

Tomasz Wolnik

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

SILNIK INDUKCYJNY TARCZOWY

AXIAL FLUX INDUCTION MACHINE

Streszczenie: W niniejszym artykule omówiono konstrukcję obwodu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego tarczowego z jednym rdzeniem stojana oraz jedną tarczą wirnika. Przedstawiono schemat zastępczy silnika, na bazie którego opracowano algorytm obliczeń analitycznych. Opracowany algorytm pozwala na wyznaczenie wybranych charakterystyk silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości napięcia zasilania i częstotliwości. W publikacji zaprezentowano wyniki obliczeń analitycznych oraz dodatkowo wyniki obliczeń metodą elementów skończonych na modelu trójwymiarowym. Ponadto, w pracy omówiono wybrane problemy tego typu konstrukcji obwodu elektromagnetycznego związane z niesymetrią szczeliny powietrznej.

Abstract: This paper discusses construction of electromagnetic circuit of axial flux induction motor with one rotor and one stator. The equivalent circuit of the motor is shown. On this basis was developed the algorithm of analytical calculation which allows to prepare selected characteristic. In addition, the article presents the result of analytical calculations and also the result of FEM calculation for 3-dimensional model. Moreover, the paper discusses some problems of this type of construction associated with the asymmetry of the magnetic air gap.

Słowa kluczowe: silniki tarczowe, silniki indukcyjne, obliczenia elektromagnetyczne

Keywords: axial flux motors, induction motors, electromagnetic calculations

1. Wstęp

Większość publikowanych w ostatnim czasie prac dotyczących konstrukcji silników tarczowych prezentuje silniki prądu stałego lub silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi, w tym głównie magnesami neodymowymi [4,6,7,8,9,13]. Ze względu jednak na stale rosnące ceny magnesów neodymowych, których monopolistą światowym są Chiny należy mieć na uwadze rozwój tarczowych maszyn elektrycznych o niższym koszcie wykonania i przewidywalnych cenach poszczególnych podzespołów obwodu elektromagnetycznego. Obecnie cena magnesów neodymowych jest wysoka i rzutuje w znacznym stopniu na koszt całego napędu. Poza tym, szerokie stosowanie napędów, w których cena kluczowego podzespołu obwodu elektromagnetycznego jest uzależniona od jednego podmiotu na rynku niesie ze sobą pewne ryzyko. Nie znaczy to bynajmniej, aby ograniczyć działania mające na celu rozwój maszyn z magnesami trwałymi, jednakże równolegle należy prowadzić prace pozwalające na rozwój rozwiązań alternatywnych. Do najprostszych, najbardziej niezawodnych, a jednocześnie najtańszych w produkcji konstrukcji maszyn elektrycznych wirujących należą oczywiście maszyny indukcyjne klatkowe cylindryczne. Oprócz cylindrycznego kształ-

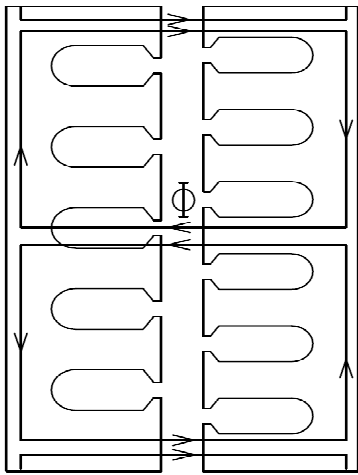
towania obwodu elektromagnetycznego, istnieją również silniki nazywane silnikami tarczowymi lub dyskowymi. Szczególną zaletą tego rodzaju konstrukcji jest możliwość ograniczenia długości osiowej maszyny, co w wielu aplikacjach jest ważnym kryterium doboru silnika do układu napędowego [13].

W niniejszym artykule przedstawiono konstrukcję modelowego obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego klatkowego o mocy znamionowej $P=1.5$ kW, znamionowym napięciu zasilania 400V i ilości biegunów magnetycznych $2p=6$. Przedstawiono trójwymiarowy model obliczeniowy silnika, omówiono algorytm obliczeń analitycznych oraz zaprezentowano obliczeniowe charakterystyki w różnych stanach pracy maszyny. Ponadto, omówione zostały wybrane problemy tego rodzaju konstrukcji obwodu elektromagnetycznego związane z niesymetrią szczeliny powietrznej.

2. Model obwodu elektromagnetycznego

Dwuwymiarowy model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego indukcyjnego z jednym rdzeniem stojana i jednym rdzeniem wirnika przedstawiono na rys.1. Zarówno w przypadku silników klatkowych cylindrycznych, jak i silników klatkowych tarczowych

zasada przetwarzania energii elektrycznej na energię mechaniczną jest taka sama. W rdzeniu stojana znajduje się m-fazowe uzwojenie twornika, wytwarzające strumień magnetyczny stojana ϕ_1 . W rdzeniu wirnika natomiast, umieszczone jest uzwojenie klatkowe, którego pręty przecinane są przez wirujące pole magnetyczne kołowe, wytworzone przez uzwojenie twornika. W efekcie tego, w uzwojeniu klatkowym płynie prąd wytwarzający strumień magnetyczny wirnika ϕ_2 . Obydwa strumienie magnetyczne tworzą główny strumień magnetyczny ϕ , powodujący powstawanie momentu elektromagnetycznego w szczeliny powietrznej.



Rys. 1. Dwuwymiarowy model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego indukcyjnego z jedną tarczą wirnika i jedną tarczą stojana

O ile podstawowa zasada działania obu rodzajów maszyn jest taka sama, o tyle sposób projektowania i obliczenia obwodu elektromagnetycznego różnią się. W przypadku silników cylindrycznych przyjmuje się, że poszczególne drogi magnetyczne w przekroju obwodu elektromagnetycznego są takie same wzdłuż całej długości silnika. Takiego założenia nie można już przyjąć w przypadku silników tarczowych, w których długości dróg magnetycznych są funkcją zmieniającego się promienia (średnicy) tarcz wirnika i stojana [4,6,9]. Należy więc korzystać z innych metod obliczeniowych pozwalających na precyzyjne obliczanie tego rodzaju obwodów elektromagnetycznych. W Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych opracowano algorytmy obliczeniowe silników indukcyjnych tarczowych w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Algorytmy te umożliwiają przeprowadzenie obliczeń analitycznych silnika tarczowego

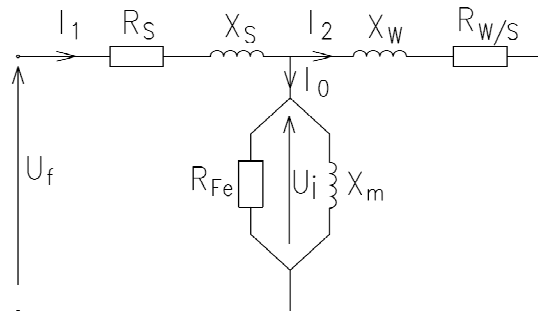
klatkowego oraz wykreślenie podstawowych jego charakterystyk. Dla maszyn o osiowym przepływie strumienia magnetycznego głównego przeprowadzenie jakichkolwiek obliczeń metodami analitycznymi możliwe jest po wcześniejszym określeniu zastępczej średnicy tarcz D_{sr} , dla której przeprowadzane są obliczenia. W literaturze [6,9] średnica ta często przyjmowana jest jako połowa sumy średnicy zewnętrznej D_z i wewnętrznej D_w (zależność nr 1).

$$D_{sr} = \frac{D_z + D_w}{2} \quad (1)$$

W opracowanych algorytmach obliczeniowych przyjęto jednak inne założenie. Średnica zastępcza tarcz wirnika i stojana D_{sr} określana jest jako średnica, dla której pole powierzchni podziałki biegunowej podzielone zostaje na dwie połowy (zależność nr 2).

$$D_{sr} = \sqrt{\frac{D_z^2 + D_w^2}{2}} \quad (2)$$

Różnice średnicy zastępczej D_{sr} pomiędzy metodami, są tym większe im mniejszy jest stosunek średnicy wewnętrznej tarcz D_w do średnicy zewnętrznej tarcz D_z . Według [6,9] optymalny stosunek średnic D_w/D_z , dla których moment elektromagnetyczny jest maksymalny wynosi 0.58. Średnice tarcz modelu obwodu elektromagnetycznego dla omawianego silnika tarczowego indukcyjnego wynoszą $D_z=205$ mm oraz $D_w=130$ mm. Liczba żłobków stojana wynosi $Q_s=36$, natomiast liczba żłobków wirnika jest równa $Q_r=40$. Po określeniu średnicy zastępczej można przystąpić do rozwiązywania równań elektromagnetycznych schematu zastępczego silnika, który w zasadzie jest identyczny jak w przypadku silników cylindrycznych. Schemat ten przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Schemat zastępczy silnika tarczowego indukcyjnego z jednym rdzeniem stojana i jedną tarczą wirnika

Podstawowe równania impedancji poszczególnych gałęzi mają następującą postać:

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (3)$$

$$Z_w = \frac{R_w}{s} + jX_w \quad (4)$$

$$Z_m = \frac{R_{Fe} \cdot jX_m}{R_{Fe} + jX_m} \quad (5)$$

Sprowadzając poszczególne impedancje do jednej impedancji zastępczej otrzymujemy:

$$Z_c = Z_s + \frac{Z_m \cdot Z_w}{Z_m + Z_w} \quad (6)$$

Prąd w obwodzie pierwotnym przy napięciu U_f wynosi:

$$I_{-1} = \frac{U_f}{Z_c} \quad (7)$$

Prąd w gałęzi wirnika wynosi:

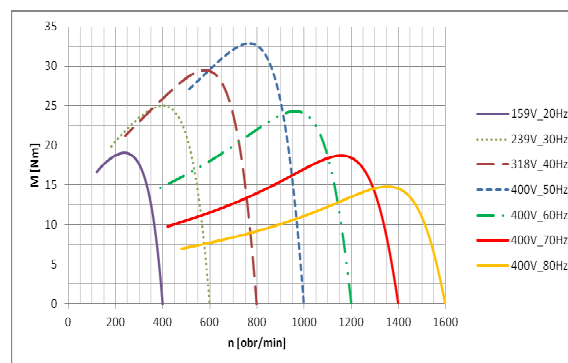
$$I_2 = \frac{U_i}{\sqrt{\left(\frac{R_w}{s}\right)^2 + X_w^2}} \quad (8)$$

3. Obliczenia elektromagnetyczne

Na podstawie równań schematu zastępczego oraz w oparciu o literaturę [2,10,11,12] opracowano algorytm obliczeń analitycznych. Po zdefiniowaniu wymaganych danych wejściowych w pierwszej kolejności w algorytmie obliczane są niezbędne wymiary geometryczne, takie jak wysokość aktywnej części uzwojenia, podziałki żłobkowe stojana i wirnika, długości dróg magnetycznych strumienia głównego oraz objętości jarzma i zębów rdzeni. Następnie wyliczane są współczynniki uzwojenia, skrótów i grupy oraz współczynniki rozproszenia różnicowego strumienia. Kolejne etapy obliczeń dotyczą zagadnień związanych z przewodnością magnetyczną wybranych typów żłobków stojana i wirnika. Następnie w drodze iteracji obliczane są wartości prądu biegu jałowego oraz parametry znamionowe silnika. W ostatnim etapie wyliczane są wielkości i parametry dla stanu rozruchu silnika.

Obliczenia analityczne można przeprowadzić dla różnych wartości napięć zasilających i czę-

stotliwości, symulując tym samym pracę silnika przy zasilaniu falownikowym. Dla przedstawionego modelu silnika założono maksymalną wartość napięcia zasilania równą $U=400V$. Obliczone charakterystyki momentu elektromagnetycznego silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości napięć zasilających i częstotliwości przedstawiono na rys.3.

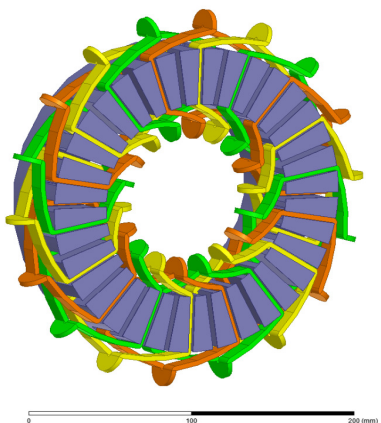


Rys. 3. Charakterystyki momentu na wale silnika modelowego w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości napięć i częstotliwości zasilania

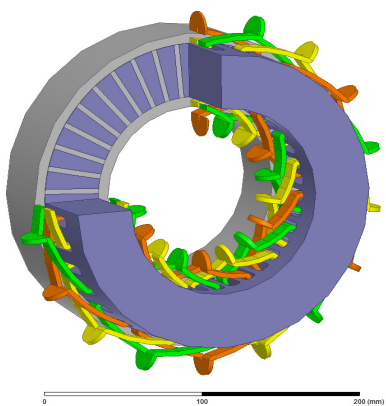
Analizując charakterystyki przedstawione na rysunku 3 można zauważyć, że wraz ze zmniejszeniem częstotliwości w stosunku do częstotliwości bazowej (50Hz), moment maksymalny silnika nie jest stały, a znacznie maleje. Spowodowane to jest dużym stosunkiem rezystancji uzwojenia stojana $R_s=5.76\Omega$ do jego reaktancji $X_s=6.78\Omega$, co jest charakterystyczne dla silników małej mocy. Założenie stałej wartości momentu w tej części charakterystyki jest prawdziwe przy założeniu, że rezystancja stojana ma znikomy udział i jest w przybliżeniu równa 0.

Obliczenia analityczne ze względu na trójwymiarowy rozptył głównego strumienia magnetycznego można traktować jako obliczenia przybliżone, służące do wstępnego określenia gabarytów i danych nawojowych maszyny. Bardziej precyzyjne obliczenia elektromagnetyczne tarczowych silników indukcyjnych należy wykonać na trójwymiarowych modelach obliczeniowych metodą elementów skończonych. Model obliczeniowy omawianego silnika tarczowego przedstawiono na rys.4.

a)

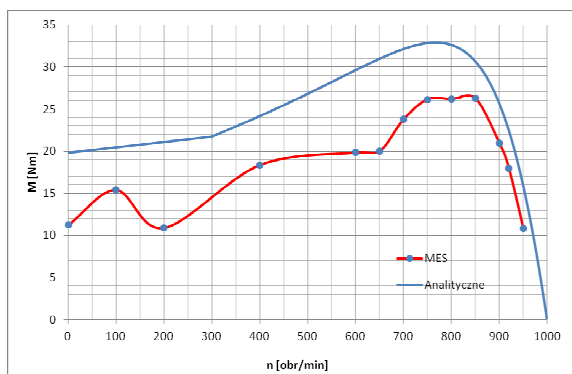


b)



Rys. 4. Trójwymiarowy model do obliczeń MES
a) stojana uzwojonego silnika tarczowego indukcyjnego, b) obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego indukcyjnego

Na rys. 5 przedstawiono porównanie charakterystyk momentu na wale silnika w funkcji prędkości obrotowej dla omawianego modelu obwodu elektromagnetycznego.



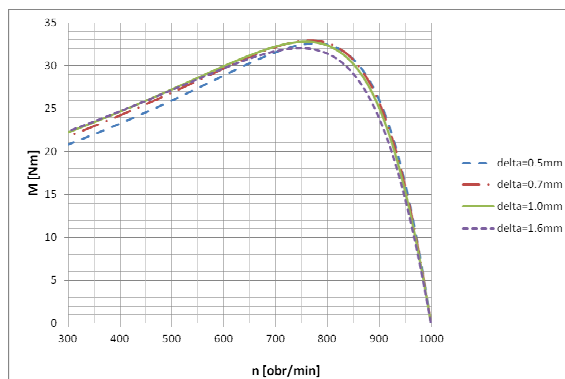
Rys. 5. Porównanie charakterystyk momentu na wale silnika w funkcji prędkości obrotowej silnika tarczowego indukcyjnego obliczonych metodą analityczną oraz metodą elementów skończonych

4. Szczelina powietrzna silnika tarczowego indukcyjnego

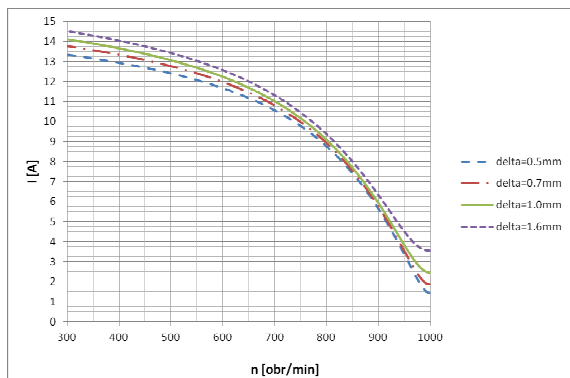
Dla silnika modelowego na podstawie opracowanego algorytmu obliczeń analitycznych przeanalizowano wpływ wysokości szczeliny powietrznej δ na parametry i charakterystyki silnika. Wyniki obliczeń dla wybranych wartości szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem, a wirnikiem przedstawiono na rysunkach 6-9. Wzrost wysokości szczeliny powietrznej tarczowego silnika indukcyjnego z jedną tarczą wirnika i jedną tarczą stojana jest przyczyną:

- nieznacznego wzrostu poślizgu dla znamionowego momentu obciążenia,
- wzrostu wartości prądu biegu jałowego,
- wzrostu wartości prądu znamionowego i prądu rozruchowego,
- obniżenia współczynnika mocy $\cos\phi$,
- obniżenia współczynnika sprawności silnika,
- nieznacznego wzrostu momentu rozruchowego,
- nieznacznego wzrostu momentu maksymalnego (do pewnej wysokości szczeliny).

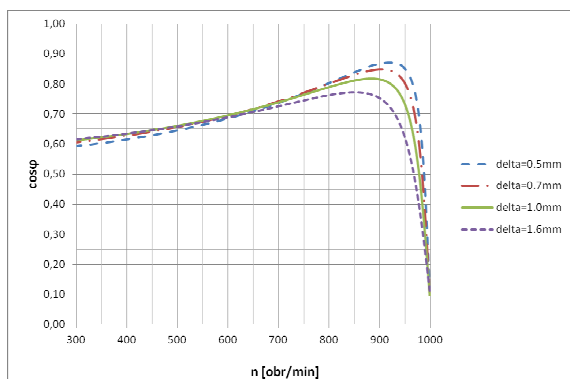
Z uwagi na powyższe można stwierdzić, że powiększenie szczeliny powietrznej silnika tarczowego indukcyjnego wpływa niekorzystnie na parametry pracy silnika. Wielkość szczeliny powietrznej determinowana jest więc głównie względami mechanicznymi.



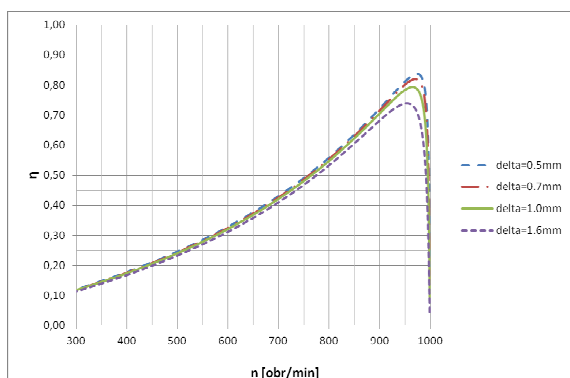
Rys. 6. Obliczone charakterystyki momentu na wale silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości wysokości szczeliny powietrznej



Rys. 7. Obliczone charakterystyki prądu fazowego silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości wysokości szczeliny powietrznej



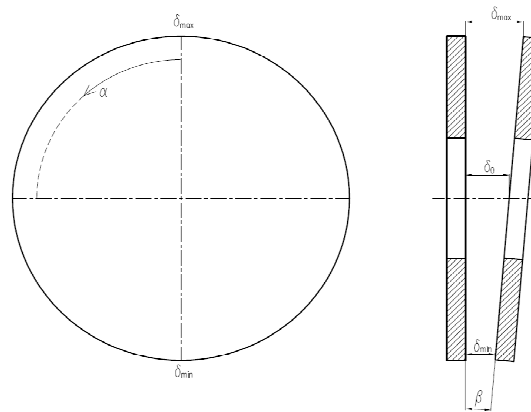
Rys. 8. Obliczone charakterystyki współczynnika mocy silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości wysokości szczeliny powietrznej



Rys. 9. Obliczone charakterystyki sprawności silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości wysokości szczeliny powietrznej

Silniki tarczowe są konstrukcjami o dużym stosunku średnicy tarcz do długości osiowej maszyny, w związku z tym bardzo istotne jest właściwe zaprojektowanie silnika pod kątem mechanicznym, aby zapewnić odpowiednią sztywność elementów wirujących. Wszelkie różnice w niedotrzymaniu tolerancji wymiarowych

mogą powodować asymetryczność szczeliny powietrznej i tym samym zakłócać prawidłową pracę maszyny. W niniejszej publikacji przeanalizowano statyczną nierównomierność szczeliny powietrznej wzdłuż obwodu tarcz dla omawianego modelu silnika. Niesymetryczność taka przedstawiona została na rys.10



Rys. 10. Niesymetryczność statyczna szczeliny powietrznej wzdłuż obwodu tarcz wirnika i stojana silnika tarczowego

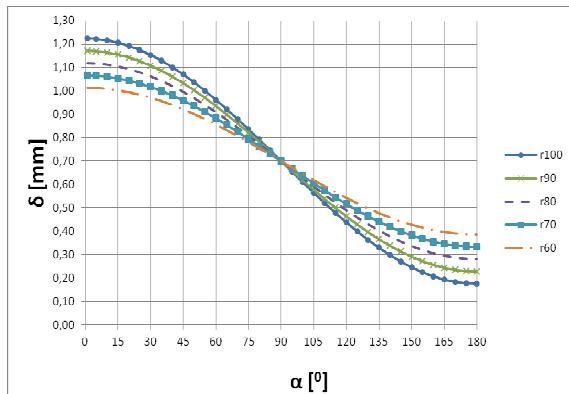
Dla takiego przypadku niesymetryczność szczeliny powietrznej można opisać zależnością będącą funkcją kąta α , β oraz promienia tarcz r:

$$\delta(r, \alpha, \beta) = \delta_0 + r \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) \quad (9)$$

gdzie:

- r_1 – promień wewnętrzny rdzenia stojana i wirnika,
- r_2 – promień zewnętrzny rdzenia stojana i wirnika,
- r – parametr bieżący zmieniany w przedziale od r_1 do r_2 ,
- α – kąt bieżący mierzony po obwodzie promienia r , przy czym:
 - $\alpha = 0$ jest na półosi gdzie szczelina jest maksymalna $\delta_{0 \max}$,
 - $\alpha = \pi$ jest na pół osi gdzie szczelina jest minimalna $\delta_{0 \min}$.
- β – kąt nierównomierności szczeliny
- δ_0 – szczelina znamionowa (w stanie symetrycznym), a w stanie niesymetrycznym jest to szczelina w osi wału.

W przypadku silnika o znamionowej szczelinie powietrznej $\delta_0=0.7$ mm, promieniu wewnętrznym tarcz wirnika i stojana $r_w=60$ mm, promieniu zewnętrznym $r_z=100$ mm oraz kącie pochylecia tarczy $\beta=0,3^\circ$ zmienność szczeliny powietrznej dla różnych wartości promieni przedstawiono na rys.11.



Rys. 11. Zmienność szczeliny powietrznej wzdłuż obwodu tarcz wirnika i stojana dla $\delta_0=0.7\text{mm}$, $r_w=60\text{mm}$, $r_z=100\text{mm}$, $\beta=0.3^0$

Przedstawione równanie (9) opisujące niesymetryczność statyczną szczeliny powietrznej silnika AFIM 11 wzdłuż obwodu tarcz, pozwala na określenie dopuszczalnych tolerancji wykonania i montażu poszczególnych podzespołów maszyny. Z wykresu przedstawionego na rys. 11 widać, że dla silnika o wymiarach średnic tarcz wirnika i stojana 200/120 mm i znamionowej szczeliny powietrznej $\delta_0 = 0.7\text{ mm}$ możliwe pochylenie (niesymetryczność) tarczy wirnika wynosi ok. $\beta=0.3^0$. W przypadku większego kąta pochylenia β , tarcza wirnika będzie zacierała o rdzeń stojana.

5. Podsumowanie

Silniki tarczowe z magnesami trwałymi mają bardzo dobre parametry i charakterystyki elektromechaniczne jednak ich cena stale rośnie, ze względu na stale rosnące ceny magnesów NdFeB. Silniki tarczowe indukcyjne mają dwie istotne zalety, w stosunku do silników tarczowych z magnesami trwałymi: są od nich tańsze i mają znacznie tańszy system zasilania i sterowania. Regulację prędkości obrotowej można realizować wykorzystując katalogowe falowniki energoelektroniczne z zaimplementowanym algorytmem sterowania. Silniki te mają jednak większą masę i mniejszą przeciążalność momentem. Konstruktorzy maszyn roboczych i manipulatorów starają się zintegrować silnik napędowy z urządzeniem tworząc jeden zespół maszyny, eliminując przy tym najczęściej przekładnię mechaniczną. W wielu tych rozwiązaniach silnik tarczowy, ze względu na małą długość osiową, jest lepszym rozwiązaniem od silnika walcowego. Przykładami może być: kompakt „pompa-silnik” oraz mała turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu z zabudowaną

w dolnej tarczy prądnicą tarczową indukcyjną. Silnik indukcyjny tarczowy, w niektórych rodzajach napędów, może wypełniać także funkcję dodatkową, np. silnik zabudowany w przekładni różnicowej pojazdu napędza koła, a na łukach jezdni umożliwia obrót kół z różną prędkością dopasowaną do kąta skrętu pojazdu, co zapewnia jazdę bez poślizgu.

Pomimo, że konstrukcje silników tarczowych znane są od lat, w dalszym ciągu trwają prace badawcze mające na celu lepsze poznanie tego rodzaju maszyn. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL realizuje projekt mający na celu zbadanie zjawisk zachodzących w tarczowych obwodach elektromagnetycznych między innymi w asymetrycznych stanach pracy. Asymetria szczeliny powietrznej w tarczowych obwodach elektromagnetycznych ma istotne znaczenie z uwagi stosunkowo niewielkie dopuszczalne tolerancje wykonania poszczególnych podzespołów konstrukcyjnych, których niezachowanie może powodować zaburzenia pracy maszyny.

Silniki o strumieniu osiowym stanowią alternatywne rozwiązanie do powszechnie stosowanych dziś silników cylindrycznych, jednakże należy pamiętać, że w tego typu silnikach pojawiają się dodatkowe trudności związane na przykład z tym, że są to konstrukcje o dużym promieniu, a więc szczególnie ważnym zagadnieniem jest utrzymanie stałej wysokości szczeliny powietrznej.

6. Literatura

- [1]. Caricch F., Crescimbin F., Santini E.: *Axial-flux electromagnetic differential induction motor*. Electrical Machines and Drives; 11-13 September 1995, Conference Publication No. 412, O IEE, 1995.
- [2]. Dąbrowski M.: *Konstrukcja maszyn elektrycznych*; WNT; Warszawa 1965
- [3]. Dąbrowski M.: *Polskie osiągnięcia badawcze nad naciągami magnetycznymi w maszynach elektrycznych*, Prace Naukowe Instytutu Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 66/2012.
- [4]. Glinka T., Jakubiec M.: *Rozwiązania silników tarczowych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 77 (2007), 243-249.
- [5]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [6]. Gieras J., Wang R., Kamper M.: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 2004.

- [7]. Mendrela E., Łukaniszyn M., Macek-Kamińska K.: *Tarczowe silniki prądu stałego z komutacją elektroniczną*, Wydawnictwo Gnome PAN 2002.
- [8]. Aydin M., Huang S., Lipo T. A.: *Low Noise and Smooth Torque Permanent Magnet Propulsion Motors: Comparison of Non-slotted and Slotted Radial and Axial Flux Topologies*. IEEE International Aegean Electrical Machine and Power Electronic Conference, Kusadasi-Turkey, 2001, pp.1-8.
- [9]. Parviainen A.: *Design of Axial-Flux Permanent Magnet low-speed machines and performance comparison between radial flux and axial - flux machines*, Lappeenranta teknillinen yliopisto, Digipaino 2005
- [10]. Śliwiński T.: *Metody obliczania silników indukcyjnych*, Tom 1-Analiza. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- [11]. Valtonen M.: Parviainen A. Pyrhönen J.: *Influence of the Air-Gap Length to the Performance of an Axial-Flux Induction Motor*. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines. IEEE.
- [12]. Wiak S., Wiak S., Welfle H.: *Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych*. Wydaw. Politechniki Łódzkiej, 2001.
- [13]. Wolnik T.: *Analiza porównawcza wybranych modeli silników tarczowych z magnesami trwałymi*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 1/2013, 239-245.

„Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki jako projekt badawczy UMO-2012/07/B/ST8/04099”