

Paweł Zalas, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wrocław

WYBÓR CHWILI ZAŁĄCZENIA NAPIĘCIA WZBUDZENIA PODCZAS SYNCHRONIZACJI SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH

SELECTION OF EXCITATION START-UP MOMENT DURING SYNCHRONIZATION PROCESS IN SYNCHRONOUS MOTORS

Abstract: The work presents calculation results of synchronization process of a two-speed, silent-pole, high power synchronous motor. The calculations were based on the examined two dimensional, field-circuit model for the high power motor, type GAe 1716/20p with switchable configuration connection of armature winding and field magnet. The motor characteristics make it suitable for drives of fan – type machines. The work presents description of computable model and general parameters of analyze two-speed motor. The analytical relations that describe the asynchronous motor state in the moment of the beginning synchronization process and the torque-angle characteristic as result numerical analysis were present. The influence of the synchronization moment, during synchronization process with nominal excitation voltage and greater then nominal value, on stator currents, electromagnetic torque and shaft velocity were examined. Dynamic diagram of stator currents, excitation current, excitation voltage, electromagnetic torques and shaft velocity during synchronization process as results of computer simulation are presented.

1. Wstęp

W układach napędowych wentylatorów głównego przewietrzania kopalni powszechnie stosuje się silniki synchroniczne, których dodatkowym zadaniem jest regulacja mocy biernej. Spośród wszystkich sposobów regulacji wydajności urządzeń o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej najbardziej ekonomicznym jest zmiana prędkości obrotowej silników napędowych. Do napędu tych urządzeń zaproponowano dwubiegowe silniki synchroniczne, w których skokową regulację prędkości obrotowej uzyskano przez zmianę liczby biegunów pola magnetycznego. Zmianę liczby biegunów pola magnetycznego uzyskuje się przez przełączenie uzwojenia twornika o odpowiednim obwodowym rozkładzie grup fazowych oraz zmianę biegunowości odpowiednich biegunów magnetycznych. Rozwiązanie to umożliwia regulację wydajności oraz zmniejszenie mocy pobieranej przez wentylator i jest tańsze od zastosowania układów przekształtnikowych. [3, 7]. Ponieważ maszyny te mają w wirniku bieguny wydane to dla jednej prędkości obrotowej liczba biegunów mechanicznych jest inna niż liczba biegunów magnetycznych (np. odpowiednio 16 i 20) [2]. Rozruch tego typu silników, ze względu na dużą moc, jest jednym z ważniejszych zagadnień dotyczących ich eksploatacji. Dla silników synchronicznych proces rozruchu kończy się synchronizacją. Niewłaściwa chwila włączenia prądu wzbudzenia może powodować występo-

wanie zmiennego momentu elektromagnetycznego, przepięcia w obwodach uzwojenia twornika a nawet niesynchronizowanie się silnika. Z tego powodu zastosowanie forsowania prądu wzbudzenia, często o 50 % większego od prądu znamionowego, zwiększa moment synchronizujący i prawdopodobieństwo synchronizacji silnika. W takich przypadkach zwiększa się również maksymalny moment dynamiczny oraz przeciążenie układu mechanicznego. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w napędach o dużych momentach bezwładności. Do takich napędów zalicza się wentylatory głównego przewietrzania kopalń podziemnych, których średnica zewnętrzna wynosi ok. 9 metrów a moment bezwładności jest ok. dziesięć razy większy od momentu bezwładności wirnika silnika napędowego.

Obliczenia i analizę procesu synchronizacji wykonano dla dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe 1716/20t pracującego w napędzie wentylatora kopalnianego typu WPK 5,3. Podstawowe parametry silnika przedstawiono w tabeli 1. Proces synchronizacji na większej prędkości obrotowej przebiega podobnie jak w silniku jednobiegowym. Istotna różnica występuje podczas synchronizacji silnika na mniejszej prędkości obrotowej, ponieważ liczba biegunów mechanicznych wirnika jest inna niż liczba biegunów magnetycznych [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	100	78
Prąd wzbudzenia	A	337	260
Prędkość obrotowa	obr/min	375	300
Współczynnik mocy	-	0,9 poj.	0,77 ind.
Sprawność	%	95,5	81,0

Trudności z synchronizacją na mniejszej prędkości wynikają w znacznym stopniu z:

- dużego poślizgu wpadu, przy którym ustala się praca asynchroniczna maszyny;
- dużej wartości elektromechanicznej stałej czasowej układu napędowego;
- dużej stałej czasowej obwodu wzbudzenia.

Celem niniejszej pracy jest pokazanie, że wyborem chwili załączenia prądu wzbudzenia można łagodzić procesy dynamiczne podczas synchronizacji. Synchronizacja zainicjowana w chwili, gdy biegun pola wirnika nabiega na odpowiadający mu biegun pola magnetyczny zwiększa pewność i łagodzi przebieg tego procesu.

2. Model polowo-obwodowy silnika synchronicznego

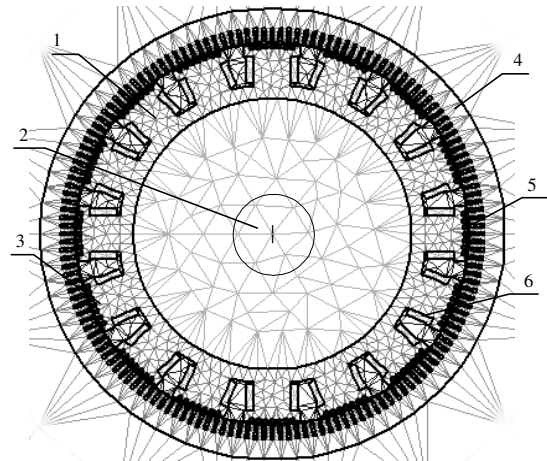
Analizę procesu synchronizacji przeprowadzono wykorzystując opracowany model polowo-obwodowy silnika typu GAe 1716/20t [8], którego geometrię magnetowodu przedstawiono na rysunku 1. W modelu tym przyjęto następujące założenia:

- sinusoidalny przebieg napięć zasilających V_A , V_B , V_C ,
- równomierną gęstość prądu w przekroju poprzecznym uzwojenia twornika,
- długość obliczeniową maszyny równą długości stojana,
- rzeczywiste, nieliniowe charakterystyki magnesowania magnetowodu.

W modelu matematycznym badanego silnika wykorzystano równania pola elektromagnetycznego, równania napięciowe opisujące trójfazowe źródło zasilania oraz równanie ruchu. Równania pola elektromagnetycznego są rozwiązywane w dwóch układach współrzędnych:

nieruchomym związanym ze stojanem i ruchomym związanym z wirnikiem.

W części polowej modelu wykorzystywana jest metoda elementów skończonych [6]. Model silnika podzielono na obszary o różnej gęstości siatki elementów skończonych. Największą gęstość tej siatki przyjęto w strefach decydujących o rozkładzie pola magnetycznego, tzn. szczeliny powietrznej, zębach i nabiegunkach.

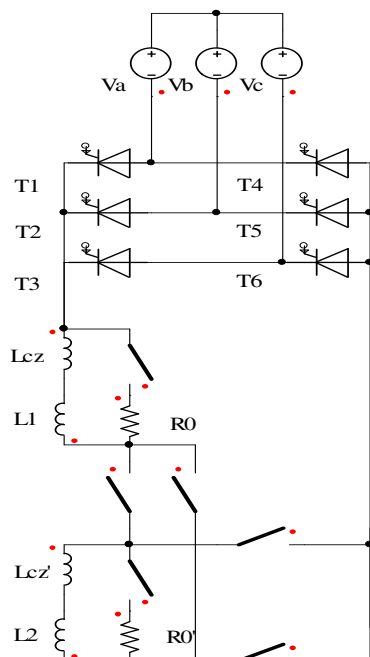


Rys. 1. Schemat magnetowodu silnika typu GAe 1716/20t; 1 – wirnik, 2 – wał, 3 – uzwojenie rozruchowe (klatkowe), 4 – stojan, 5 – uzwojenie twornika, 6 – uzwojenie wzbudzenia

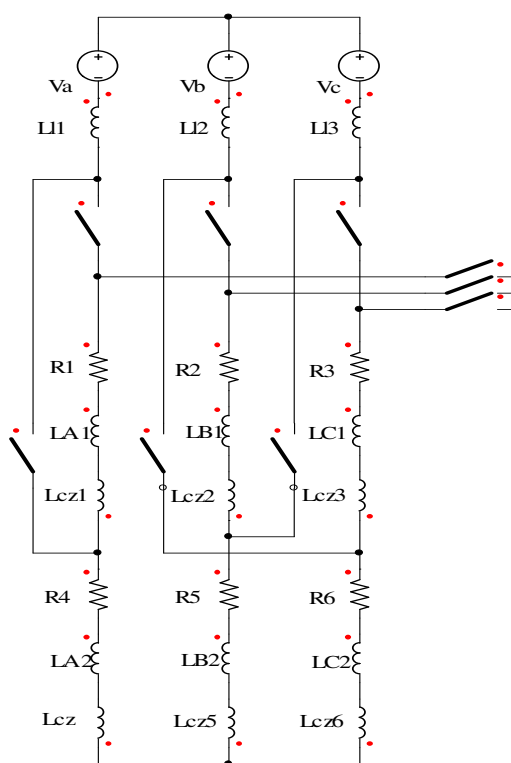
W obliczeniach modelu polowego przyjęto 40 000 węzłów. Dalsze zagęszczanie siatki nie wpływało na dokładność odwzorowania analizowanych wielkości natomiast znacząco wydłużało czas obliczeń.

Uzwojenia maszyny odwzorowano za pomocą odpowiednich wartości rezystancji i indukcyjności (rys. 2 i 3). Dla uzwojeń twornika i magnetyczny przyjęto stałe wartości rezystancji R_l oraz indukcyjności połączeń czołowych L_{c2} . Natomiast indukcyjności części uzwojeń umieszczonych w strefie żłobkowej, twornika L_{A1} , L_{B1} , L_{C1} , L_{A2} , L_{B2} , L_{C2} (rys. 3) oraz magnetyczny L_1 , L_2 (rys.2) wyznaczane są w każdym kroku obliczenia polowego. Podobnie dla uzwojenia rozruchowego klatkowego parametry strefy połączeń czołowych wyznaczono metodą tradycyjną na podstawie wymiarów geometrycznych natomiast dla prętów w strefie żłobkowej wyznaczane są z obliczeń polowych. Wartość rezystancji, zawierającej obwód wzbudzenia podczas rozruchu, przyjęto równą 10-cio

krotnej wartości rezystancji uzwojenia wzbudzenia.



Rys. 2. Część obwodowa modelu: uzwojenie wzbudzenia



Rys. 3. Część obwodowa modelu: uzwojenie twornika

W modelu obwodowym umieszczono łączniki umożliwiające przełączanie uzwojeń warunkujące zmianę liczby biegunów i prędkości obrotowej silnika.

W celu weryfikacji modelu obliczeniowego wykonano pomiary modelu fizycznego badanego silnika. Pomiary wykonano podczas rozruchu silnika, zmiany prędkości obrotowej, synchronizacji oraz pracy ustalonej dla dwóch stanów obciążenia: $M_{obc}=0,4M_n$ oraz $M_{obc}=0,8M_n$. Wykorzystując opracowany model polowo-obwodowy wykonano obliczenia dla takich samych stanów pracy badanego silnika. Porównanie wielkości obliczonych i pomierzonych pozwala stwierdzić, że opracowany model polowo-obwodowy dwubiegowego silnika synchronicznego jest poprawny [8].

3. Obliczenia synchronizacji

Maksymalną wartość poślizgu s_p , przy którym następuje pewna i szybka synchronizacja, dla dowolnej wartości kąta δ określa zależność [4]:

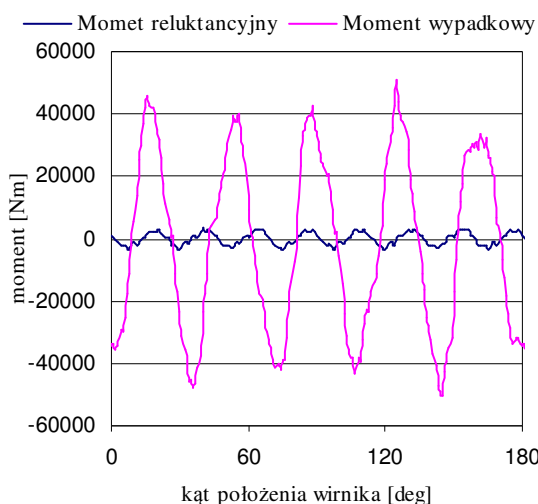
$$s_p < 0,0564 (1/T_m)^{1/2} \quad (1)$$

w której: T_m - to elektromechaniczna stała czasowa układu napędowego, δ - kąt między osią przepływu stojana a osią przepływu wirnika. Stała elektromechaniczna określana jest wzorem:

$$T_m = (J_z \cdot \pi \cdot n) / (30 \cdot M_{max}) \quad (2)$$

w którym: J_z - to zastępczy moment bezwładności, M_{max} - maksymalny moment synchroniczny przy danym prądzie wzbudzenia, n - prędkość synchroniczna silnika.

Zastępcza bezwładność układu napędowego analizowanego silnika wraz z wentylatorem typu WPK 5,3 wynosi $J_z \approx 40\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Obliczenia maksymalnego momentu synchronicznego M_{max} wykonano wykorzystując komercyjne oprogramowanie Quick Field. Dla przyjętej wartości prądu wzbudzenia $I_w = I_{wn}$ wyznaczona maksymalna wartość tego momentu wynosi $M_{max} \approx 50 \text{ kNm}$. Obliczone wykresy wypadkowego momentu synchronicznego oraz momentu reluktancyjnego w funkcji położenia wirnika przedstawiono na rysunku 4.



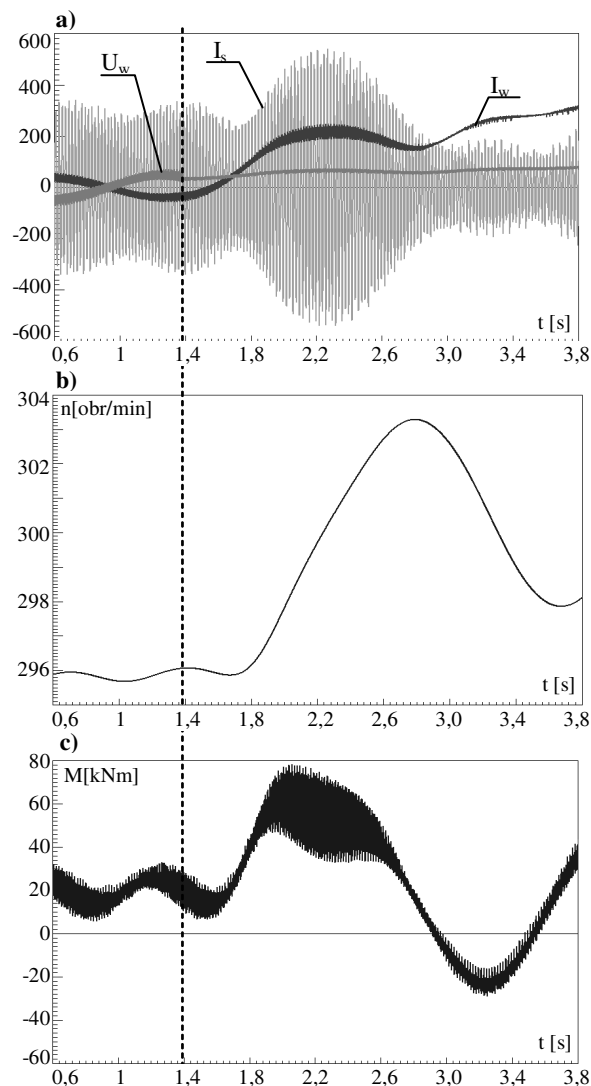
Rys. 4. Zależność wypadkowego momentu synchronicznego oraz momentu reluktancyjnego od położenia wirnika dla $p=10$

Obliczona na podstawie zależności (1) wartość poślizgu dla analizowanego silnika wynosi $s_p=0,0113$. Natomiast wyznaczony na podstawie pomiarów modelu fizycznego poślizg wpadu, przy którym ustala się praca asynchroniczna silnika, przy $M_{obc}=0,4M_n$, wynosi $s_w=0,0133$. Stała czasowa obwodu wzbudzenia wyznaczona obliczeniowo wynosi 2,5 sek. Tak długi czas narastania prądu wzbudzenia powoduje, że wartość powstającego momentu dynamicznego może być zbyt mała by przyspieszyć wirnik do prędkości synchronicznej zanim kąt mocy osiągnie wartość krytyczną. Obliczona z rozwiązania magnetostaticznego w programie QuickField, wartość krytycznego kąta mocy wynosi dla tej prędkości wirowania silnika 75 stopni.

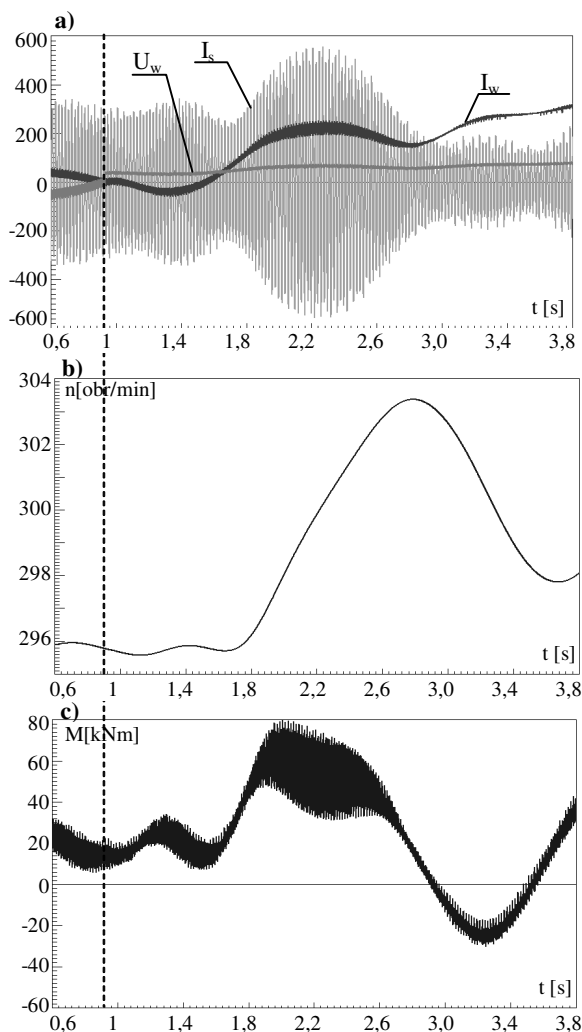
Wykorzystując opracowany model połowo-obwodowy wykonano obliczenia procesu synchronizacji badanego silnika dwubiegowego. W symulacjach założono znamionową wartość napięcia zasilania, znamionową wartość napięcia wzbudzenia $U_w=U_{wn}$ oraz wartość momentu obciążenia równą $M_{obc}=0,4M_n$. Na rysunkach 5 i 6 pokazano obliczone przebiegi prądu fazy A twornika I_s , prądu wzbudzenia I_w oraz napięcia U_w na zaciskach uzwojenia wzbudzenia, momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej podczas synchronizacji silnika przy mniejszej prędkości obrotowej. Linia przerywaną zaznaczono chwilę rozpoczęcia procesu synchronizacji silnika.

Na rysunkach pokazano dwa przypadki synchronizacji dla:

- inicjacji synchronizacji silnika w chwili, gdy wartość napięcia indukowanego na zaciskach uzwojenia wzbudzenia jest dodatnia a kąta δ osiąga wartość bliską (-45) stopni (rys. 5),
- inicjacji synchronizacji silnika w chwili, gdy wartość napięcia indukowanego na zaciskach uzwojenia wzbudzenia zmienia się z ujemnej na dodatnią, co odpowiada kątowi $\delta \approx (-180)$ stopni (rys. 6).



Rys. 5. Synchronizacja silnika rozpoczęta dla wartości kąta δ bliskiej (-45) deg: a) prąd fazy A twornika I_s , prąd wzbudzenia I_w , napięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia U_w , b) prędkość obrotowa, c) moment elektromagnetyczny

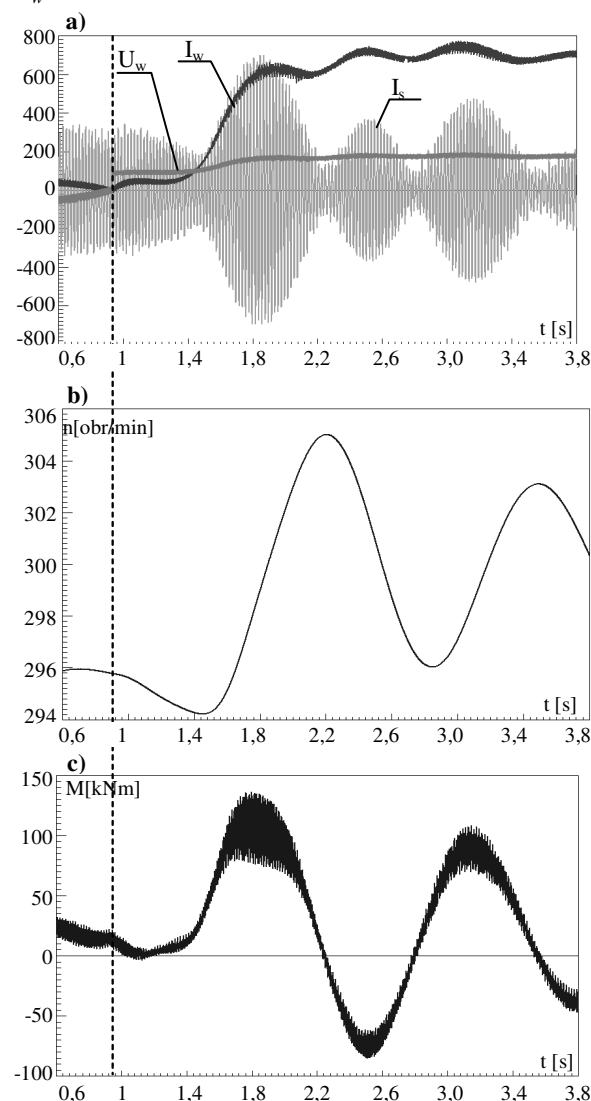


Rys. 6. Synchronizacja silnika w chwili zmiany napięcia uzwojenia wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią, kąt $\delta \approx (-180)$ deg : a) prąd fazy A twornika I_s , prąd wzbudzenia I_w , napięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia U_w , b) prędkość obrotowa c) moment elektromagnetyczny

Na podstawie wyników obliczeń można stwierdzić, że rozpoczęcie synchronizacji w zakresie ujemnej wartości kąta δ , od (-180) do 0 stopni, zwiększa pewność synchronizacji i łagodzi jej przebieg. Pulsacje momentu elektromagnetycznego oraz prądów stojana są mniejsze i mniejszy jest również czas synchronizacji. Dla przyjętego w symulacjach momentu obciążenia $M_{obc} = 0,4M_n$, (występującego w rzeczywistym układzie napędowym wentylatora), można zrezygnować z forsowania prądu wzbudzenia a tym samym zmniejszyć moc urządzeń zasilających uzwojenie wzbudzenia.

Dla większego momentu obciążenia $M_{obc} > 0,4M_n$, należy zwiększyć napięcie wzu-

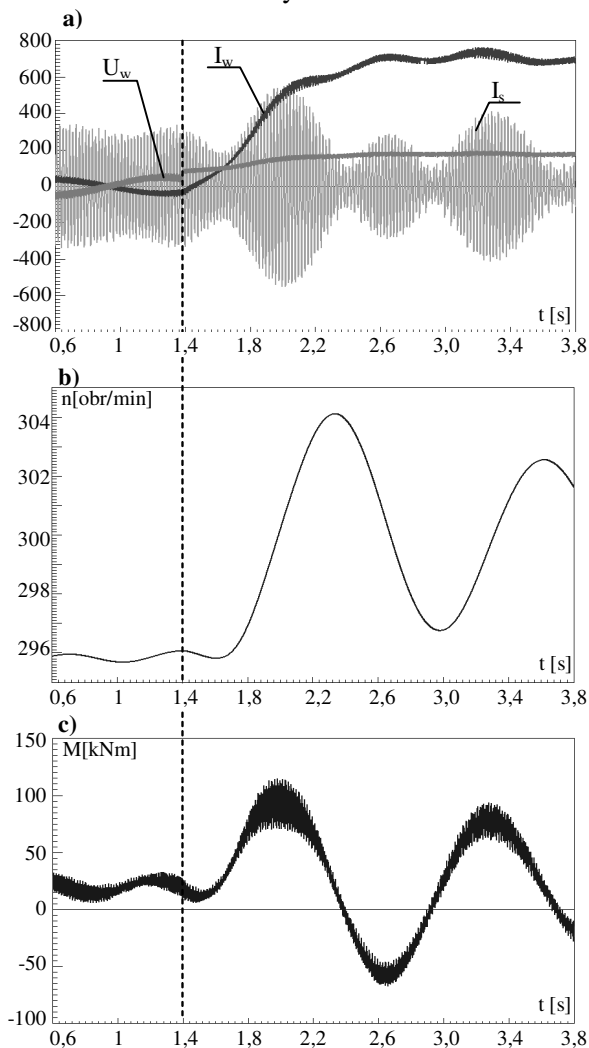
wienia powyżej znamionowego U_{wn} . Na rysunku 7 pokazano obliczone przebiegi prądu fazy A twornika I_s , prądu wzbudzenia I_w oraz napięcia U_w na zaciskach uzwojenia wzbudzenia, momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej podczas synchronizacji rozpoczętej dla wartości kąta δ bliskiej (-180) stopni i napięcia zasilania uzwojenia wzbudzenia $U_w = 180$ V.



Rys. 7. Synchronizacja silnika w chwili zmiany napięcia uzwojenia wzbudzenia z wartości ujemnej na dodatnią, kąt $\delta \approx (-180)$ deg : a) prąd fazy A twornika I_s , prąd wzbudzenia I_w , napięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia U_w , b) prędkość obrotowa c) moment elektromagnetyczny

Większa wartość napięcia stałego zasilającego uzwojenie wzbudzenia pozwala przeforsować indukowane napięcie przemienne i wymusić odpowiedni przepływ prądu wzbudzenia. Załą-

czenie takiego napięcia przy dużym ujemnym kącie δ wytwarza moment hamujący o znaczącej wartości w stosunku do wypadkowego momentu asynchronicznego silnika, powiększa poślizg a synchronizacja odbywa się przy dużych pulsacjach momentu elektromagnetycznego. Ma to niekorzystny wpływ na eksploatację układu napędowego ze względu na występowanie uderów mechanicznych na wale.



Rys. 8. Synchronizacja silnika rozpoczęta dla wartości kąta δ bliskiej (-45) deg: a) prąd fazy A twornika I_s , prąd wzbudzenia I_w , napięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia U_w , b) prędkość obrotowa, c) moment elektromagnetyczny

Na rysunku 8 pokazano obliczone przebiegi prądu fazy A twornika I_s , prądu wzbudzenia I_w oraz napięcia U_w na zaciskach uzwojenia wzbudzenia, momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej podczas synchronizacji rozpoczętej dla wartości kąta δ bliskiej (-45) stopni i napięciu wzbudzenia $U_w = 180$ V. Rozpoczęcie

synchronizacji w przyjętej chwili pozwala prze-forsować napięcie przemienne a wartość powstającego momentu hamującego nie ma istotnego wpływu na przebieg procesu. Występujący wzrost momentu dynamicznego zapewnia skuteczną synchronizację.

4. Wnioski

Na podstawie wykonanych obliczeń polowo-obwodowych pokazano, że dobozem odpowiedniej chwili załączenia napięcia wzbudzenia rozpoczynającej proces synchronizacji można łagodzić przebiegi dynamiczne, zapewnić skuteczną synchronizację silnika bez forsowania napięcia wzbudzenia.

Zwiększenie wartości napięcia wzbudzenia umożliwia synchronizację silnika niezależnie od początkowej chwili inicjacji tego procesu, ale powstają wówczas większe pulsacje momentu elektromagnetycznego, prądów stojana i prędkości chwilowej oraz zwiększa się czas trwania tego procesu.

5. Literatura

- [1]. Antal L., Zawilak J.: *Moment dwubiegowego silnika synchronicznego o przelączalnych uzwojeniach twornika i magneśnicy*, SME 2003, Gdańsk–Jurata, June 9–11, 2003, s. 8.
- [2]. Antal L., Zawilak J.: *Pole magnetyczne synchronicznego silnika jawnobiegunowego o dwóch prędkościach obrotowych*, Prace Nauk. IMiNE. PWr. nr 44, Studia i Mat. nr 19, 1996.
- [3]. Antal L., Zawilak J.: *Wyniki badań dwubiegowego silnika synchronicznego*, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel 2004, nr 68.
- [4]. Bielawski S., *Teoria napędu elektrycznego*, WNT Warszawa 1978.
- [5]. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998r.
- [6]. Terra Analysis Company, QuickField Finite Element Analysis System v.5.1, User's Guide, 2004
- [7]. Zawilak J.: *Uzwojenia zmiennobiegunowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Prace Naukowe IMiNE. PWr. 1986.
- [8]. Zalas P., Zawilak J.: *Synchronizacja silników synchronicznych. Wybór chwili załączenia prądu wzbudzenia*, Prace Nauk. IMiNE. PWr. nr 54, Studia i Materiały nr 23, 2003.

Autorzy

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław
e-mail: pawel.zalas@pwr.wroc.pl
jan.zawilak@pwr.wroc.pl