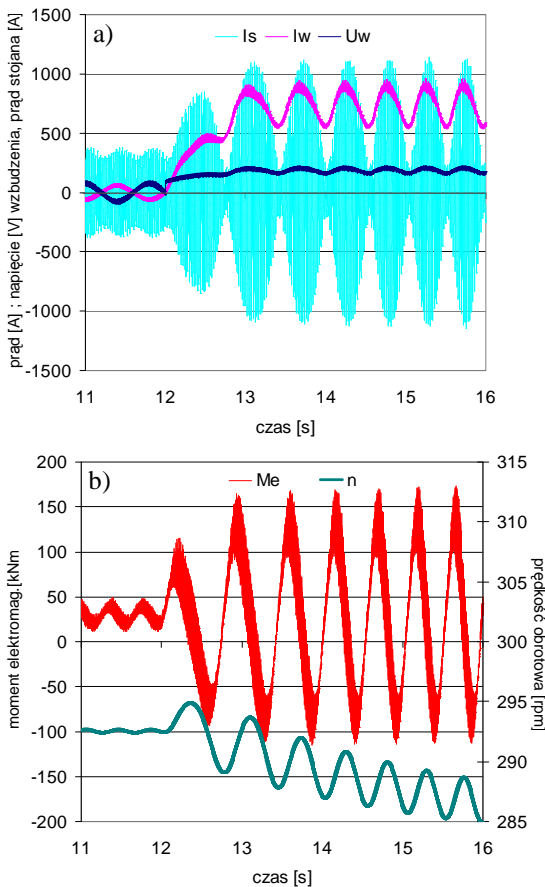
moc znamionowa	kW	2600	1200
napięcie stojana	V	6000 YY	6000 Y
prąd stojana	A	292	186
napięcie wzbudzenia	V	86	78
prąd wzbudzenia	A	337	300
prędkość obrotowa	obr/min	375	300
współczynnik mocy	-	0,9 poj.	0,77 ind.
sprawność	%	95,5	81,0

Przez odpowiedni wybór chwili załączenia napięcia wzbudzenia [5, 8] oraz sterowanie przebiegiem prądu magnesnicy [5, 7] możemy zwiększyć skuteczność procesu synchronizacji, bez konieczności stosowania forsowania prądu. Zwiększenie prawdopodobieństwa skutecznego przebiegu procesu można również uzyskać przez inicjację synchronizacji w zakresie pracy nadsynchronicznej, podczas zmiany prędkości wirowania silnika dwubiegowego z większej na mniejszą. Dla procesów, w których silnik jest obciążony szczególnie dużą wartością momentu (np. w stanach awaryjnych aparatu kierowniczego wentylatora, tłumiącego przepływ powietrza) może to być jedyna metoda zapewniająca uzyskanie skutecznej synchronizacji.

Celem artykułu jest wykazanie wpływu załączenia napięcia wzbudzenia w stanie pracy nad-synchronicznej na przebieg procesu synchronizacji wybranego modelu dwubiegowego silnika synchronicznego dużej mocy.

2. Analiza procesu synchronizacji

Analizę procesu synchronizacji przeprowadzono wykorzystując opracowany model połowo-obwodowy silnika typu GAe 1716/20t, opisany szerzej w [5, 6]. Model obliczeniowy został zweryfikowany na podstawie pomiarów rzeczywistego silnika. Porównanie wielkości obliczonych i pomierzonych pozwoliło stwierdzić, że opracowany model połowo-obwodowy jest poprawny [5, 6].



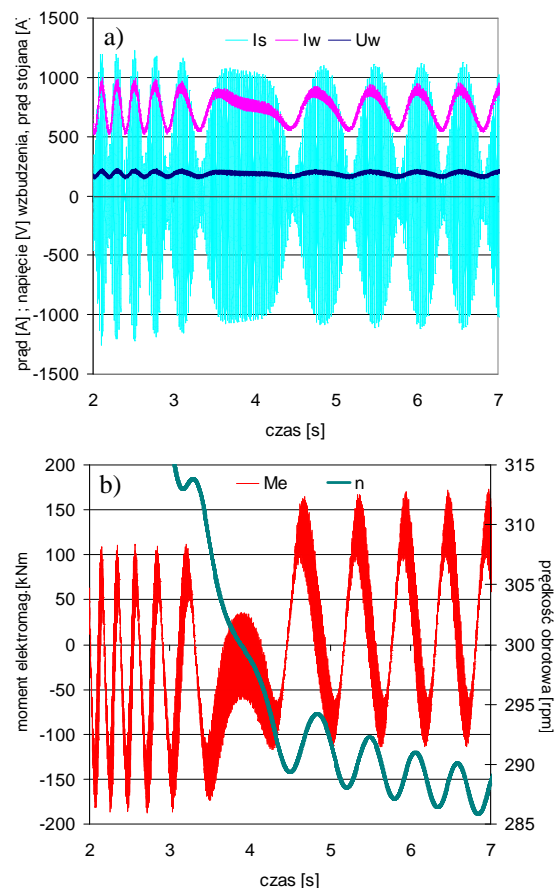
Rys. 1. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika i forsowania prądu wzbudzenia $2,5I_{wm}$, $p=10$

Na rysunkach 1- 5 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 do mniejszej prędkości obrotowej, $p=10$. W obliczeniach

przyjęto moment obciążenia $0,8 M_n$, co odpowiada obciążeniu, jakie stanowi wentylator typu WPK 5.3 bez dławienia przepływu powietrza, oraz uwzględniono wypadkowy moment bezwładności układu napędowego wentylatora $J_z \approx 40\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ [5].

Na rysunku 1 pokazano wyniki obliczeń procesu synchronizacji realizowanego metodą klasyczną, załączając napięcie stałe o wartości $2,5U_{wm}$ dla kąta $\delta = 0^\circ$, gdzie δ jest kątem między osią pola stojana a osią pola wirnika.

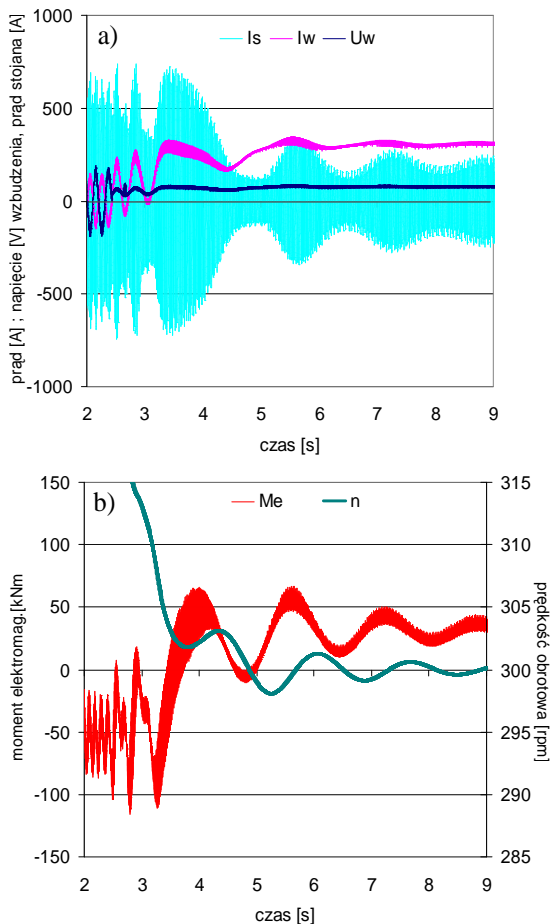
Pomimo inicjacji procesu w korzystnej chwili czasowej (rys. 1) oraz forsowania prądu wzbudzenia proces nie kończy się skuteczną synchronizacją. Analiza wyników obliczeń wykazała, że dla przyjętych warunków pracy silnika, niezależnie od wyboru chwili załączenia napięcia wzbudzenia, proces synchronizacji ze stanu podsynchronicznego ustalonego przebiega nieskutecznie.



Rys. 2. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n \approx 370 \text{ obr/min}$ i forsowania prądu, $p=10$

Na rysunku 2 pokazano wyniki procesu synchronizacji, w którym napięcie wzbudzenia o

wartości $2,5U_{wn}$ załączono w stanie pracy nad-synchronicznej, dla prędkości $n \approx 370$ obr/min. Jak widać na rysunku 2 przypadkowa chwila załączenia napięcia wzbudzenia, pomimo inicjacji procesu w stanie pracy nadsynchronicznej oraz forsowania prądu wzbudzenia, spowodowała nieskuteczny przebieg synchronizacji silnika (rys. 2). Załączenie napięcia wzbudzenia dla tak dużej wartości prędkości nadsynchronicznej wywołuje również niekorzystne udary prądów stojana (rys. 2a) oraz znaczące pulsacje momentu silnika (rys. 2b).

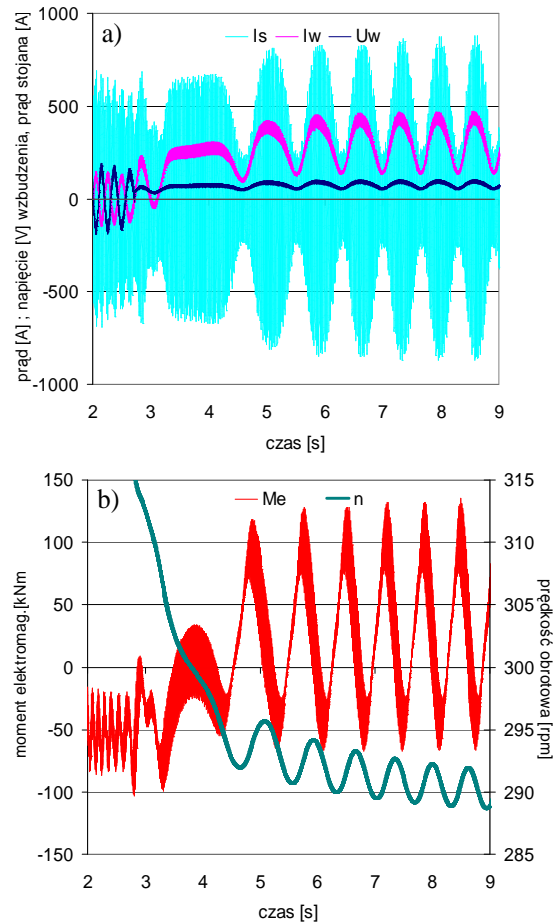


Rys. 3. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n=323$ obr/min i $U_w=U_{wm}$, $p=10$

Na rysunku 3 i 4 pokazano wyniki procesów synchronizacji rozpoczętych w stanie nadsynchronicznym dla prędkości bliskiej wartości synchronicznej ($n \approx 320$ obr/min). W obu procesach (rys. 3 i 4) załączenie znamionowej wartości napięcia wzbudzenia było realizowane dla kąta $\delta = 0^\circ$, w odstępnie jednego pełnego obrotu elektrycznego.

Pomimo rozpoczęcia synchronizacji silnika w wybranej, nie przypadkowej chwili czasowej,

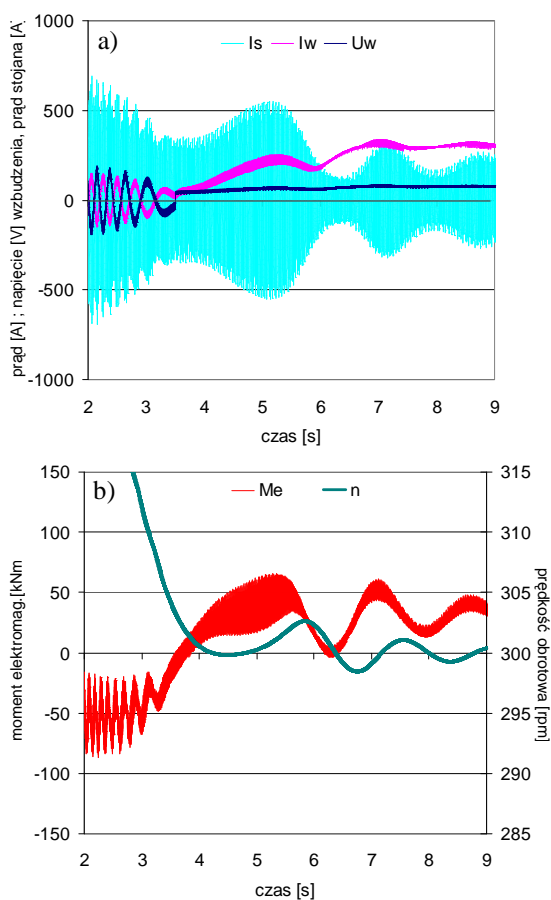
przebieg obu procesów ma charakter przypadkowy. O skuteczności synchronizacji (rys. 3 i 4) zadecydowała nie chwila załączenia napięcia wzbudzenia, ale wzajemne położenie biegunów pola stojana względem biegunów pola wirnika w chwili osiągnięcia prędkości synchronicznej.



Rys. 4. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n=317$ obr/min i $U_w=U_{wm}$, $p=10$

Na rysunku 5 pokazano wyniki procesu synchronizacji zainicjowanego w okresie ostatniego obrotu elektrycznego silnika przed osiągnięciem prędkości synchronicznej. Obliczenia wykonano dla przyjętych wcześniej warunków pracy silnika, a znamionową wartość napięcia stałego do uzwojenia magnetycznego załączono dla prędkości $n=304$ obr/min.

Załączenie napięcia wzbudzenia w przyjętej chwili zapewniło łagodną i skuteczną synchronizację pomimo znaczącego momentu obciążenia silnika. Skuteczna synchronizacja nastąpiła podczas pierwszej współfazowości pola stojana oraz wirnika bez konieczności forsowania prądu wzbudzenia.



Rys. 5. Przebiegi czasowe wielkości podczas synchronizacji silnika rozpoczętej dla prędkości $n=304$ obr/min i $U_w=U_{wm}$, $p=10$

3. Wnioski

Załączenie napięcia wzbudzenia w stanie pracy nadsynchronicznej zwiększa prawdopodobieństwo skutecznego przebiegu procesu oraz umożliwia synchronizację silnika obciążonego momentem większym niż przy metodzie klasycznej i forsowaniu prądu $2,5I_{wm}$. Rozpoczęcie procesu z prędkości nadsynchronicznej oraz duża wartość prądu wzbudzenia nie są jednak wystarczającymi warunkami zapewniającymi skuteczną i łagodną synchronizację. Brak ustalonego stanu pracy w warunkach nadsynchronicznych utrudnia określenie korzystnej chwili inicjacji procesu.

Literatura

- [1] Antal L., Zawilak J.: Dwubiegowy silnik synchroniczny - aspekty techniczne i ekonomiczne. XXXVII SME, 19-22 czerwca 2001, Ustroń-Zawodzie, s. 353-360.
- [2] Antal L., Zawilak J.: Moment dwubiegowego silnika synchronicznego o przetaczalnych uzwojeniach twornika i magnesy. SME 2003, Gdańsk-Jurata, 9-11 czerwca 2003, s. 161-164.
- [3] Antal L., Zawilak J.: Pole magnetyczne synchronicznego silnika jawnobiegowego o dwóch prędkościach obrotowych. Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 44, Studia i Mat. nr 19, 1996, s. 11-20.
- [4] Antal L., Zawilak J.: Testing of a two-speed synchronous motor. Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 63, Studia i Mat. nr 29, 2009, s. 17-20.
- [5] Zalas P.: Analiza procesu synchronizacji silników synchronicznych z rozruchem asynchronicznym. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007.
- [6] Zalas P., Zawilak J.: Dwubiegowy silnik synchroniczny w ujęciu polowo-obwodowym. Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 56, Studia i Materiały nr 23, 2003, s. 65-77.
- [7] Zalas P., Zawilak J.: Synchronizacja silników synchronicznych przez sterowanie prądem wzbudzenia. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel nr 73, 2005, s. 141-143.
- [8] Zalas P., Zawilak J.: Wybór chwili załączenia napięcia wzbudzenia podczas synchronizacji silników synchronicznych. Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel nr 71, 2005, s. 59-64.
- [9] Zawilak J.: Uzwojenia zmiennobiegowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Prace Naukowe IMiNE. PWr. 1986.
- [10] Zawilak J.: Dwubiegowe silniki prądu przemiennego. Prace Nauk. IMNiPE PWr. nr 58, Studia i Mat. nr 25, 2005, s. 25-36.

Autorzy

Dr inż. Paweł Zalas,
 Prof. dr hab. inż. Jan Zawilak,
 Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i
 Pomiarów Elektrycznych
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
 e-mail: pawel.zalas@pwr.wroc.pl
 jan.zawilak@pwr.wroc.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Jezry Hickiewicz