

Janusz Bialik, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

DWUBIEGOWY SILNIK SYNCHRONICZNY W UJĘCIU POLOWO-OBWODOWYM W RÓŻNYCH STANACH PRACY

TWO SPEED SYNCHRONOUS MOTOR IN FIELD-CIRCUIT FORMULATION IN DIFFERENT STATES OF WORK

Abstract: The work presented calculation results of a two-speed synchronous, silent-pole, high power motor. The calculations based on the examined two dimensional, field-circuit model for the large power motor, type GAe 1510/12p were done. Using the prepared model, calculations of static (no load, load) characteristic as well as dynamic (start up to no load) were compiled. A comparison between the calculated and measured results of physical quantities for load, in these synchronous motor with changing pole number of magnetic field, was presented. The following physical quantities were calculated: the armature and field winding current, electromagnetic torque, flux density and electromagnetic forces for different value of field current, for both rotating speed. The satisfactory convergence between the results of calculations and measurements allows the authors to claim, that the examined model of the motor is correct. It may be therefore accepted, that the described model is useful in evaluation of events occurring in different states of motor operation.

1. Wstęp

Metody modelowania polowo-obwodowego z odwzorowaniem ruchu elementów wirujących pozwalają na dokładne odwzorowanie różnych stanów pracy maszyn elektrycznych [5]. Modele polowo-obwodowe mogą być wykorzystane w procesie projektowania jak również w analizie zjawisk zachodzących w tych maszynach. Modelowanie może dotyczyć przestrzeni dwu- lub trójwymiarowych. Najdokładniejszym modelem jest model trójwymiarowy. Jednakże budowa modelu w przestrzeni trójwymiarowej, a przede wszystkim jego obliczenia są bardzo czasochłonne. Jest to szczególnie trudne przy skomplikowanych strukturach i kształtach modelowanej maszyny. Z tego względu analizy trójwymiarowe stosuje się tam gdzie do odwzorowania zjawisk wystarcza powtarzalny fragment maszyny. W przypadku maszyn niesymetrycznych większe znacznie praktyczne mają modele dwuwymiarowe. W modelach tych można uwzględnić elementy stref czołowych oraz zmiany geometryczne wzdłuż osi maszyny (np. skos żłobków) [2]. Poprawność modelu 2D można sprawdzić porównując charakterystyki maszyny obliczone za jego pomocą z wyznaczonymi pomiarowo badając modele fizyczne maszyn [3]. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki obliczeń dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe1510/12p w różnych stanach jego pracy, a mianowicie rozruchu, biegu jałowego i stanu obciążenia. Maszyny

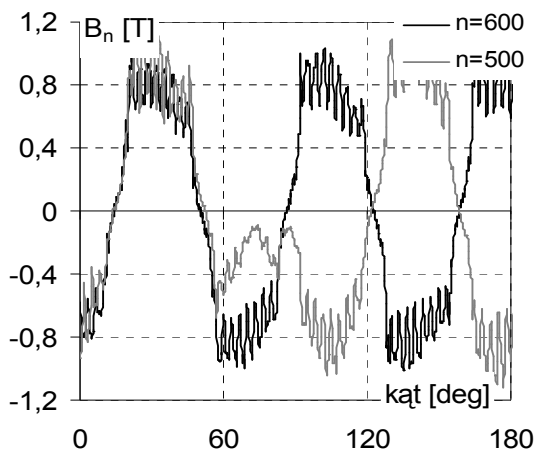
tego typu wykorzystywane są do napędów o wentylatorowej charakterystyce mechanicznej (np. stacjach wentylatorów głównego przewietrzania kopalń podziemnych). W silnikach tych zmianę liczby par biegunów pola magnetycznego uzyskuje się przez przełączenie uzwojenia twornika o odpowiednio rozłożonych grupach fazowych na obwodzie oraz zmianę biegowości odpowiednich biegunów magnesnicy. W literaturze nie ma opracowań dotyczących analizy wpływu konfiguracji uzwojenia twornika i biegowości magnesnicy na parametry i własności silnika synchronicznego. Występujące zjawiska są tym bardziej interesujące w przypadkach, gdy liczba biegunów fizycznych (np. 10) i magnetycznych (np. 12) jest różna.

2. Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego

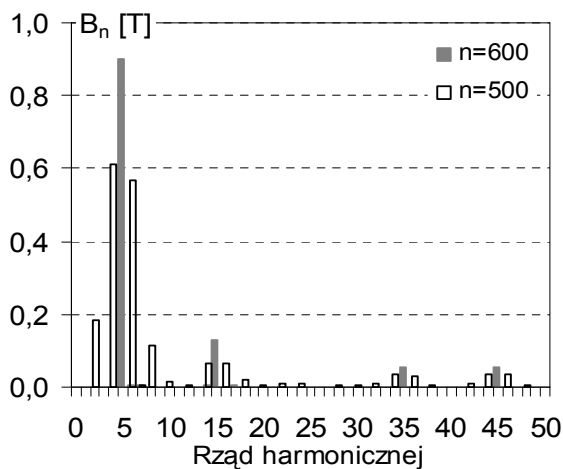
Opracowany dwuwymiarowy model badanego silnika szczegółowo opisano w [1]. Jego część obwodowa uwzględnia parametry elektryczne układów zasilania, obwód klatki tłumiącej oraz przełączalne układy połączeń uzwojeń twornika i wzbudzenia. Część polowa modelu uwzględnia nieliniowość elementów obwodu magnetycznego oraz ruch wirnika. W opracowanym modelu przyjęto stałą wartość rezystancji i indukcyjności połączeń czołowych obwodu stojana i wirnika jak również pierścieni zwierających klatki rozruchowej.

3. Analiza biegu jałowego i stanu obciążenia

Na podstawie opracowanego modelu silnika typu GAe 1510/12p, dla sinusoidalnego napięcia zasilającego, wykonano obliczenia indukcji w szczelinie powietrznej oraz prądów twornika.

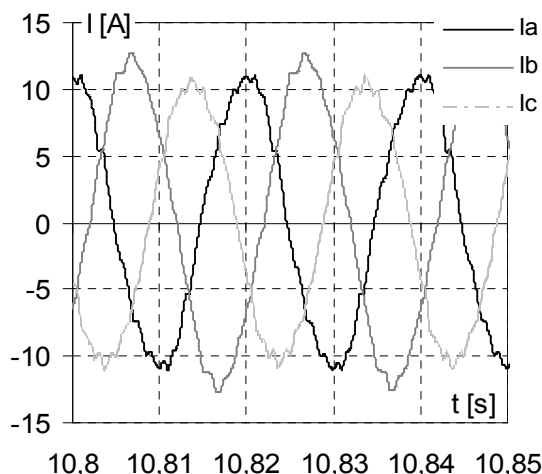


Rys. 1. Obwodowy rozkład składowej normalnej indukcji w szczelinie powietrznej dla obu prędkości obrotowych silnika

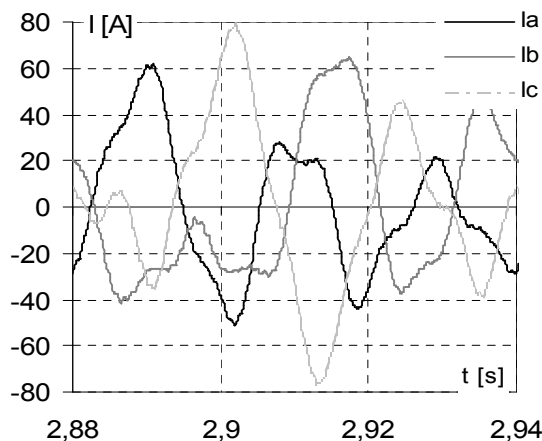


Rys. 2. Widmo składowej normalnej indukcji w szczelinie powietrznej dla obu prędkości obrotowych silnika

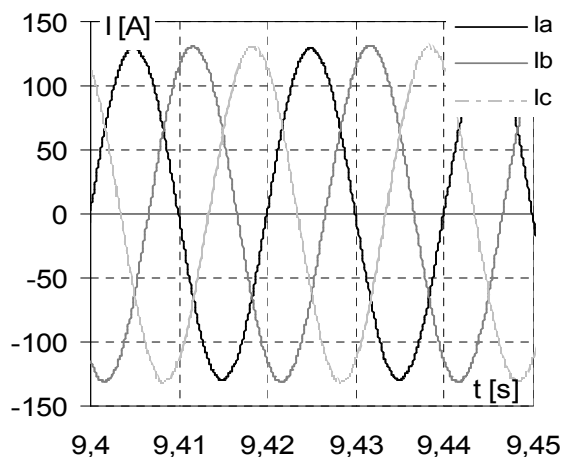
Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono obwodowe rozkłady oraz widma składowych normalnych indukcji w szczelinie powietrznej w stanie obciążenia. Na rysunku 1 można zauważyć znaczne odkształcenie obwodowego rozkładu indukcji od sinusoidy dla mniejszej prędkości obrotowej co uwidacznia się występowaniem harmonicznych w jego widmie (rys.2). Odkształcenia indukcji uzasadniają przebiegi prądów stojana podczas biegu jałowego i stanu obciążenia, przedstawione na rysunkach 3, 4, 5 i 6.



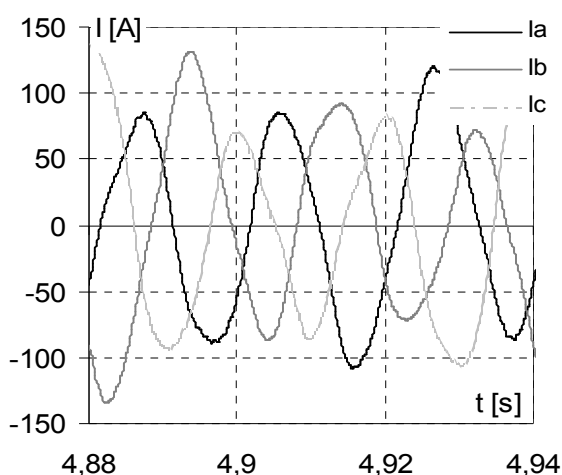
Rys. 3. Prądy twornika silnika dla większej prędkości obrotowej – bieg jałowy, 600 obr/min
Obliczenia wykonano dla idealnego biegu jałowego ($M_{obc}=0$) oraz stanu obciążenia ($M_{obc}=0,9M_n$) przyjmując w obu przypadkach prąd wzbudzenia 180A.



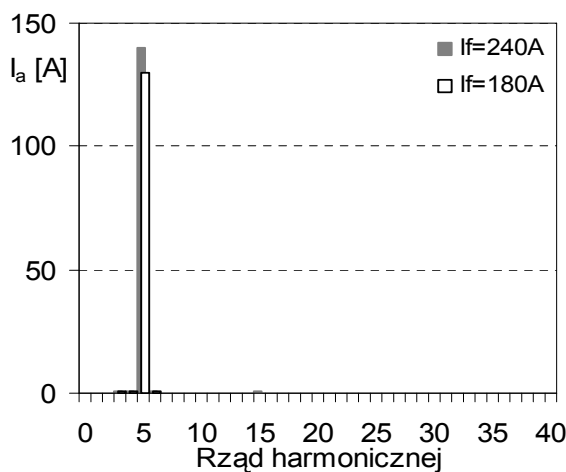
Rys. 4. Prądy twornika silnika dla mniejszej prędkości obrotowej – bieg jałowy, 500 obr/min



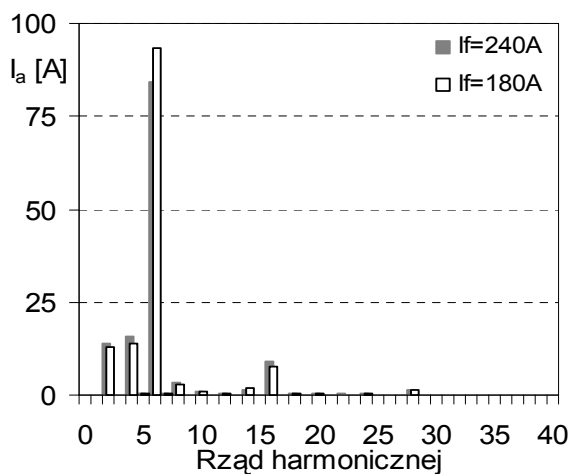
Rys. 5. Prądy twornika silnika dla większej prędkości obrotowej – stan obciążenia, 600 obr/min



Rys. 6. Prądy twornika silnika dla większej prędkości obrotowej – stan obciążenia, 500 obr/min



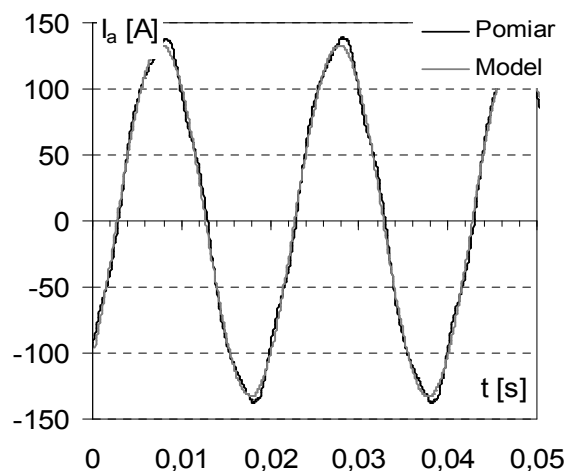
Rys. 7. Widmo prądów twornika dla większej prędkości – stan obciążenia, 600 obr/min



Rys. 8. Widmo prądów twornika dla mniejszej prędkości – stan obciążenia, 500 obr/min

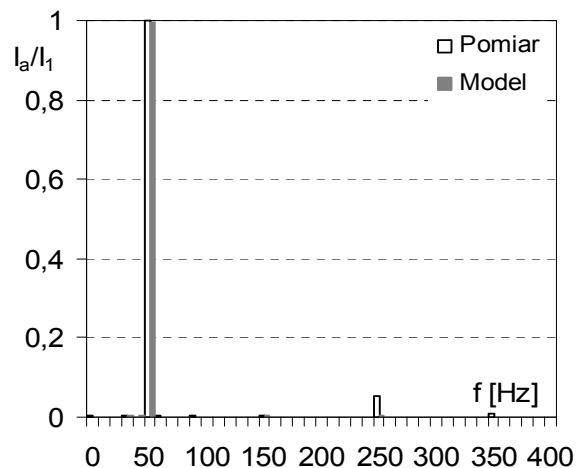
Odształcenia prądów twornika oraz pola magnetycznego w szczelinie powietrznej są więk-

sze dla mniejszej prędkości obrotowej. Ze wzrostem wartości prądu wzbudzenia wartości amplitud poszczególnych harmonicznych w prądach twornika ulegają zmianom (rys. 7 i 8).

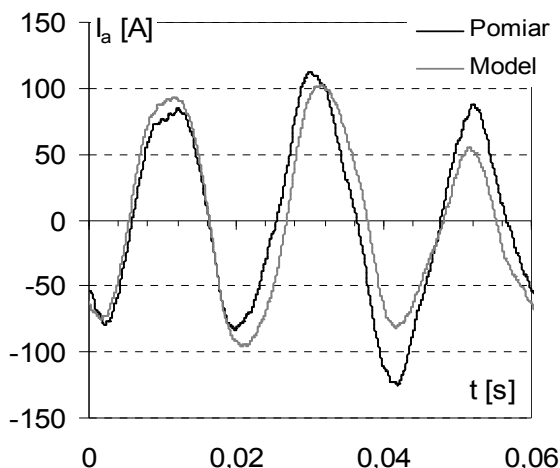


Rys. 9. Przebiegi czasowe obliczonych i pomierzonych prądów twornika dla większej prędkości obrotowej ($n=600$ obr/min)

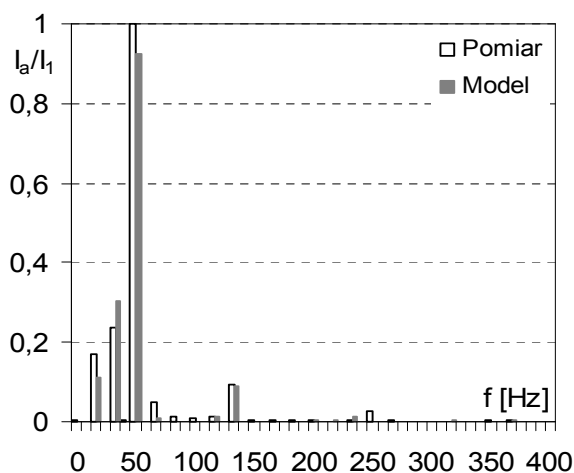
Porównanie wielkości obliczonych i pomierzonych dla analizowanego silnika dwubiegowego zestawiono na rysunkach 9, 10, 11 i 12. Symulacje oraz rejestracje przebiegów dokonano dla: obciążenia równego 75% znamionowego oraz prądu wzbudzenia równego $I_f=260$ A dla większej oraz $I_f=230$ A dla mniejszej prędkości obrotowej. Na rysunkach 9, 11 przedstawiono przebiegi czasowe, natomiast na rysunkach 10 i 12 wyniki analizy harmonicznej prądu twornika, odpowiednio dla większej i mniejszej prędkości obrotowej wirnika.



Rys. 10. Harmoniczne obliczonych i pomierzonych prądów twornika dla większej prędkości obrotowej ($n=600$ obr/min)



Rys. 11. Przebiegi czasowe obliczonych i pomierzonych prądów fazy A twornika dla mniejszej prędkości obrotowej ($n=500$ obr/min)



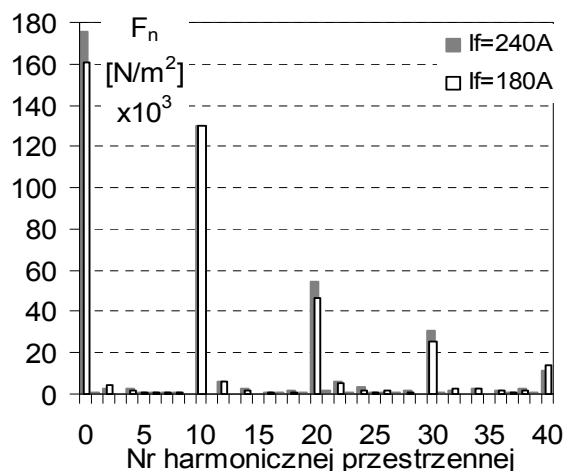
Rys. 12. Harmoniczne obliczonych i pomierzonych prądów twornika dla mniejszej prędkości obrotowej ($n=500$ obr/min)

Ponieważ prądy we wszystkich fazach są podobne to na rysunkach pokazano przebiegi dotyczące jednej fazy uzwojenia twornika. W przedstawionym zakresie częstotliwości różnice między wynikami pomiarów a obliczeń nie są większe niż: 3% dla większej i 9% dla mniejszej prędkości obrotowej.

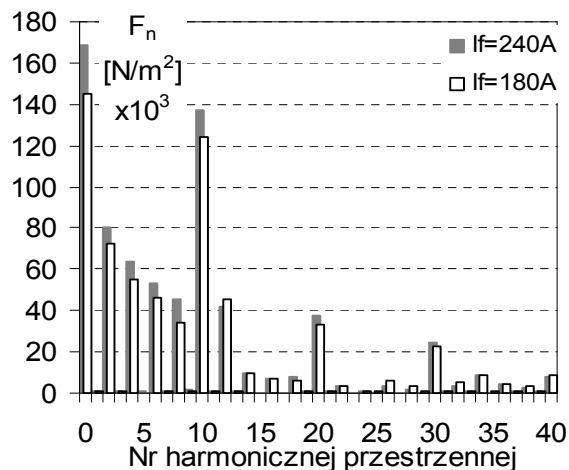
4. Siły pochodzenia elektromagnetycznego w dwubiegowych silnikach synchronicznych

Korzystając z tensora naprężeń Maxwell'a [4] wykonano obliczenia składowych normalnych sił pochodzenia elektromagnetycznego (ciśnienia magnetycznego) działających na wirnik

omawianej maszyny. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 13 i 14.



Rys. 13. Widmo składowej radialnej siły działającej na wirnik maszyny dla większej prędkości obrotowej ($n=600$ obr/min)

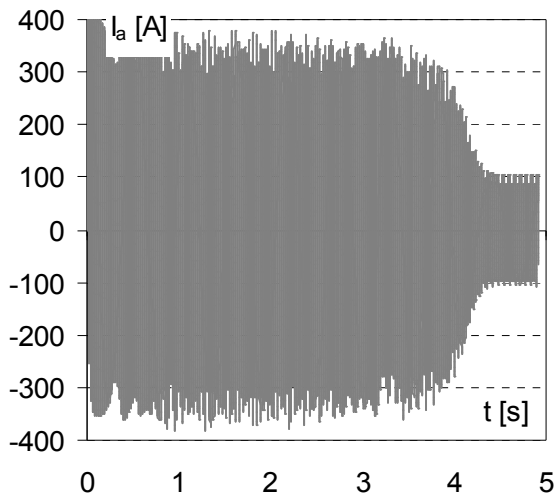


Rys. 14. Widmo składowej radialnej siły działającej na wirnik maszyny dla mniejszej prędkości obrotowej ($n=500$ obr/min)

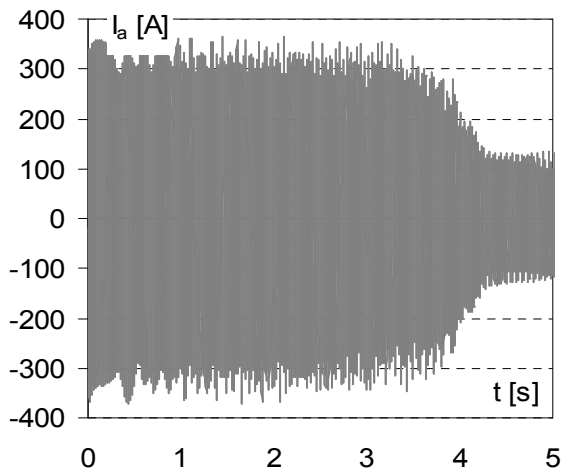
Podobnie jak w przebiegach prądów i indukcji (rys. 2, 11 i 12) amplitudy poszczególnych harmonicznych sił ulegają zmianom ze wzrostem wartości prądu wzbudzenia.

5. Analiza rozruchów silnika

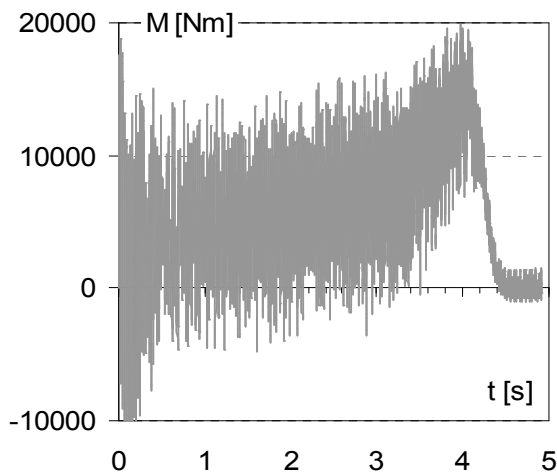
Na rysunkach 15, 17, 18 i 20 pokazano obliczone przebiegi momentu elektromagnetycznego i prądu twornika podczas asynchronicznego rozruchu bezpośredniego do każdej z dwóch prędkości obrotowych.



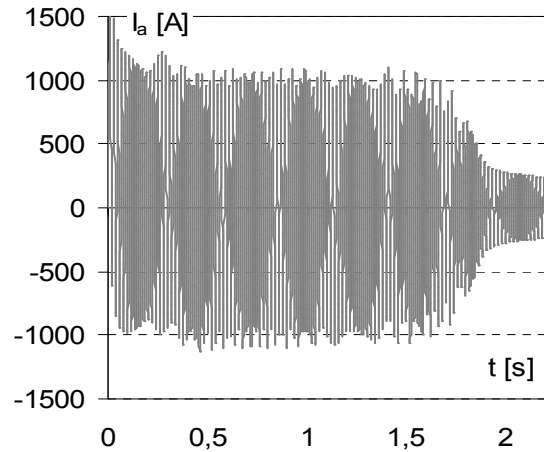
Rys. 15. Obliczony prąd fazy A twornika podczas rozruchu asynchronicznego dla mniejszej prędkości obrotowej ($n=500$ obr/min)



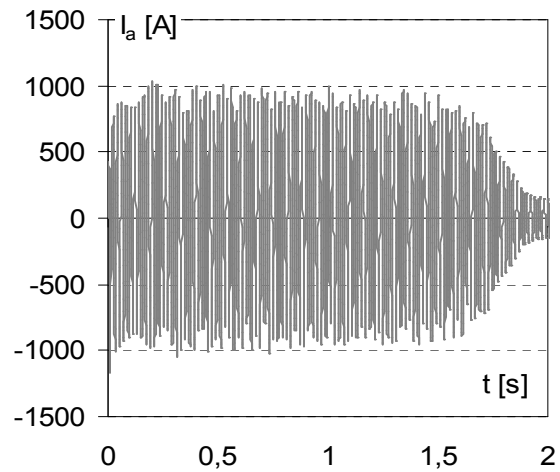
Rys. 16. Zmierzony prąd fazy A twornika podczas rozruchu asynchronicznego dla mniejszej prędkości obrotowej ($n=500$ obr/min)



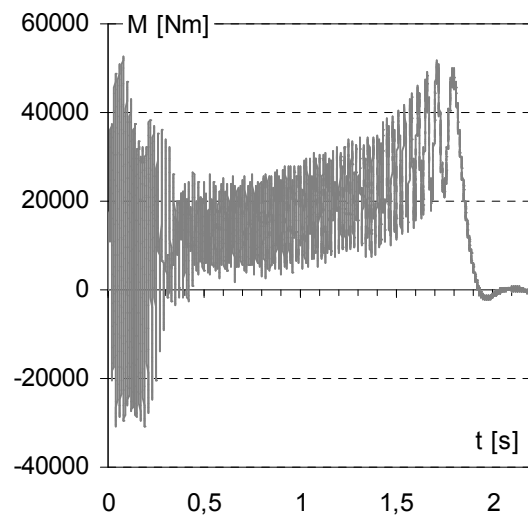
Rys. 17. Obliczony moment elektromagnetyczny podczas rozruchu asynchronicznego dla mniejszej prędkości obrotowej ($n=500$ obr/min)



Rys. 18. Obliczony prąd fazy A twornika podczas rozruchu asynchronicznego dla większej prędkości obrotowej ($n=600$ obr/min)



Rys. 19. Zmierzony prąd fazy A twornika podczas rozruchu asynchronicznego dla większej prędkości obrotowej ($n=600$ obr/min)



Rys. 20. Obliczony moment elektromagnetyczny podczas rozruchu asynchronicznego dla większej prędkości obrotowej ($n=600$ obr/min)

Czas rozruchu wynoszący 4,1 s dla mniejszej prędkości obrotowej i 1,9 s dla większej prędkości jest zbliżony do czasu rozruchu uzyskanego podczas badań na stacji prób zakładu wytwórczego (rys. 16 i 19). Symulacje oraz pomiary zostały wykonane dla stanu jałowego silnika.

6. Podsumowanie

Opracowany model polowo-obwodowy trójfazowego, jednonuzwojeniowego, dwubiegowego silnika synchronicznego z zadowalającą dokładnością opisuje stany ustalone oraz stany przejściowe. Różnice między obliczonymi a pomierzonymi prądami dla obu prędkości obrotowych są mniejsze niż 9 %. Opracowany model może być wykorzystany do optymalizacji konstrukcji silników dwubiegowych oraz analizy zjawisk mechanicznych i cieplnych, występujących w maszynach tego typu.

7. Literatura

- [1]. Bialik J., Zawilak J., Antal L., *Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, Studia i Materiały, Nr 24, Wrocław, 2004, s. 43-54
- [2]. Demenko A., *Polowe metody analizy maszyn elektrycznych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria Elektryka z.176, 2001, 41–58.
- [3]. Hameyer K., Belmans R., De Weerd R., Tuinman E., *Finite element analysis of steady state behavior of squirrel cage induction motors compared with measurements*, IEEE-Transactions on Magnetics, part II, No.2, Vol.33, March, 1997; p. 2093-2096
- [4]. Terra Analysis Company, QuickField Finite Element Analysis System v.5.1, User's Guide, 2004
- [5]. Zhou P., Stanton S., Cendes Z. J., *Dynamic Modeling of Electric Machines*, www.ansoft.com

Adres Autorów:

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

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2004-2006 jako projekt badawczy Nr 3 T10A 005 26.