

Roman Miksiewicz
Politechnika Śląska, Gliwice

MODELOWANIE POLOWE SILNIKÓW JEDNOFAZOWYCH Z KONDENSATOREM ROBOCZYM O PRZEŁĄCZALNYCH UZWOJENIACH

FIELD MODELLING OF SINGLE PHASE CAPACITOR MOTOR WITH TAPPED WINDINGS

Abstract: The paper presents results of field calculations for a single phase capacitor motor with tapped stator windings. The Sh71-2A motor magnetic circuit windings for two speeds were designed. The 2D computational motor model was worked out and calculations of the motor transient state during starting were performed. The quasi-static motor characteristics for two connection systems were determined. Computation results of the starting torque as a function of the rotor position at the locked rotor are presented. The static characteristics computed are compared with the measurement results of a prototype motor.

1. Wstęp

Silniki jednofazowe z kondensatorem roboczym i przełączalnymi uzwojeniami stojana stosowane są w nieskomplikowanych urządzeniach, najczęściej do napędu wentylatorów. W takim przypadku, stosunkowo niewielka zmiana prędkości obrotowej powoduje znaczącą zmianę wydatku powietrza wentylatora. Znanych jest kilka układów połączeń umożliwiających uzyskanie dwóch lub trzech prędkości obrotowych. Zmiana charakterystyki elektromechanicznej silnika $T=f(n)$ (w ograniczonym jednak zakresie), spowodowana jest w takich układach zmianą składowych pól wirujących pochodzących od harmonicznych przestrzennych. Nie ma więc potrzeby stosowania elementów energoelektronicznych [1, 2] do zasilania silników w tego typu napędach.

W analizie teoretycznej silników jednofazowych o uzwojeniach przesuniętych przestrzenie o kąt elektryczny 90° stosuje się najczęściej teorię składowych symetrycznych dwu- lub czterofazowych [3, 4, 6]. Z założenia tej teorii konieczne jest zastosowanie zasady superpozycji, co w obwodach magnetycznych jest dużym uproszczeniem. Znacznym uproszczeniem jest ponadto przyjmowanie stałych oraz takich samych wartości parametrów schematu zastępczego dla składowych symetrycznych zgodnych i przeciwnych. W obliczeniach projektowych konieczne jest również uwzględnienie dodatkowo przynajmniej 3-ciej harmonicznej przestrzennej, która ma duży wpływ na charakterystykę mechaniczną silnika. W wyniku wymienionych uproszczeń, obliczenia obwodowe są

obarczone dużymi błędami. Przy projektowaniu stosuje się różnego rodzaju „współczynniki” celem uzyskania wystarczającej zbieżności wyników obliczeń z pomiarami.

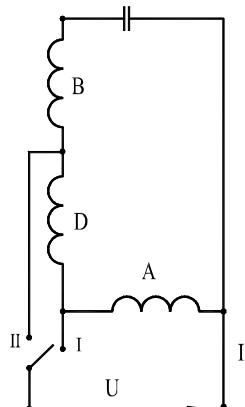
Modelowanie polowe maszyn elektrycznych daje lepsze rezultaty, gdyż umożliwia uwzględnienie nieliniowości obwodu magnetycznego oraz zjawisk związanych z rozkładem pola w maszynie i nierównomiernego rozptyłu prądów w prętach klatki wirnika. Obliczenia polowe 2-wymiarowe wymagają również przyjęcia pewnych uproszczeń, a mianowicie: pominięcia strat w żelazie, pominięcia skosu wirnika oraz nie uwzględnienia w obliczeniach czoł uzwojeń i efektów skrajnych. Ważnym również czynnikiem w obliczeniach maszyn małej mocy jest stosunek długości pakietu do jego średnicy. Zwykle w maszynach małej mocy długość rdzenia jest kilkakrotnie mniejsza od średnicy, wobec tego przyjęcie modelu 2-wymiarowego jest również pewnym uproszczeniem.

Celem pracy było przeprowadzenie obliczeń polowych 2-wymiarowych i porównanie właściwości silnika z przełączalnymi uzwojeniami stojana.

2. Projekt uzwojeń silnika

Wykorzystując obwód magnetyczny silnika 3-fazowego typu Sh71-2A, zaprojektowano uzwojenia stojana umożliwiające przełączanie tych uzwojeń. Jako uzwojenie przełączalne przyjęto uzwojenie dodatkowe D, rozmieszczone w tych samych żłobkach co uzwojenie pomocnicze B z szeregowo włączonym kon-

densatorem. Schemat połączeń uzwojeń stojana silnika przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Układ zasilania silnika o przelączalnych uzwojeniach

Podstawowym kryterium projektowym było uzyskanie takich charakterystyk mechanicznych aby przy zadanej charakterystyce wentylatorowej obciążenia uzyskać możliwe duże różnice w prędkościach obrotowych. Decyduje o tym stosunek zwojów fazy dodatkowej D do zwojów fazy pomocniczej B.

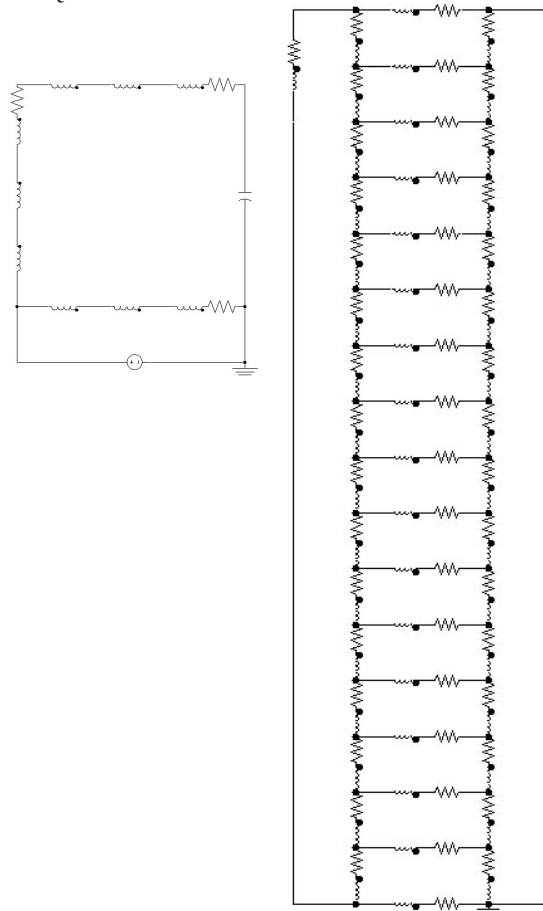
3. Połowy model obliczeniowy silnika

Wykonując obliczenia dla połowego modelu 2-wymiarowego, konieczne było przyjęcie następujących uproszczeń:

- przyjęto pręty wirnika bez skosu,
- pominięto straty w rdzeniu magnetycznym i straty mechaniczne.

Obliczenia przeprowadzono stosując metodę elementów skończonych w programie Maxwell 2D przy pomocy solvera „Transient”. W podprogramie „Schematic Capture” uwzględniono warunki zasilania i połączenia uzwojeń. Czoła uzwojeń stojana oraz prętów wirnika uwzględniono wprowadzając do schematu obwodów stojana i wirnika odpowiednio ich rezystancje i indukcyjności rozproszeń, wyznaczone obwodowo. Na rys. 2 przedstawiono układ połączeń uzwojeń silnika, opracowany w programie Maxwell 2D. Zawiera on dwa oddzielne obwody: obwód zasilania uzwojeń stojana oraz klatkę wirnika zawierającą tyle obwodów ile wynosi liczba prętów klatki. Solver „Transient” umożliwia wyznaczenie przebiegów czasowych prądów, momentu, prędkości w stanach nieustalonych, np. podczas rozruchu silnika. Przy odpowiednio powiększonym momencie bezwładności można wyznaczyć quasi-

statyczne charakterystyki wartości średniej momentu oraz wartości skuteczne prądów uzwojeń w funkcji prędkości. Przy pomocy tego samego solvera możliwe jest również wyznaczenie charakterystyki np. momentu przy zatrzymanym wirniku w funkcji położenia wirnika, zadając niewielką, stałą prędkość obrotową wirnika.



Rys. 2. Układ połączeń uzwojeń stojana (I bieg) i klatki wirnika w programie Maxwell

Ponieważ moment elektromagnetyczny zawiera składową pulsującą o dwukrotnej częstotliwości napięcia zasilania, wymaga zmniejszenia kroku obliczeniowego i zwiększenia czasu obliczeń w stosunku do zasilania symetrycznego. Gdy obwód magnetyczny zawiera półotwarte żłobki stojana i wirnika powstają dodatkowe momenty pasożytnicze synchroniczne, które poza ich prędkością synchroniczną, wytwarzają momenty pulsujące o zmiennej częstotliwości. Wówczas obliczenia wymagają dalszego, znaczącego zmniejszenia kroku obliczeń. Obliczenia wykonano dla obu układów połączeń uzwojeń stojana.

4. Wyniki obliczeń silnika dla stanów nieustalonych

Obliczenia stanu nieustalonego przeprowadzono dla rozruchu silnika o powiększonym momencie bezwładności. W wyniku obliczeń wyznaczono przebiegi czasowe:

- momentu elektromagnetycznego (rys.3),
- prędkości obrotowej (rys.4),
- prądów uzwojeń stojana (rys.6),
- prądów w prętach klatki wirnika.

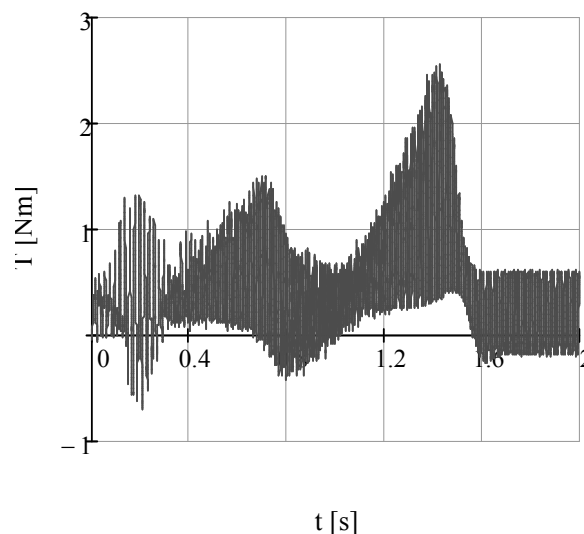
Przebieg czasowy momentu ma charakter silnie pulsujący i występuje znaczny udział składowej przemiennej. Aby otrzymać na tej podstawie quasi-statyczną charakterystykę mechaniczną silnika w obliczeniach średniej wartości momentu zastosowano procedurę średniej ruchomej „ksmooth” programu Mathcad. Procedura ta zwraca wektor średnich ruchomych dla zadanego wektora wejściowego. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę uśrednionej wartości momentu w funkcji prędkości obrotowej. „Siodło” występujące na charakterystyce momentu wynika ze znacznego udziału trzeciej harmonicznej przestrzennej w rozkładzie indukcji w szczelinie powietrznej. W ten sposób można wyznaczyć minimalną wartość momentu podczas rozruchu silnika.

Celem wyznaczenia ruchomych wartości skutecznych prądów I_{RMS} , wykonano obliczenia wg zależności (1):

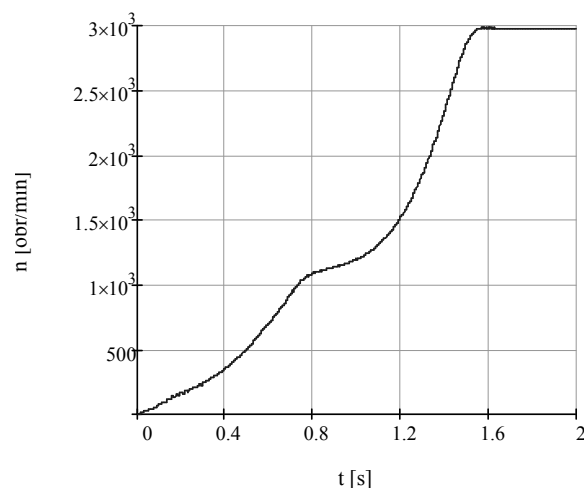
$$I_{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(x)^2 dx} \quad (1)$$

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi czasowe prądów: $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_s(t)$ oraz charakterystyki wartości skutecznych tych prądów w funkcji prędkości obrotowej: $I_A = f(n)$, $I_B = f(n)$ oraz prądu pobieranego z sieci $I_s = f(n)$. W taki sposób możliwe jest wyznaczenie kompletnych charakterystyk statycznych silnika dla obu układów połączeń.

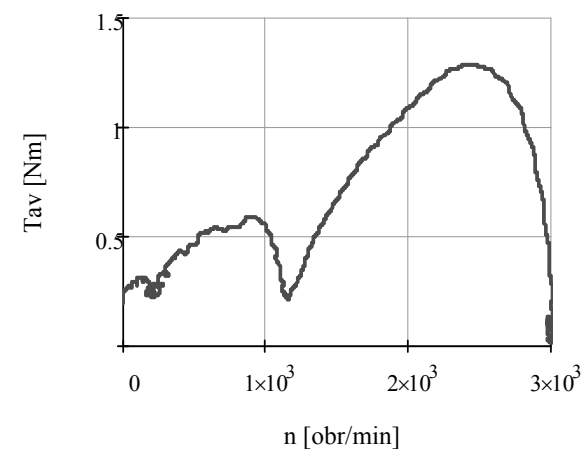
Dla porównania, na rys. 7, przedstawiono quasi-statyczne charakterystyki mechaniczne silnika dla obu układów połączeń.



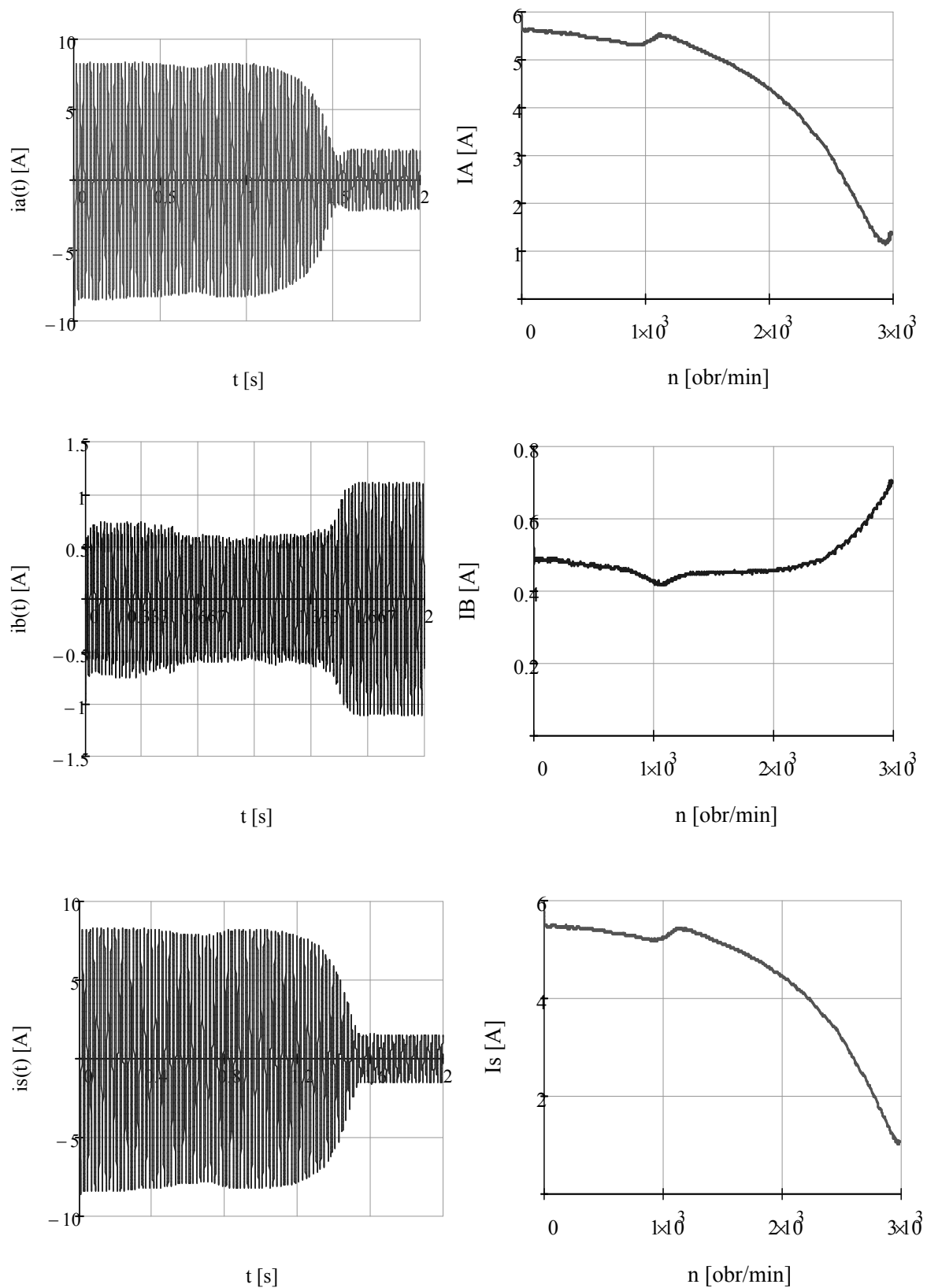
Rys. 3. Przebieg czasowy momentu obrotowej podczas rozruchu silnika dla I biegu



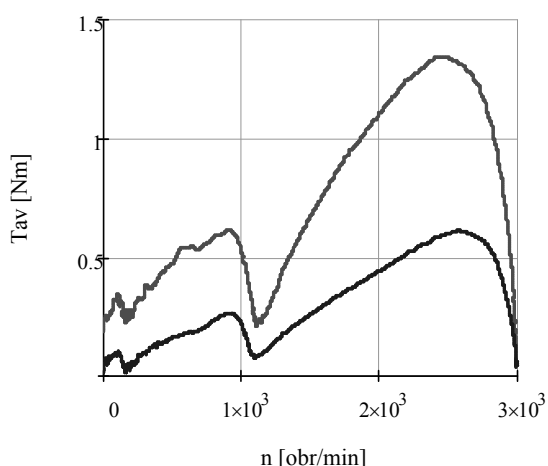
Rys. 4. Przebieg czasowy prędkości obrotowej podczas rozruchu silnika dla I biegu



Rys. 5. Charakterystyka uśrednionego momentu w funkcji prędkości obrotowej dla I biegu

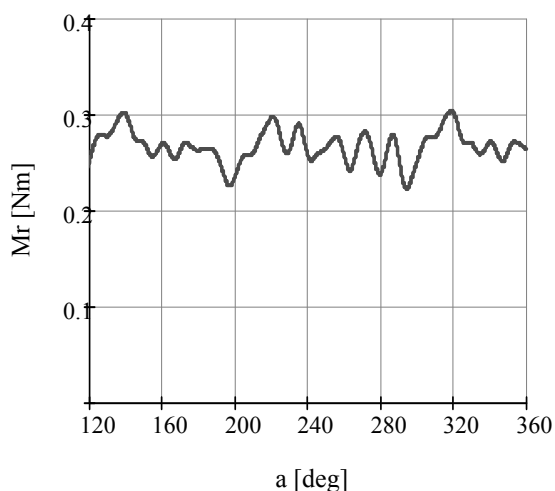


Rys. 6. Przebiegi czasowe prądów fazowych oraz prądu pobieranego z sieci podczas rozruchu silnika, oraz charakterystyki ich wartości skutecznych w funkcji prędkości obrotowe, dla I biegu



Rys. 7. Charakterystyki uśrednionego momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości obrotowej dla I i II biegu

Charakterystykę średniego momentu przy zatrzymanym wirniku w funkcji jego położenia przedstawiono na rys. 8, z którego wynika, że w silniku tego typu występuje duża zależność momentu od położenia, a w tym przypadku okres wynosi 180° .



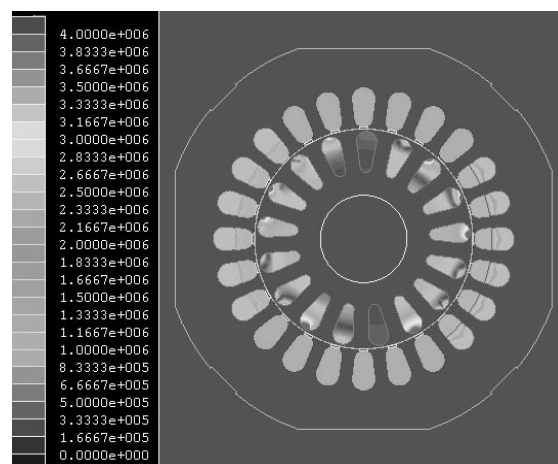
Rys. 8. Średnia wartość momentu przy zatrzymanym wirniku w funkcji położenia wirnika, dla I biegu

Dla oceny ilościowych zmian momentu wyznaczono jego względną wartość, odniesioną do momentu średniego T_{av} :

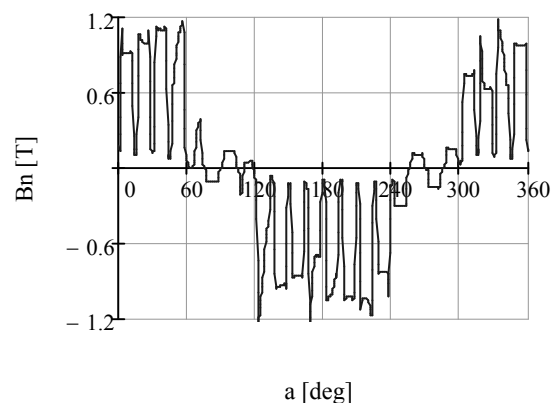
$$\varepsilon = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{av}} 100 \quad (2)$$

Obliczona względna zmiana momentu dla I biegu wynosi $\varepsilon = 30.1\%$. W rzeczywistym silniku z zastosowaniem skosu, wartość ta będzie mniejsza.

Dla celów projektowych ważne jest wykorzystanie obwodu elektromagnetycznego silnika. Pomocne są w tym przypadku rozkłady indukcji oraz gęstości prądów w uzwojeniach. Dla każdej chwili czasowej (prędkości obrotowej) można uzyskać tego typu rozkłady. Przykładowo, na rys. 9 przedstawiono rozkłady gęstości prądów w uzwojeniach, natomiast na rys. 10 rozkład składowej normalnej indukcji w szczelinie dla prędkości 2973 obr/min.



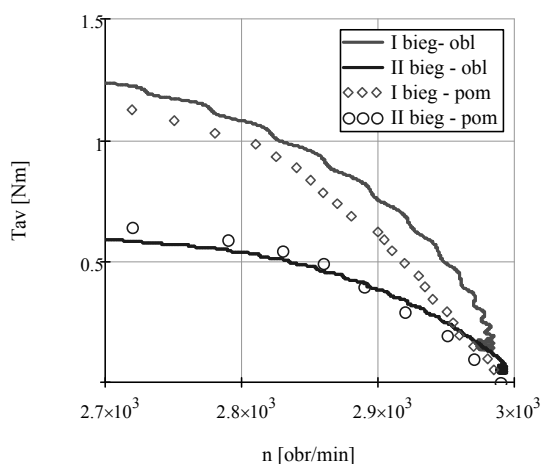
Rys. 9. Rozkład gęstości prądów w uzwojeniach silnika dla prędkości obrotowej 2973 obr/min



Rys. 10. Rozkład składowej normalnej indukcji w szczelinie dla prędkości 2973 obr/min

5. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów

Na rys. 11 przedstawiono, obliczone i zmierzone w pewnym zakresie, charakterystyki średniego momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości obrotowej dla silnika prototypowego [5]. Porównanie to wskazuje na dobrą zbieżność wyników obliczeń i pomiarów dla II biegu silnika, gorszą dla I biegu.



Rys. 10. Obliczone i zmierzone charakterystyki momentu w funkcji prędkości dla I i II biegu

6. Wnioski

Różnice pomiędzy charakterystyką otrzymaną w wyniku obliczeń i charakterystyką zmierzoną wynikają głównie z pominięcia skosu prętów wirnika w obliczeniach oraz przyjętego modelu 2-wymiarowego, w którym pominięto efekty skrajne. Elementy skrajne silnika częściowo uwzględniono przez wprowadzenie do obwodu stojana i wirnika rezystancji i indukcyjności rozproszeń czoł uzwojeń. Wpływ przyjętych uproszczeń należałoby zweryfikować przy pomocy modelu 3-wymiarowego.

Ze względu na dużą czasochłonność na etapie przygotowania modeli dla wielowariantowych obliczeń projektowych, obliczenia 3D wymagają dużych mocy obliczeniowych komputera. Na obecnym etapie, wykonanie optymalizacji numerycznej z wykorzystaniem takiego modelu jest praktycznie niemożliwe, docelowo konieczne, szczególnie dla małych maszyn. W tej sytuacji modele 2-wymiarowe mogą być bardziej przydatne w obliczeniach projektowych.

Literatura

- [1]. Blaabjerg F., Lungenau F., Skaug K., Aupke A.: *Comparison of Variable Speed Drives for Single-Phase Induction Motors*. Proceedings of Power Conversion Conference, PCC Osaka, 2-5 April 2002, pp.1328-1333
- [2]. Julian A.L., Wallace R.S., Sood P.K.: *Multi-Speed Control of Single-Phase Induction Motors for Blower Applications*. IEE Transactions of Power Electronics, Vol.10, No 1, January 1995, pp.72-77
- [3]. Kluszczyński K, Miksiewicz R.: *Zastosowanie metody 2- i 4- fazowych symetrycznych do analizy i projektowania jednofazowych silników z kondensatorem pracy*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka z.104, str.129-140, Gliwice 1988.
- [4]. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: *Performance calculations and design of single-phase capacitor motor according to 2-phase and 4-phase symmetrical components*. Proc. of International Conference on Electrical Machines ICEM 88, pp.441-446, Pisa, Italy 1988.
- [5]. Południk T.: *Projekt, wykonanie i badania 1-fazowego silnika indukcyjnego z kondensatorem pracy o przelączalnych uzwojeniach stojana*. Praca dyplomowa inżynierska. Gliwice 2007
- [6]. Tozune A.: *Design method for L- and T-connected tapped winding capacitor motors*. IEE Proceedings. Vol.136, Pt.B, No 1, January 1989, pp.11-18.
- [7]. Schreier L., Bendl J., Chomát M.: *Contribution to analysis of steady-state operation of single-phase induction machines*. Proceedings of International Conference on Low Voltage Electrical Machines, Brno, 2007, pp. 88-91.

Autor

Dr inż. Roman Miksiewicz. Politechnika Śląska. Instytut Elektrotechniki i Informatyki. Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie. Gliwice, ul. Akademicka 10a, tel.322372844, e-mail: Roman.Miksiewicz@polsl.pl

