

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ZWIĘKSZENIE SKUTECZNOŚCI PROCESU SYNCHRONIZACJI DWUBIEGOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO O NIEKONWENCJONALNEJ KONSTRUKCJI

INCREASE IN SYNCHRONIZATION PROCESS EFFECTIVENESS OF THE UNCONVENTIONAL TWO-SPEED, HIGH POWER SYNCHRONOUS MOTOR

Abstract: The work presents calculation results of synchronization process of a two-speed, silent-pole, high power synchronous motor type GAe 1716/20p with switchable configuration connection of armature winding and field magnet. The influence of the synchronization moment on stator currents, electromagnetic torque and shaft velocity, during synchronization process with nominal excitation voltage and high value of load torque, was examined. The influence on control of excitation current value on synchronization process has been investigated. The work presents calculation results of synchronization process for field current control through the periodic jogging of field circuit supply DC voltage, the periodic change the exciter thyristor control angle and by appropriately changing the polarization of excitation voltage. The results of calculations were presented as time curves of state variables.

1. Wstęp

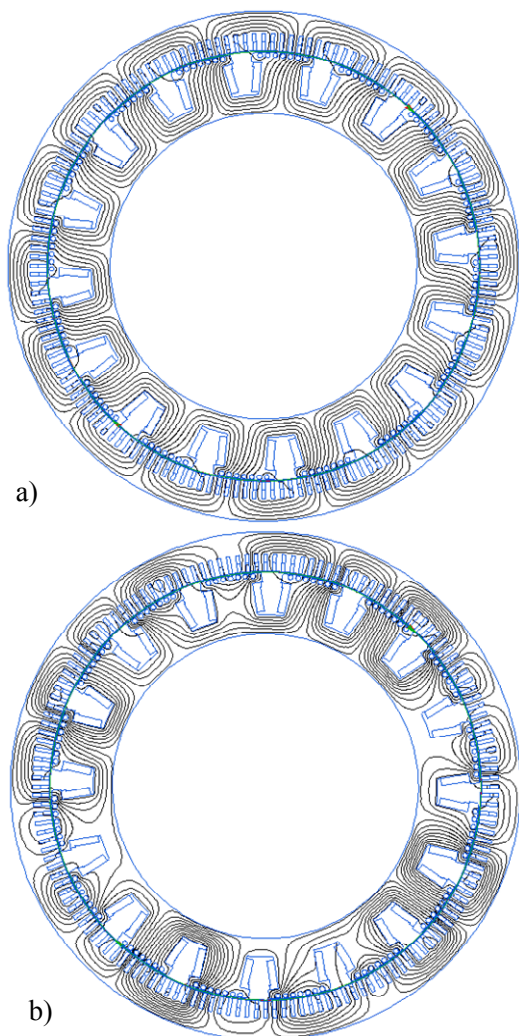
Najbardziej korzystną metodą regulacji wydajności wentylatorów głównych kopalni podziemnych, pozwalającą na uzyskanie największych oszczędności energii elektrycznej, jest zmiana prędkości obrotowej maszyny napędowej [1]. W napędach tych stosowane są powszechnie jawnobiegowe silniki synchroniczne dużej mocy. Regulację prędkości silnika synchronicznego można uzyskać przez zmianę amplitudy oraz częstotliwości napięcia zasilającego. Zastosowanie energoelektronicznych przełączników częstotliwości dużej mocy związane jest jednak nadal z dużymi kosztami inwestycyjnymi. Wymaganą regulację wydajności wentylatora można uzyskać także dzięki zastosowaniu dwubiegowych silników synchronicznych, w których zmianę prędkości uzyskuje się przez zmianę liczby biegunów pola magnetycznego silnika [9]. Ze względu na koszty przeprowadza się modernizację już pracujących silników jednobiegowych, wykorzystując ich magnetowód oraz konstrukcję mechaniczną. Modernizacja polega na zastosowaniu przełączalnego uzwojenia stojana oraz przełączeniu uzwojenia wirnika z wykorzystaniem dodatkowej pary pierścieni ślizgowych. Zmiana kierunku prądów w odpowiednich grupach uzwojeń stojana oraz zmiana biegunowości odpowiednich biegunów magnesu [9] pozwala na uzyska-

nie drugiej, większej, liczby biegunów wypadkowego pola magnetycznego, i tym samym drugiej, mniejszej, prędkości obrotowej silnika. Jednym z silników poddanych opisanej wyżej modernizacji jest dwubiegowy silnik synchroniczny typu GAe 1716/20t. Podstawowe parametry silnika oraz parametry silnika jednobiegowego zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane znamionowe dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe1716/20t oraz jednobiegowego typu GAe1716t

typ silnika	GAe	1716t	1716/20t	
moc znamionowa	kW	3150	2600	1200
napięcie stojana	V	6000	6000	6000
prąd stojana	A	350	292	186
napięcie wzbudzenia	V	90	86	78
prąd wzbudzenia	A	350	337	300
prędkość obrotowa	obr/min	375	375	300
współczynnik mocy	-	0,9 poj.	0,9 poj.	0,77 ind.
sprawność	%	96,5	95,5	81,0

Zmiana prędkości wirowania z 375 obr/min. na 300 obr/min. pozwala o ponad 50% zmniejszyć moc silnika, a tym samym uzyskać w skali roku znaczne ograniczenie zużycia energii [4], co zrekompensuje poniesione koszty modernizacji. Ponieważ maszyny te mają jawnobiegunową konstrukcję wirnika, to dla mniejszej prędkości obrotowej silnika dwubiegowego liczba biegunów mechanicznych jest inna niż liczba biegunów magnetycznych (odpowiednio 16 i 20). Na rysunku 1 pokazano obraz pola wywołany przez przepływ twornika silnika jednobiegowego (rys. 1a) oraz silnika dwubiegowego na mniejszej prędkości obrotowej (rys. 1b). Różna liczba biegunów magnetycznych i mechanicznych silnika powoduje, że w danej chwili czasowej poszczególne bieguny znajdują się w różnych warunkach magnetycznych (rys. 1b) [3, 8].



Rys. 1. Obraz pola elektromagnetycznego wywołanego przez uzwojenie twornika silnika jednobiegowego (a) i dwubiegowego dla $p = 10$ (b)

Wskutek tego udział poszczególnych biegunów w tworzeniu momentu napędowego nie jest jednakowy [2]. Powoduje to wzrost elektromechanicznej stałej czasowej układu napędowego oraz duży poślizg silnika podczas biegu asynchronicznego, co ma znaczący wpływ na przebieg procesu synchronizacji na mniejszej prędkości obrotowej. W celu zwiększenia momentu synchronizującego, a tym samym skuteczności synchronizacji, stosuje się powszechnie forsowanie prądu wzbudzenia, często o wartości o 50 % większej od prądu znamionowego [6, 8]. Niekiedy jednak pomimo zastosowania forsowania prądu wzbudzenia proces nie kończy się skuteczną synchronizacją [8].

Celem pracy jest wykazanie, że przez odpowiedni dobór chwili rozpoczęcia procesu synchronizacji oraz sterowanie wartością prądu wzbudzenia podczas tego procesu, dla przyjętych warunków obciążenia silnika, można zwiększyć skuteczność synchronizacji oraz skrócić czas trwania stanów przejściowych, bez konieczności stosowania forsowania.

3. Obliczenia procesu synchronizacji

Niekonwencjonalny obwodowy rozkład przełączalnego uzwojenia stojana oraz niekonwencjonalne uzwojenie wzbudzenia i niesymetryczny rozkład wypadkowego pola magnetycznego silnika, dla $p = 10$ i $p = 8$, powodują, że uzyskanie odpowiedniej dokładności obliczeń pracy silnika wymaga zastosowania połowo-obwodowej metody analizy. W tym celu opracowano połowo-obwodowy model silnika typu GAe 1716/20t [7, 8]. Model obliczeniowy zweryfikowano wykonując pomiary rzeczywistego silnika zainstalowanego w stacji wentylatorowej zakładu górniczego. Na podstawie porównania wielkości obliczonych i pomierzonych stwierdzono, że opracowany model połowo-obwodowy dwubiegowego silnika synchronicznego jest poprawny i może być wykorzystany do dalszego badania zjawisk zachodzących podczas pracy tego typu maszyn [8].

Omawiany silnik dwubiegowy pracuje w napędzie wentylatora kopalnianego typu WPK 5.3, którego podstawowe parametry zestawiono w tabeli 2. Wentylatory tego typu, których średnica zewnętrzna wynosi około 9 metrów, charakteryzują się bardzo dużą wartością momentu bezwładności, który jest około dziesięć razy większy od momentu bezwładności wirnika silnika napędowego (tabela 2). W celu

zmniejszenia obciążenia silnika podczas procesu synchronizacji stosuje się dławienie wentylatora przez zamknięcie klap aparatu kierowniczego. W stanach awaryjnych zachodzi jednak konieczność uruchomienia układu napędowego bez dławienia przepływu powietrza. Skutkuje to dużym momentem obciążenia, co jest najczęstszą przyczyną trudności z synchronizacją na mniejszej prędkości wirowania badanego silnika.

Tabela 2. Nominalne parametry wentylatora WPK 5.3

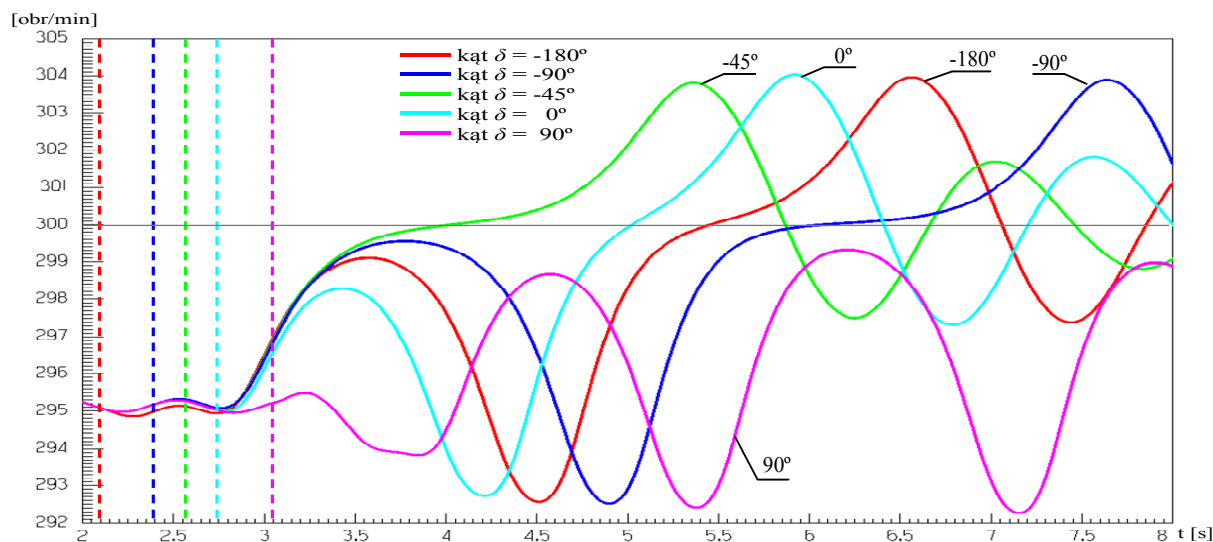
wydajność nominalna	m ³ /s	366,6/458,3
sprawność maksymalna	-	0,885
masa	kg	50438
bezładność	kgm ²	37000

Wykorzystując opracowany model polowo-obwodowy wykonano obliczenia procesów synchronizacji dla mniejszej prędkości synchronicznej badanego silnika dwubiegowego, w których uwzględniono wpływ chwili załączenia napięcia stałego do uzwojenia wzbudzenia na przebieg procesu. Obliczenia wykonano dla zmiany momentu obciążenia w zakresie od 0,45 do 0,8 M_N . Odpowiada to obciążeniu, jakie stanowi wentylator typu WPK 5.3 przy zamkniętych klapach aparatu kierowniczego, aż do całkowicie otwartych. W obliczeniach przyjęto znamionowe napięcie wzbudzenia oraz wypad-

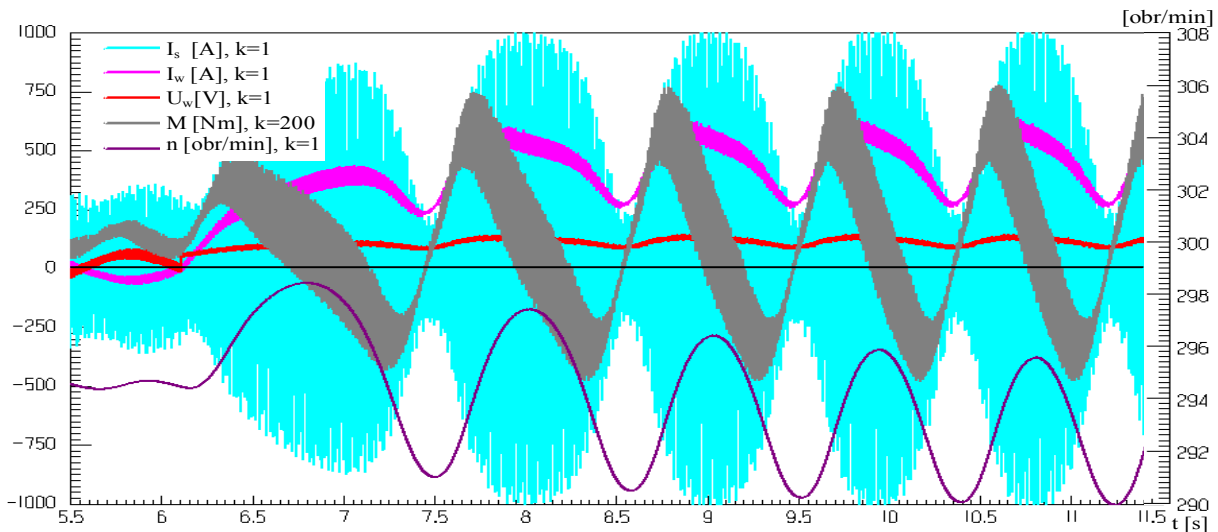
kowy moment bezładności układu napędowego wentylatora $J_z \approx 40\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Analiza wyników obliczeń wykazała, że w zakresie momentu obciążenia od 0,45 do 0,5 M_N synchronizacja silnika przebiega skutecznie, niezależnie od przyjętej chwili załączenia napięcia stałego do uzwojenia wzbudzenia. Chwila rozpoczęcia tego procesu ma natomiast istotny wpływ na przebiegi dynamiczne i czas synchronizacji. Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono również, że dla momentu obciążenia 0,55 M_N wzajemne położenie osi pola stojana względem osi pola wirnika, w chwili załączenia napięcia wzbudzenia, decyduje o skuteczności synchronizacji. Na rysunku 2 pokazano wpływ chwili rozpoczęcia procesu na czasowe przebiegi prędkości obrotowej podczas synchronizacji silnika dla tej wartości momentu obciążenia. Linia przerywaną zaznaczono na wykresach poszczególne chwile załączenia napięcia wzbudzenia.

Na podstawie analizy wyników wykonanych obliczeń stwierdzono, że skuteczny przebieg synchronizacji oraz łagodzenie przebiegów dynamicznych zapewnia załączenie napięcia wzbudzenia w zakresie wartości kąta δ od $(-90)^\circ$ do $(-15)^\circ$ (rys. 2), gdzie δ jest to kąt między osią pola stojana a osią pola wirnika.



Rys. 2. Wpływ chwili rozpoczęcia procesu na czasowe przebiegi prędkości obrotowej podczas synchronizacji silnika dla momentu obciążenia 0,55 M_N , $p = 10$



Rys. 3. Czasowe przebiegi wielkości podczas synchronizacji silnika rozpozętej dla kąta $\delta = 0^\circ$, momentu obciążenia $0,6 M_N$ i forsowania prądu wzbudzenia $1,5 I_{wN}$, $p = 10$

Dla przyjętych warunków pracy silnika ($M_o = 0,55 M_N$) najkorzystniejszą chwilą rozpoczęcia procesu jest wartość kąta δ około $(-45)^\circ$ (rys. 2). Zapewnia to skuteczną synchronizację podczas pierwszej współfazowości pól twornika i magneśnicy. Analiza wyników obliczeń wykazała również, że proces rozpoczęty dla wartości kąta δ około 90° nie kończy się skuteczną synchronizacją i ustala się praca asynchroniczna wzbudzonej maszyny [5, 8].

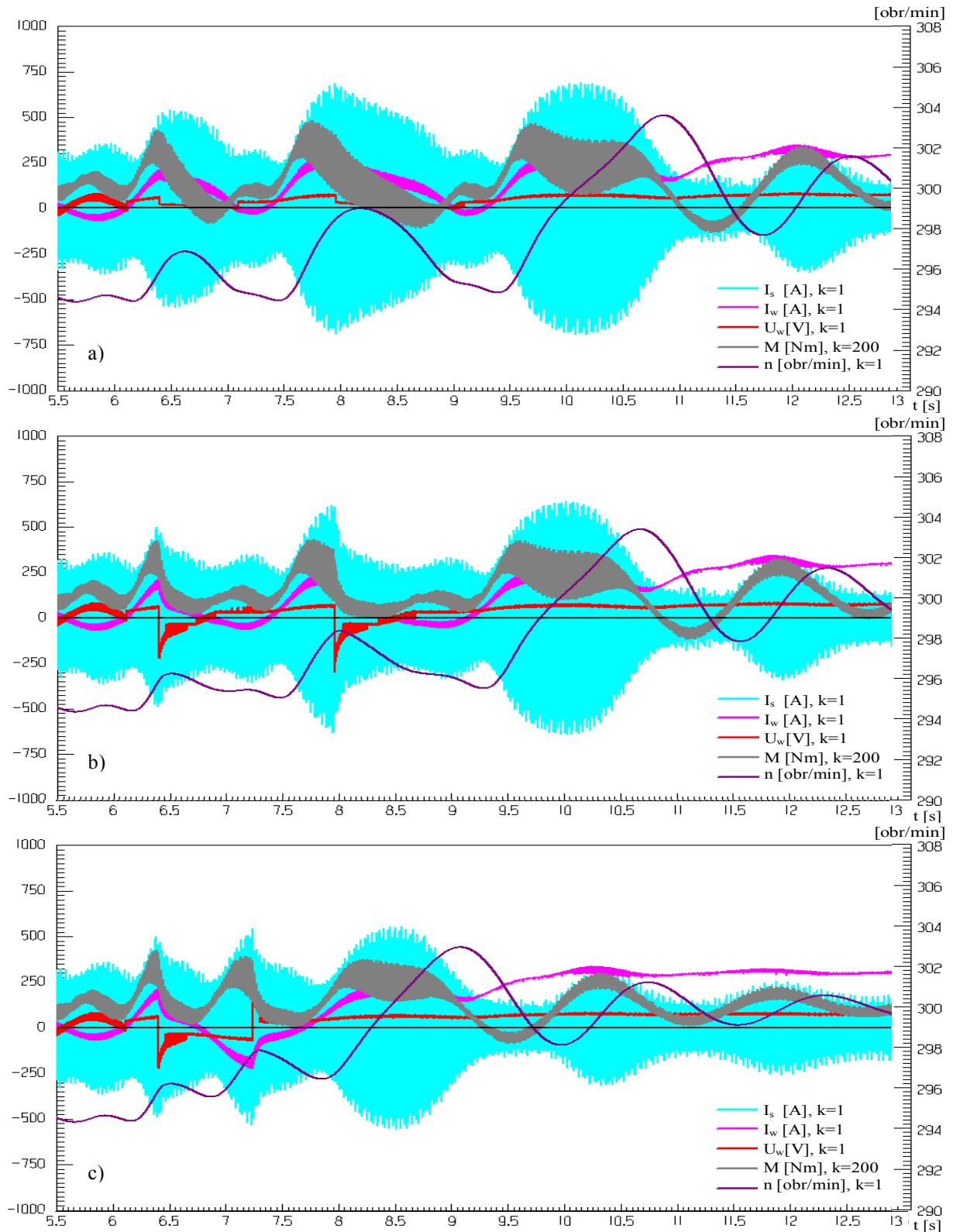
Obliczenia procesu synchronizacji badanego silnika dwubiegowego dla mniejszej prędkości obrotowej, wykonane dla momentu obciążenia o wartości większej od $0,55 M_N$ wykazały, że niezależnie od wyboru chwili załączenia znamionowej wartości napięcia wzbudzenia, proces przebiega nieskutecznie. W takich przypadkach powszechnie stosuje się forsowanie prądu wzbudzenia mające na celu zwiększenie momentu synchronizującego. Na rysunku 3 pokazano obliczone przebiegi prądu fazy A twornika I_s , prądu wzbudzenia I_w oraz napięcia na zaciskach uzwojenia wzbudzenia U_w , momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej podczas procesu synchronizacji rozpoczętego dla kąta $\delta = 0^\circ$ i forsowania prądu wzbudzenia. Jak widać na rysunku 3 zwiększenie prądu wzbudzenia do wartości $1,5 I_{wN}$ przy obciążeniu momentem $0,6 M_N$ nie synchronizuje silnika. Dla przyjętych warunków pracy silnika, skuteczną synchronizację zapewnia dopiero prąd wzbudzenia o wartości większej od $2,5 I_{wN}$ [7, 8]. Duża wartość prądu wzbudzenia powoduje jednak pulsację momentu elektromagnetycznego o znaczącej amplitudzie, co wywołuje przeciążenia

układu mechanicznego. Duże oscylacje prędkości powodują zwiększenie czasu ustalenia się procesów przejściowych i czasu synchronizacji [8]. Uzyskanie tak dużej wartości prądu forsującego wymaga również zwiększenia mocy urządzeń zasilających obwód wzbudzenia, mimo, że pełne wykorzystanie ich możliwości odbywa się jedynie przez kilka sekund podczas każdego rozruchu silnika.

Inną metodą, pozwalającą zwiększyć skuteczność procesu synchronizacji silnika obciążonego znaczącym momentem, jest sterowanie wartością prądu wzbudzenia od chwili rozpoczęcia procesu do chwili osiągnięcia prędkości synchronicznej. Regulacja prądu wzbudzenia może być realizowana przez okresowe impulsowanie napięcia stałego zasilającego obwód wzbudzenia, okresową zmianę kąta wysterowania tyrystorów prostownika wzbudnicy statycznej i przejście do pracy falownikowej lub określoną zmianę polaryzacji napięcia wzbudzenia z wykorzystaniem łącznika tranzystorowego pracującego w układzie H. Na rysunkach 4a-c pokazano przebiegi procesów synchronizacji dla przyjętych wcześniej warunków pracy badanego silnika, zainicjowane dla kąta $\delta = 0^\circ$. W celu porównania wpływu zastosowanej metody regulacji wartości prądu wzbudzenia na przebieg procesu synchronizacji przyjęto identyczne parametry algorytmu sterowania (rys. 4a-c). Jako chwilę zmiany kąta wysterowania tyrystorów wzbudnicy, w celu uzyskania minimalnej wartości napięcia wyprostowanego (rys. 4a) lub przejścia do pracy falownikowej (rys. 4b) oraz zmianę polaryzacji napięcia wzbudzenia

(rys. 4c), przyjęto kąt $\delta = 90^\circ$. Ponowna zmiana wartości napięcia wzbudzenia (rys. 4a, b) lub zmiana jego polaryzacji (rys. 4c) w celu uzys-

kania znamionowej wartości prądu wzbudzenia następowała dla kąta $\delta = (-90^\circ)$.



Rys. 4. Czasowe przebiegi wielkości podczas synchronizacji silnika i sterowania wartością prądu wzbudzenia przez: impulsowanie napięcia (a), zmianę kąta wysterowania tyrystorów prostownika (b) i zmianę polaryzacji napięcia wzbudzenia (c)

Sterowanie wartością i kierunkiem prądu wzbudzenia podczas procesu synchronizacji umożliwia zminimalizowanie momentu hamującego wytwarzanego przez silnik w zakresie ujemnych wartości kąta δ od -180° do 0° oraz uzyskanie możliwie dużego momentu dynamicznego w zakresie dodatnich wartości kąta δ od 0° do 180° . Zapewnia to zwiększenie skuteczności procesu synchronizacji przy jednoczesnym znacznym zmniejszeniu pulsacji prądów twornika, momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej, ograniczając powstawanie niekorzystnych uderzeń mechanicznych na wale układu napędowego w porównaniu z metodą forsowania prądu [7, 8]. Sterowanie wartością prądu, przez okresową zmianę wartości napięcia wzbudzenia lub zmianę kąta wysteroowania tyrystorów wzbudnicy, umożliwia synchronizację silnika obciążonego momentem o wartości o 20% (a podczas określonej zmiany polaryzacji napięcia o 30%) większej niż przy synchronizacji prądem $1,5I_{wN}$. Przyjęty algorytm sterowania zapewnia skuteczną synchronizację dla znamionowego napięcia wzbudzenia, co pozwala na ograniczenie mocy urządzeń zasilających obwód magneśnicy, a czas trwania tego procesu jest porównywalny [7] z synchronizacją prądem $2,5I_{wN}$.

4. Wnioski

Wykonane obliczenia wykazały, że przez wybór odpowiedniej chwili rozpoczęcia procesu synchronizacji oraz odpowiednie sterowanie wartością prądu wzbudzenia możliwe jest zwiększenie skuteczności tego procesu, w szczególności dla dużej wartości momentu obciążenia silnika. Pozwala to również na znaczne zmniejszenie pulsacji momentu elektromagnetycznego, prądów twornika oraz prędkości obrotowej w porównaniu z metodą forsowania prądu wzbudzenia, zapewniając skuteczną synchronizację silnika dla znamionowego prądu wzbudzenia.

5. Literatura

- [1] Antal L., Zawilak J.: *Dwubiegowy silnik synchroniczny - aspekty techniczne i ekonomiczne*, XXXVII SME, 19-22 czerwca 2001, Ustroń-Zawodzie, ss. 353-360
- [2] Antal L., Zawilak J.: *Moment dwubiegowego silnika synchronicznego o przelączalnych uzwojeniach twornika i magneśnicy*, SME 2003, Gdańsk –Jurata, 9–11 czerwca, 2003, ss. 161-164
- [3] Antal L., Zawilak J.: *Pole magnetyczne synchronicznego silnika jawnobiegowego o dwóch prędkościach obrotowych*, Prace Nauk. IMiNE. PWr nr 44, Studia i Materiały nr 19, 1996, ss. 11-20
- [4] Antal L., Zawilak J.: *Wyniki badań dwubiegowego silnika synchronicznego*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, BOBRME Komel 2004, nr 68, ss. 107-112
- [5] Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Gliwice, Helion, 1998
- [6] Sobczyk T.: *Łagodna synchronizacja silników synchronicznych dużych mocy z asynchronicznego stanu pracy*, XX SME, Maszyny synchroniczne, Kazimierz Dolny, 1984, ss. 28-29
- [7] Zalas P., Zawilak J.: *Synchronizacja silników synchronicznych przez sterowanie prądem wzbudzenia*, Efektywność Energetyczna Napędów z Silnikami Elektrycznymi, EENSE, Podlesice, 2005, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, BOBRME "Komel" 2005, nr 73, ss. 143-148
- [8] Zalas P.: *Analiza procesu synchronizacji silników synchronicznych z rozruchem asynchronicznym*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007
- [9] Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Prace Naukowe IMiNE, PWr, 1986

Autorzy

Dr inż. Paweł Zalas,
 e-mail: pawel.zalas@pwr.wroc.pl
 Dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr
 e-mail: jan.zawilak@pwr.wroc.pl
 Politechnika Wroclawska,
 Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów
 Elektrycznych
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław