

doi:10.15199/48.2017.07.17

Asymetria obwodowa szczeliny powietrznej w tarczowym silniku indukcyjnym

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych modelowego silnika tarczowego indukcyjnego pracującego w różnych warunkach symetrii obwodowej szczeliny powietrznej. Dokonano analizy wpływu asymetrii szczeliny powietrznej na przebiegi sił osiowych naciągu magnetycznego, drgań silnika oraz parametrów eksploatacyjnych. Przebiegi czasowe poddano analizie harmonicznej, dzięki czemu określono charakterystyczne częstotliwości sił osiowych oraz drgań pojawiające się w różnych warunkach symetrii szczeliny. Zaprezentowane wyniki powinny posłużyć zarówno na etapie konstrukcji tego rodzaju maszyn, jak również do diagnostyki symetryczności szczeliny powietrznej.

Abstract. The article presents the lab-test results of model of axial-flux induction motor operating in different conditions of symmetry of air gap. The analysis of air gap asymmetry impact on the magnetic pull forces, vibrations and parameters were done. The time courses of axial force and vibrations were recorded. Harmonic analysis of these waveforms were conducted and then the characteristic frequency was determined. The presented results should be used both during design of this type of motor as well as diagnostic of symmetrical air gap. **The lab-test results of model of axial-flux induction motor operating in different conditions of symmetry of air gap**

Słowa kluczowe: silniki tarczowe, asymetria szczeliny, naciąg magnetyczny.

Keywords: axial-flux motors, air-gap asymmetry, magnetic pull forces.

Wprowadzenie

Silniki o strumieniu osiowym znajdują coraz szersze zastosowanie, głównie ze względu na wysokie wartości współczynników gęstości mocy i momentu oraz specjalne właściwości determinowane przez kształt obwodu magnetycznego [1,2,3,4]. Do najbardziej popularnych tego rodzaju maszyn należą silniki z magnesami trwałymi NdFeB, z uwagi na zalety natury technicznej. Są one jednak stosunkowo drogie i uzależniają dostawę głównego podzespołu tj. magnesów NdFeB od światowego monopolisty jakim są Chiny. Z tego względu równolegle należy rozwijać konstrukcje tarczowych silników indukcyjnych.

W niniejszej publikacji przedstawiono zagadnienie asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej modelowego silnika tarczowego indukcyjnego z pojedynczym stojanem i pojedynczym wirnikiem. Tego rodzaju rozwiązanie konstrukcyjne obwodu magnetycznego znajduje uzasadnienie przede wszystkim w silnikach małej mocy, w których nie zachodzi potrzeba stosowania popularnych konstrukcji z podwójnym stojanem i podwójnym wirnikiem, które znacząco podrażają koszt produkcji [4].

Pewnym problemem dla tego rodzaju konstrukcji jest dotrzymanie symetryczności obwodowej szczeliny powietrznej, głównie z uwagi na stosunkowo duże średnice zewnętrzne tarcz w stosunku do ich grubości. Ponadto, wadą tego rozwiązania są duże wartości sił osiowych naciągu magnetycznego występujące w trakcie normalnej pracy maszyny, mocno oddziałujących na konstrukcję węzłów łożyskowych [1,4,5,6].

W artykule omówiono wpływ asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej na pracę silnika tarczowego indukcyjnego, w szczególności na przebiegi sił osiowych naciągu magnetycznego, wartość drgań oraz parametrów eksploatacyjnych silnika.

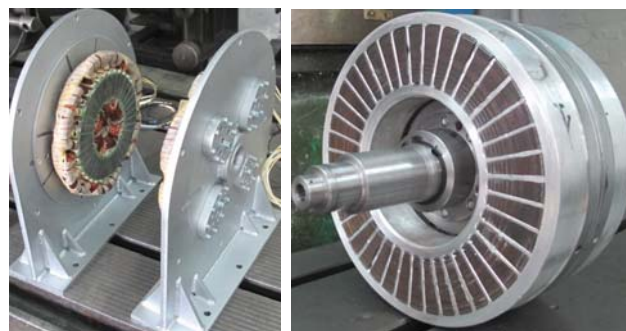
Model silnika

Obiektem badań był modelowy obwód elektromagnetyczny silnika indukcyjnego tarczowego o liczbie biegunów magnetycznych $2p=6$, posiadający jeden stojan oraz jeden wirnik (AFIM11). Podstawowe dane dotyczące wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego, uzwojenia oraz parametrów znamionowych przedstawiono w tabeli 1, natomiast na rysunku 1 przedstawiono silnik modelowy zainstalowany na

stanowisku badawczym. Rdzeń stojana i wirnika silnika modelowego wykonano jako zwijka z taśmy prądnicowej typu M470-50a, w której metodą elektroerozyjną wycięto żłobki. W żłobkach stojana znajduje się symetryczne, trójfazowe uzwojenie, natomiast w żłobkach wirnika uzwojenie klatkowe. Stanowisko badawcze zostało opracowane między innymi pod kątem możliwości wprowadzania asymetrii szczeliny powietrznej poprzez odpowiednią regulację położenia rdzenia stojana uzwojonego.

Tabela 1. Podstawowe dane konstrukcyjne silnika modelowego

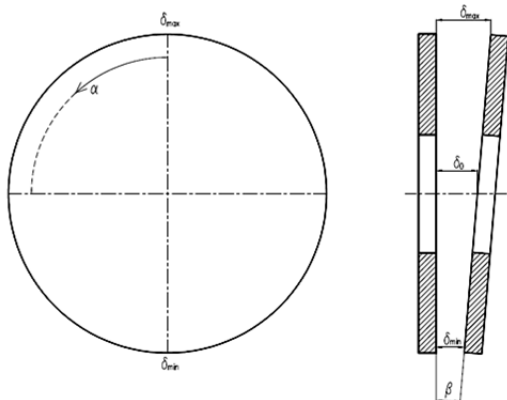
Parametr		
Średnica zewnętrzna stojana i wirnika	mm	205
Średnica wewnętrzna stojana i wirnika	mm	130
Długość obwodu magnetycznego stojana	mm	50
Długość obwodu magnetycznego wirnika	mm	50
Długość szczeliny powietrznej	mm	0.85
Liczba biegunów	-	6
Liczba faz	-	3
Liczba żłobków stojana	-	36
Liczba żłobków wirnika	-	40
Współczynnik uzwojenia stojana	-	0.933
Znamionowe napięcie zasilania	V	400
Znamionowa częstotliwość	Hz	50
Znamionowa moc	W	1500
Znamionowy moment	Nm	15
Znamionowy prąd	A	3.4



Rys. 1. Modelowy obwód elektromagnetyczny silnika zainstalowany na dedykowanym stanowisku badawczym

Asymetria obwodowa szczeliny powietrznej

Silniki tarczowe są maszynami, w których często pojawia się problem utrzymania symetrii szczeliny powietrznej. Głównym tego powodem są relatywnie duże średnice zewnętrzne tarcz w stosunku do ich grubości [1,4]. W przypadku małej sztywności konstrukcji występuje niesymetryczność obwodowa szczeliny powietrznej zobrazowana na rysunku 2.



Rys.2. Asymetria obwodowa szczeliny powietrznej

Długość szczeliny powietrznej po obwodzie tarcz stojana i wirnika można opisać równaniem (1).

$$(1) \quad \delta(r, \alpha, \beta) = \delta_0 + r \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha)$$

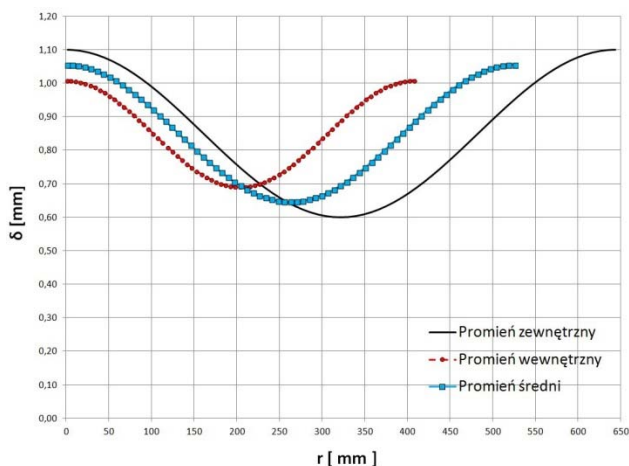
gdzie: r – bieżący promień tarcz, α – kąt bieżący mierzony po obwodzie promienia r , β – kąt nierównomierności szczeliny (kąt pochylenia tarczy), δ_0 – szczelina znamionowa (w stanie symetrycznym), a w stanie niesymetrycznym jest to szczelina w osi wału.

Z zależności (1) wynika, że długość szczeliny powietrznej po obwodzie tarcz jest funkcją bieżącego promienia tarcz r , kąta pochylenia tarcz β oraz bieżącego kąta α mierzonego po obwodzie.

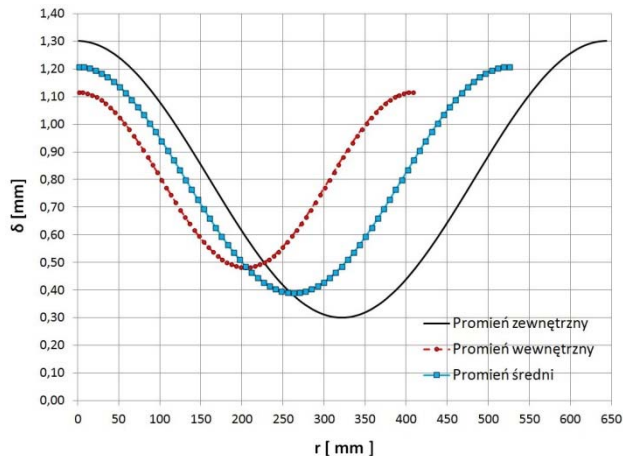
Dla silnika modelowego przeprowadzono badania laboratoryjne dla symetrycznej szczeliny powietrznej równej $\delta_0=0.85$ mm oraz dla dwóch stanów asymetrycznych szczeliny:

- 1) $\delta_{max}=1.1$ mm, $\delta_{min}=0.6$ mm, wówczas $\Delta=0.5$ mm,
- 2) $\delta_{max}=1.3$ mm, $\delta_{min}=0.3$ mm, wówczas $\Delta=1.0$ mm,

gdzie $\Delta = \delta_{max} - \delta_{min}$.



Rys.3. Zmiany długości szczeliny powietrznej na obwodzie silnika modelowego dla asymetrii $\Delta=0.5$ mm



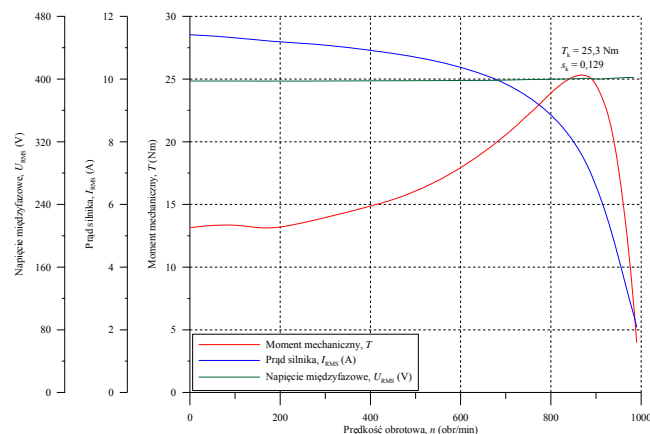
Rys.4. Zmiany długości szczeliny powietrznej na obwodzie silnika modelowego dla asymetrii $\Delta=1.0$ mm

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany długości szczeliny powietrznej wzdłuż obwodu tarcz stojana i wirnika dla pierwszego przypadku asymetrii, natomiast na rysunku 4 dla przypadku drugiego. Przedstawiono zmiany szczeliny dla promienia zewnętrznego tarcz, promienia wewnętrznego oraz promienia średniego.

Przedstawione wykresy oraz równanie (1) pozwalają na określenie dopuszczalnych tolerancji wykonania i montażu poszczególnych podzespołów silnika z uwagi na zachowanie szczeliny powietrznej w odpowiednich tolerancjach.

Parametry eksploatacyjne

Dla silnika modelowego pracującego w różnych warunkach symetrii obwodowej szczeliny powietrznej dokonano pomiaru momentu rozruchowego, momentu maksymalnego, prądu biegu jałowego oraz charakterystyki obciążenia dla znamionowych warunków zasilania (400V, 50Hz). Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2. Na rysunku 5 przedstawiono natomiast zmierzone charakterystyki zewnętrzne silnika dla symetrycznej szczeliny powietrznej.



Rys.5. Charakterystyki zewnętrzne silnika modelowego dla symetrycznej szczeliny powietrznej

Z przedstawionych w tabeli 2 wyników można wnioskować, że asymetria obwodowa szczeliny powietrznej nie powoduje znaczących zmian parametrów eksploatacyjnych silnika. Jedynym parametrem, dla którego wraz ze zmianą symetrii obserwuje się postępowe zmiany wartości, jest moment rozruchowy M_r silnika. Dla symetrycznej szczeliny powietrznej wynosił on 13.2 Nm, natomiast wraz ze zwiększeniem asymetrii obwodowej

szczeliny powietrznej maleje i dla asymetrii $\Delta=1.0$ mm wynosi 12.4 Nm (prąd rozruchowy nie uległ analogicznym zmianom).

Tabela 2. Charakterystyczne parametry eksploatacyjne silnika modelowego dla różnych warunków symetrii obwodowej szczeliny powietrznej

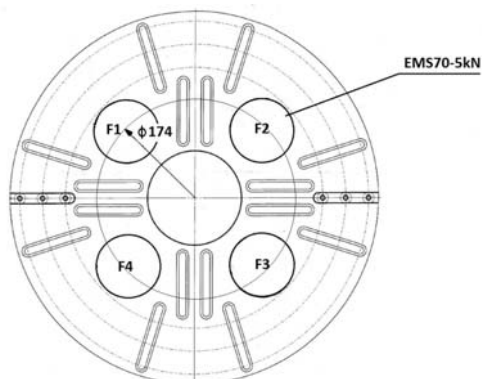
	I_0	M_r	I_r	M_o	I_1	$\cos\phi$	η	M_k
	A	Nm	A	Nm	A	-	%	Nm
Symetria szczeliny	1.9	13.2	11.9	15.1	3.7	0.73	80.8	25.3
Asymetria $\Delta=0.5$ mm	1.9	12.9	11.7	14.8	3.6	0.73	80.5	25.0
Asymetria $\Delta=1.0$ mm	1.9	12.4	11.7	15.3	3.7	0.73	81.3	25.2

gdzie: I_0 – prąd biegu jałowego, M_r – moment rozruchowy, I_r – prąd rozruchowy, M_o – moment obciążenia, I_1 – prąd fazowy stojana, $\cos\phi$ – współczynnik mocy, η – sprawność, M_k – moment maksymalny.

Siły osiowe naciągu magnetycznego

Jednym z badanych parametrów silnika modelowego przy asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej były siły osiowe naciągu magnetycznego. W literaturze znaleźć można znaczącą ilość prac dotyczącą analiz promieniowego naciągu magnetycznego w silnikach cylindrycznych. między innymi [7,8,9], natomiast brakuje prac poświęconych zagadnieniu naciągu magnetycznego osiowego w silnikach tarczowych.

Na płycie czołowej stanowiska badawczego, do której mocowany jest również uzwojony stojan, umieszczono cztery czujniki tensometryczne typu EMS70-5kN. Sposób rozmieszczenia oraz numerację poszczególnych czujników przedstawiono na rysunku 6.



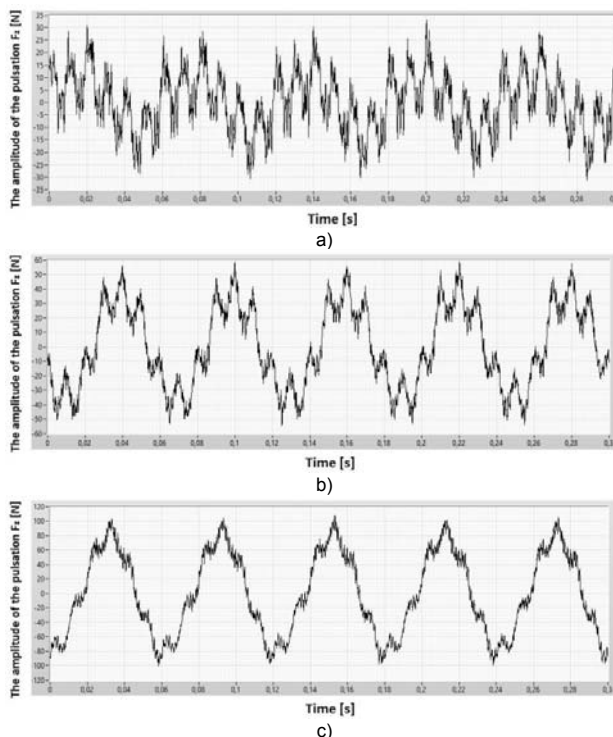
Rys.6. Rozmieszczenie i numeracja czujników tensometrycznych EMS70-5kN na płycie czołowej stanowiska badawczego.

Badania przeprowadzono przy zasilaniu znamionowym dla biegu jałowego silnika oraz przy obciążeniu znamionowym. Zarejestrowano przebiegi sił osiowych w funkcji czasu, a następnie przeprowadzono ich analizę harmoniczną.

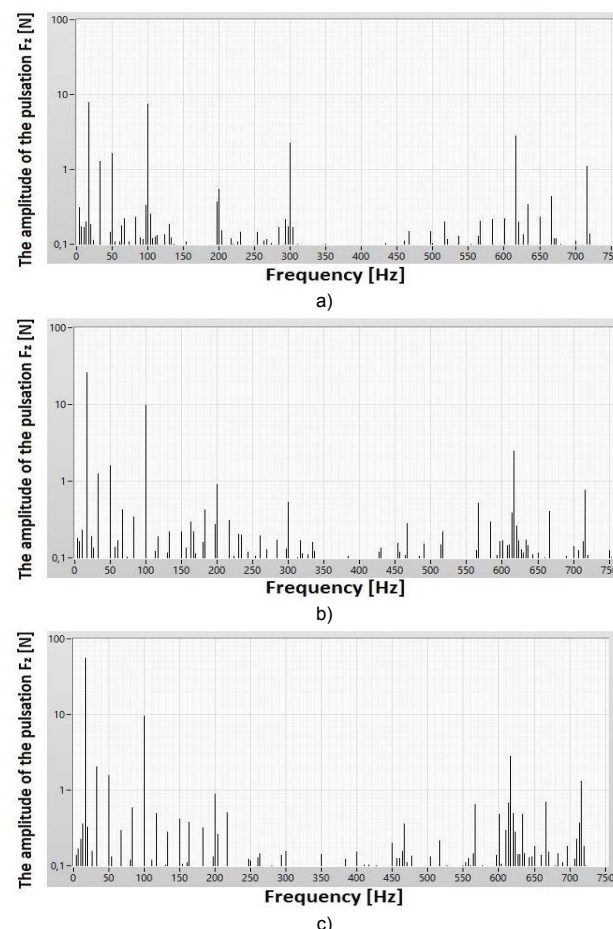
Zarejestrowane przebiegi sił osiowych dla biegu jałowego przedstawiono na rysunku 7, natomiast na rysunku 8 przedstawiono ich analizę harmoniczną. Z przebiegów usunięto wartość składowej stałej, aby rysunki były bardziej czytelne i obrazowały wprost wartość pulsacji siły osiowej naciągu magnetycznego.

Z rysunku 8 wynika, że dominującymi składowymi w przebiegach sił osiowych są:

- częstotliwość wirowania pola magnetycznego (16.67 Hz),
- podwojona częstotliwość napięcia zasilania (100 Hz), co szczególnie wyjaśniają autorzy [7,8],
- częstotliwość napięcia zasilania (50 Hz),



Rys.7. Przebiegi składowej zmiennej sił osiowych naciągu magnetycznego przy biegu jałowym silnika dla: a) symetrycznej szczeliny powietrznej $\delta_0=0.85$ m, b) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=0.5$ mm, c) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=1.0$ mm



Rys.8. Analiza harmoniczna składowej zmiennej sił osiowych naciągu magnetycznego przy biegu jałowym silnika dla: a) symetrycznej szczeliny powietrznej $\delta_0=0.85$ m, b) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=0.5$ mm, c) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=1.0$ mm

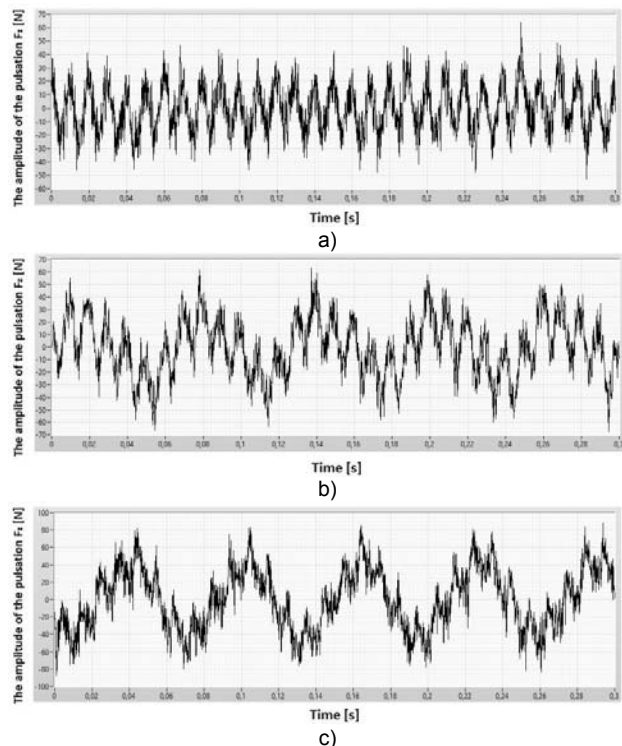
- podwojona częstotliwość wirowania pola magnetycznego (33.33 Hz),
- częstotliwości złołkowe 600-750 Hz, determinowane częstotliwością obrotową wirnika i zmianą reluktancji obwodu magnetycznego, wynikającą ze złołków stojana i wirnika.

Częstotliwość 300 Hz pochodzi od źródła zasilania.

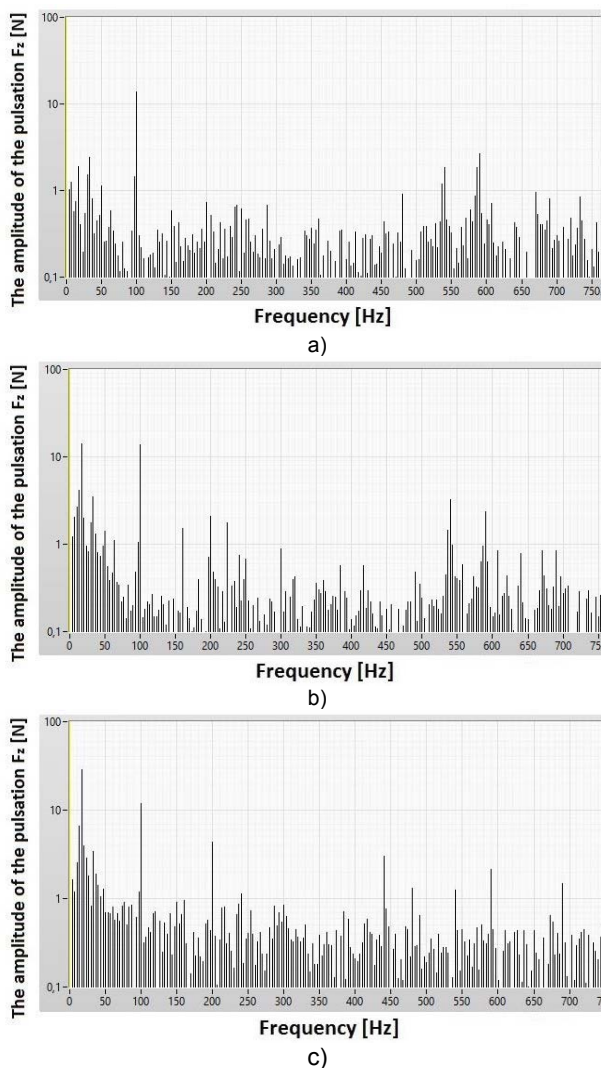
Przedstawione na rysunku 7 i 8 wyniki pokazują, że zwiększenie asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej modelowego silnika powoduje znaczący wzrost składowej wynikającej z wirowania pola magnetycznego (16.67 Hz). Jest to również powodem większych pulsacji całego przebiegu siły osiowej naciągu magnetycznego. W przypadku pozostałych harmonicznych można uznać, że asymetria obwodowa szczeliny powietrznej pozostaje bez wpływu na wartości ich amplitudy, a ich zmiany mają raczej charakter losowy.

Srednie wartości sił osiowych naciągu magnetycznego na poszczególnych czujnikach tensometrycznych dla analizowanych stanów symetrii szczeliny powietrznej przedstawiono w tabeli 3. Wyniki te obrazują w jakim kierunku (geometrycznie) postępuje asymetria, uwzględniając ich rozmieszczenie przedstawione na rysunku 6. Wraz ze zmianą stopnia asymetrii maleją wartości sił na czujnikach F1 i F4, natomiast rosną na czujnikach F2 i F3, co jednoznacznie świadczy o kierunku pochylenia tarcz. Odpowiednie rozmieszczenie czujników tensometrycznych może więc być podstawą do diagnostyki równomierności szczeliny powietrznej silników tarczowych. Wraz ze zwiększaniem asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej sumaryczna wartość siły osiowej określona równaniem (2) wzrasta, lecz zmiany te nie przekraczają wartości 6%.

$$(2) \quad \sum F_z = F1 + F2 + F3 + F4$$



Rys.9. Przebiegi składowej zmiennej sił osiowych naciągu magnetycznego przy obciążeniu znamionowym silnika dla: a) symetrycznej szczeliny powietrznej $\delta_0=0.85$ m, b) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=0.5$ mm, c) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=1.0$ mm



Rys.10. Analiza harmoniczna składowej zmiennej sił osiowych naciągu magnetycznego przy obciążeniu znamionowym silnika dla: a) symetrycznej szczeliny powietrznej $\delta_0=0.85$ m, b) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=0.5$ mm, c) asymetrycznej szczeliny powietrznej $\Delta=1.0$ mm

Tabela 3. Średnie wartości sił osiowych zarejestrowane na poszczególnych czujnikach tensometrycznych przy biegu jałowym silnika, przy zasilaniu znamionowym (400 V, 50Hz), w funkcji zmian symetrii obwodowej szczeliny powietrznej

Amplituda pulsacji	F1	F2	F3	F4	ΣF_z
Symetria szczeliny	417	416	379	444	1656
Asymetria $\Delta=0.5$ mm	347	468	461	394	1671
Asymetria $\Delta=1.0$ mm	308	519	529	383	1741

Przebiegi sił osiowych zarejestrowano również w stanie znamionowego obciążenia silnika przy zasilaniu znamionowym. Zarejestrowane przebiegi przedstawiono na rysunku 9, natomiast na rysunku 10 przedstawiono ich analizę harmoniczną. Podobnie jak w poprzednim przypadku, z przebiegów usunięto wartość składowej stałej. Zmiana momentu obciążenia silnika od biegu jałowego do momentu znamionowego spowodowała:

- spadek wartości amplitudy harmonicznej 16.67 Hz,
- wzrost wartości amplitudy harmonicznej 100 Hz,
- przesunięcie składowych harmonicznych wynikających ze zmiany reluktancji obwodu magnetycznego i aktualnej prędkości obrotowej wirnika w stronę niższych

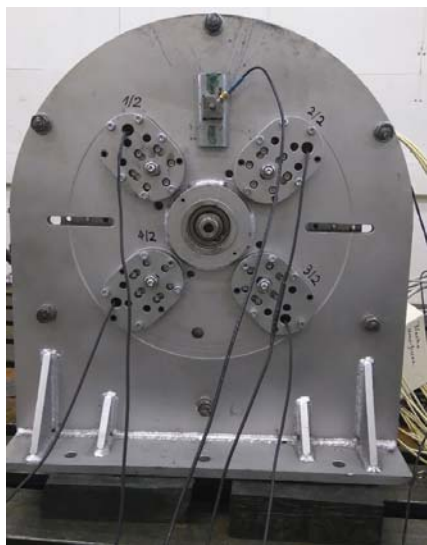
częstotliwości, analogicznie do spadku prędkości obrotowej wirnika wraz ze wzrostem obciążenia.

W porównaniu do przebiegów sił osiowych naciągu magnetycznego zarejestrowanych przy biegu jałowym silnika, to w przebiegach przy obciążeniu znamionowym można zauważyć znacząco większą ilość składowych harmonicznych. Podobnie jak w poprzednim przypadku wraz ze wzrostem asymetrii wzrasta znacząco składowa o częstotliwości 16.67 Hz, związana z częstotliwością wirowania pola magnetycznego. Można również zauważyć wzrost składowej 200 Hz będącej 4-krotnością częstotliwości napięcia zasilania 50 Hz.

Średnie wartości sił osiowych naciągu magnetycznego na poszczególnych czujnikach tensometrycznych dla analizowanych stanów symetrii szczeliny powietrznej przedstawiono w tabeli 4. Wraz ze zwiększaniem asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej przy obciążeniu znamionowym sumaryczna wartość siły osiowej określona równaniem (2) wzrosła 1.15 razy.

Tabela 4. Średnie wartości sił osiowych zarejestrowane na poszczególnych czujnikach tensometrycznych przy obciążeniu znamionowym silnika, przy zasilaniu znamionowym (400 V, 50Hz), w funkcji zmian symetrii obwodowej szczeliny powietrznej

Amplituda pulsacji	F1	F2	F3	F4	ΣF_z
	N	N	N	N	N
Symetria szczeliny	350	349	322	357	1378
Asymetria $\Delta=0.5$ mm	323	424	411	312	1470
Asymetria $\Delta=1.0$ mm	313	493	471	298	1575



Rys.11. Stanowisko badawcze przygotowane do pomiaru drgań

Drgania

Asymetria obwodowa szczeliny powietrznej wpływa również na drgania silnika. W celu oceny wpływu stopnia asymetrii szczeliny na wielkość drgań oraz ich widmo, przeprowadzono pomiary silnika na biegu jałowym, na izolowanym od podłoża stanowisku badawczym. Stanowisko wraz z zamontowanym czujnikiem pomiarowym drgań przedstawiono na rysunku 10. W trakcie pomiarów zarejestrowano prędkość oraz widmo częstotliwościowe drgań w osi x, y, z.

W tabeli 5 przedstawiono wyniki pomiarów wartości skutecznej prędkości drgań dla poszczególnych stanów symetrii szczeliny powietrznej, natomiast w tabeli 6 podano amplitudy prędkości drgań dominujących harmonicznych.

Tabela 5. Wartość skuteczna RMS prędkości drgań w osi x, y, z w funkcji zmian symetrii obwodowej szczeliny powietrznej

Prędkość drgań RMS	v_x	v_y	v_z
	mm/s	mm/s	mm/s
Symetria szczeliny	4.26	0.47	3.40
Asymetria $\Delta=0.5$ mm	4.30	0.50	3.54
Asymetria $\Delta=1.0$ mm	5.10	0.60	4.10

Tabela 6. Prędkość drgań w osi x, y, z w funkcji zmian symetrii obwodowej szczeliny powietrznej

Amplituda prędkości drgań		16.67 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	866.67 Hz
v_x [mm/s]	Symetria szczeliny	3.84	0.43	0.003	0.01	0.04
	Asymetria $\Delta=0.5$ mm	4.13	0.36	0.002	0.02	0.07
	Asymetria $\Delta=1.0$ mm	4.60	0.27	0.01	0.02	0.01
v_y [mm/s]	Symetria szczeliny	0.34	0.27	0.005	0.003	0.01
	Asymetria $\Delta=0.5$ mm	0.40	0.24	0.004	0.004	0.01
	Asymetria $\Delta=1.0$ mm	0.46	0.18	0.01	0.01	0.01
v_z [mm/s]	Symetria szczeliny	3.20	0.15	0.03	0.015	0.20
	Asymetria $\Delta=0.5$ mm	3.26	0.12	0.03	0.02	0.18
	Asymetria $\Delta=1.0$ mm	3.73	0.08	0.05	0.08	0.02

Dla silnika modelowego prędkość drgań o znaczących wartościach zarejestrowano w kierunkach: x - poziomym prostopadłym do osi wału oraz z - osiowym. Wzrost asymetrii szczeliny powietrznej do wartości $\Delta=1.0$ mm spowodował wzrost wartości RMS prędkości drgań o ok. 20 % w obydwu kierunkach.

Ponadto, wzrost asymetrii szczeliny powietrznej powoduje zwiększenie składowej harmonicznej wynikającej z częstotliwości wirowania pola magnetycznego oraz spadek składowej o częstotliwości $2f_s$. Zmiany te nie są jednak tak znaczące, jak w przypadku zmian sił osiowych naciągu magnetycznego.

Podsumowanie

Asymetria obwodowa szczeliny powietrznej nie powoduje zauważalnych zmian parametrów elektromechanicznych silnika tarczowego, jednak negatywnie wpływa na pracę silnika tarczowego. Asymetria powoduje wzrost wartości sił osiowych naciągu magnetycznego oraz nierównomierne obciążenie węzłów łożyskowych. Siły te należy uwzględnić w kalkulacji obciążenia równoważnego łożysk. Zależność pomiędzy trwałością łożysk, a ich obciążeniem jest wykładnicza. Gdyby siły osiowe zostały pominięte, to żywotność łożysk zmalałaby co najmniej 3s-krotnie w stosunku do prognozowanej, gdzie s oznacza stosunek obciążenia równoważnego do promieniowego.

Wzrost asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej powoduje również zwiększenie wartości skutecznej drgań - dla silnika modelowego zaobserwowano wzrost o ok.20%.

Przeprowadzone prace sugerują również, że do diagnostyki symetrii szczeliny powietrznej można wykorzystać przebiegi siły osiowej naciągu magnetycznego, a dokładnie obserwację i analizę składowej częstotliwości wynikającej z prędkości wirowania pola magnetycznego. Wraz z powiększaniem asymetrii obwodowej szczeliny powietrznej zauważalny jest znaczący wzrost tej harmonicznej zarówno przy biegu jałowym silnika, jak i przy obciążeniu.

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

Autorzy:

mgr inż. Tomasz Wolnik

E-mail: t.wolnik@komel.katowice.pl

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL,

Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice

prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka

E-mail: info@komel.katowice.pl

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL,

Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice

LITERATURA

- [1] A. Parviainen, Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial flux machines, Digipaino: Lappeenranta teknillinen yliopisto, 2005.
- [2] J. Gieras, R. Wang i M. Kamper, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [3] T. Wolnik, „Porównanie współczynnika gęstości momentu silnika tarczowego oraz silnika cylindrycznego z magnesami trwałymi,” Przegląd Elektrotechniczny, nr 1/2014, pp. 5-9, Styczeń 2014.
- [4] M. Valtonen, "Performance characteristics of an axial-flux solid-rotor-core induction motor", PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, 2007
- [5] Z. Nasiri-Gheidari, H. Lesani, "A Survey on Axial Flux Induction Motors", Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 2, pp.300-305
- [6] R.-J. Wang, M.J. Kamper, K. Van der Westhuizen, F.J. Gieras, "Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator", IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 1, (41), pp.55-64
- [7] D.G. Dorrell, "Sources and characteristics of unbalanced magnetic pull in three-phase cage induction motors with axial-varying rotor eccentricity", IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 1, (47), pp. 12-24
- [8] D.G. Dorrell, M. Popescu, D.M. Ionel, "Unbalanced magnetic pull due to asymmetry and low-level static rotor eccentricity in fractional-slot brushless permanent-magnet motors with surface-magnet and consequent-pole rotor", IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 7, (46), pp. 2675-2685
- [9] A. Tenhunen, T. Benedetti, T.P. Holopainen, A. Arkkio, "Electromagnetic forces of the cage rotor in conical whirling motion", IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2003, 5, (150), pp. 563-568