

Tomasz Wolnik

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

BADANIE ZJAWISKA NACIĄGU MAGNETYCZNEGO W WYBRANYCH STANACH PRACY TARCZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO

INVESTIGATION OF MAGNETIC PULL EFFECT IN SELECTED OPERATIONAL CONDITIONS OF DISK INDUCTION MOTOR

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań i analizę zjawiska naciągu magnetycznego występującego w silniku tarczowym indukcyjnym z pojedynczą szczeliną powietrzną. Zaprezentowano między innymi pomiarowe wyniki przebiegów sił osiowych przy biegu jałowym silnika oraz w stanie obciążenia. Otrzymane przebiegi poddano analizie częstotliwościowej w celu zdefiniowania dominujących harmonicznych pulsacji siły osiowej w danych warunkach pracy maszyny.

Abstract: Results of investigation of magnetic pull effect present in disk induction motor with a single air-gap are given in this paper. Among others, results of measurements of axial forces distribution occurring in the motor during idle run and under load conditions are shown. The obtained results were subject of frequency analysis to define the dominant harmonics in the waveforms of axial force under specified operating conditions of the machine.

Słowa kluczowe: naciąg magnetyczny, silniki tarczowe, silniki indukcyjne

Keywords: magnetic pull effect, disk motor, induction motor

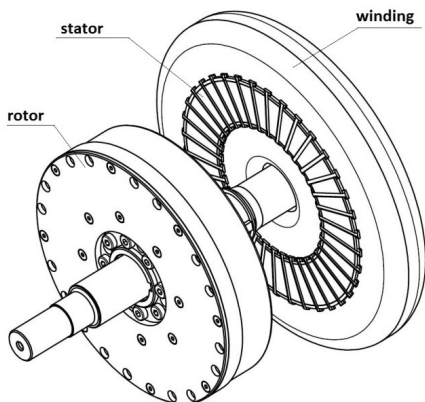
1. Wstęp

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań i analizę zjawiska naciągu magnetycznego w tarczowym silniku indukcyjnym. Tego rodzaju maszyny znajdują zastosowanie głównie z uwagi na specjalne właściwości, determinowane geometrią obwodu magnetycznego [1,2]. Jednym z rozwiązań konstrukcyjnych obwodu magnetycznego silników tarczowych indukcyjnych jest silnik z pojedynczą szczeliną powietrzną, skrótowo określanej w dalszej części publikacji jako AFIM 11 (Axial Flux Induction Motor) [1,2,3]. Uzasadnieniem stosowania tego rodzaju konstrukcji silnika są przede wszystkim względy ekonomiczne, jako że w silnikach małej mocy nie zachodzi potrzeba stosowania popularnych konstrukcji z podwójnym wirnikiem i podwójnym stojanem [2]. Znaczącą wadą rozwiązania AFIM11, są natomiast duże wartości sił osiowych naciągu magnetycznego pomiędzy stojanem i wirnikiem, występujące w trakcie normalnej pracy maszyny [1,2,3,4]. Siły te znacząco oddziałują na pracę łożysk, co należy uwzględnić na etapie konstrukcji mechanicznej i doboru poszczególnych podzespołów maszyny [1,2,3].

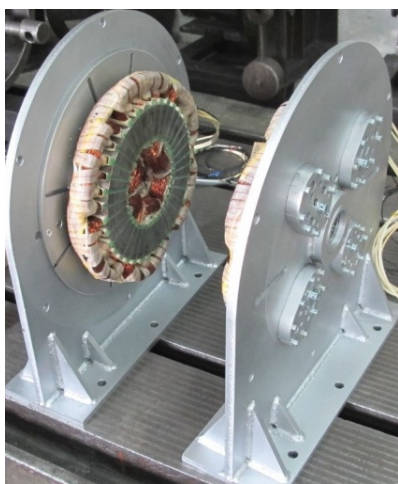
W literaturze znaleźć można znaczną ilość prac dotyczących pomiarów i analiz obliczeniowych promieniowego naciągu magnetycznego w silnikach cylindrycznych. Wyniki tych badań prezentowali między innymi Dorrell et al. [5,6] oraz Tenhunen et al. [7]. Wyraźnie brakuje natomiast prac poświęconych zagadnieniu osiowego naciągu magnetycznego w silnikach tarczowych, pomimo, że jego wpływ na pracę maszyny jest znaczący. W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących sił osiowych naciągu magnetycznego w silniku tarczowym indukcyjnym, którego model przedstawiono na rysunku 1. Badania przeprowadzono na dedykowanym stanowisku badawczym wyposażonym w czujniki tensometryczne typu EMS70-5kN. Głównym celem prac było określenie wartości działających sił osiowych naciągu magnetycznego, ich zmian w wybranych stanach pracy silnika, określenie dominujących częstotliwości w przebiegach czasowych pulsacji tych sił oraz określenie wpływu naciągu magnetycznego na najbardziej neuralgiczny i podatny na uszkodzenia podzespół konstrukcyjny silnika tj. łożyska.

2. Obiekt badań

Obiektem badań był tarczowy silnik indukcyjny typu AFIM11 o liczbie biegunów $2p=6$. Podstawowe dane dotyczące wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego, uzwojenia oraz parametrów znamionowych badanego silnika przedstawiono w tabeli 1, natomiast na rysunku 1 przedstawiono jego model obwodu elektromagnetycznego. Rdzeń stojana i wirnika wykonano jako zwijka taśmy prądnicowej typu M470-50A, w której metodą elektroerozyjną wycięto żłobki. W żłobkach stojana znajduje się symetryczne, trójfazowe uzwojenie o współczynniku uzwojenia $k_w=0.933$. W wirniku zastosowano uzwojenie klatkowe posiadające dwa pierścienie zwierające (górny i dolny).



Rys. 1. Obwód elektromagnetyczny badanego silnika tarczowego indukcyjnego



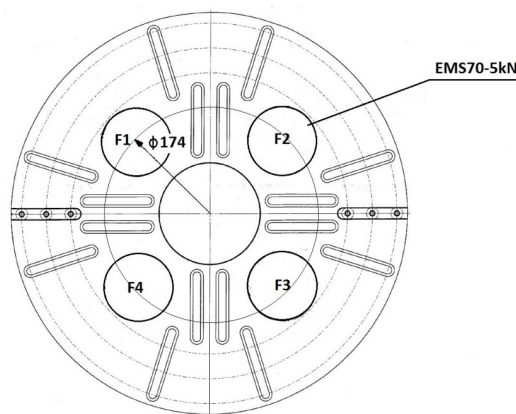
Rys. 2. Uzwojony stojan silnika zamontowany w płycie czołowej stanowiska badawczego

Obwód elektromagnetyczny tarczowego silnika indukcyjnego zainstalowano na dedykowanym stanowisku badawczym, przystosowanym do pomiaru sił osiowych naciągu magnetycznego (rys. 2).

Tabela 1. Podstawowe dane konstrukcyjne badanego silnika tarczowego

Średnica zewnętrzna stojana	205	mm
Średnica wewnętrzna stojana	130	mm
Dł. osiowa obw.	100	mm
Długość szczeliny powietrznej	0.85	mm
Liczba biegunów	6	-
Liczba faz uzwojenia stojana	3	-
Liczba żłobków stojana	36	-
Liczba żłobków wirnika	40	-
Współczynnik uzwojenia	0.933	-
Znamionowe napięcie zasilania	400	V
Znamionowa częstotliwość	50	Hz
Znamionowa moc	1500	W
Znamionowy moment	15	Nm
Znamionowy prąd	3.4	A

Stanowisko wyposażone jest w czujniki tensometryczne typu EMS70-5kN, umieszczone na płycie czołowej, do której mocowany jest również uzwojony stojan. Sposób rozmieszczenia oraz numerację poszczególnych czujników przedstawiono na rysunku 3. Wypadkowa wartość siły osiowej naciągu magnetycznego jest sumą sił zmierzonych w danej chwili czasowej na poszczególnych czujnikach.

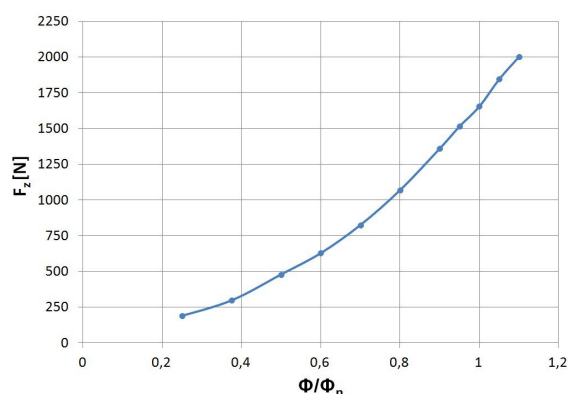


Rys. 3. Rozmieszczenie i numeracja czujników EMS70-5kN na płycie czołowej stanowiska badawczego

3. Siły osiowe na biegu jałowym silnika

Na biegu jałowym silnika przeprowadzono między innymi pomiary sił osiowych naciągu magnetycznego w funkcji zmian napięcia zasilania przy stałej częstotliwości (zmiana głównego strumienia magnetycznego). Na rysunku 4 przedstawiono wykres obrazujący zależność wypadkowej siły osiowej naciągu magnetycznego F_z , w funkcji zmian względnej wartości

głównego strumienia magnetycznego Φ , który odniesiony został do wartości strumienia znamionowego Φ_n .



Rys. 4. Zależność wypadkowej siły osiowej naciągu magnetycznego w funkcji zmian głównego strumienia magnetycznego

Na szczególną uwagę zasługuje wartość zmierzonych sił osiowych naciągu magnetycznego, która w znamionowym punkcie pracy silnika (400V, 50Hz) wynosi ok. 1650 N. Jest to wartość ok. 9-krotnie większa od wartości siły obwodowej F_r generującej znamionowy moment obrotowy, która mierzona na średnim promieniu tarcz stojana i wirnika badanego silnika wynosi ok. 180 N. Dla poszczególnych wartości napięcia zasilania silnika, odpowiadających kolejnym, względnym wartościom głównego strumienia magnetycznego, zarejestrowano przebie-

gi czasowe siły osiowej oraz przeprowadzono ich analizę harmoniczną. Wyniki przedstawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 5. W tabeli 2 ujęto jedynie harmoniczne o dominujących wartościach amplitudy. Z przebiegów przedstawionych na rysunku 5 usunięto wartość składowej stałej, aby rysunki były bardziej czytelne. Przedstawione przebiegi obrazują więc wprost przebieg pulsacji siły osiowej naciągu magnetycznego.

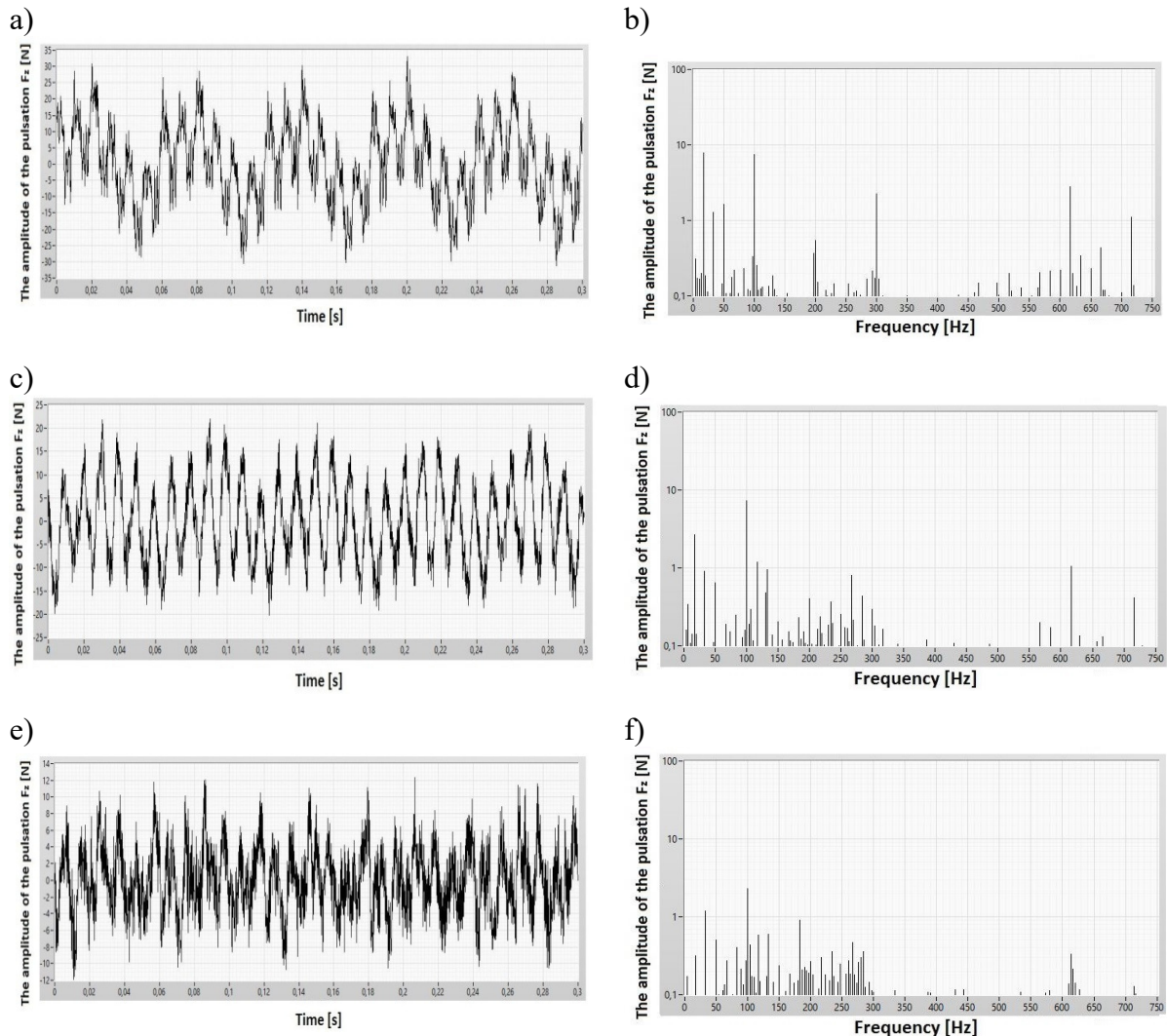
Zarejestrowane przebiegi czasowe, jak również ich analiza harmoniczna pokazują, że dominującymi częstotliwościami w przebiegu czasowym siły osiowej są:

- częstotliwość wirowania pola magnetycznego (16.67 Hz), co odpowiada prędkości synchronicznej 1000 obr/min.,
- podwojona częstotliwość wirowania pola magnetycznego (33.33 Hz),
- częstotliwość napięcia zasilania (50 Hz),
- podwojona częstotliwość napięcia zasilania (100 Hz), co precyzyjnie wyjaśnia Dorrel et al. [9],
- częstotliwości "złobkowe" w przedziale 600-716.67 Hz, związane ze zmianą reluktancji obwodu magnetycznego przy aktualnej prędkości obrotowej wirnika.

Na podstawie przedstawionych wyników sporządzono wykresy obrazujące charakter zmian wybranych harmoniczných.

Tabela 2. Amplitudy pulsacji siły osiowej F_z dla dominujących harmoniczných przy zmianach wartości głównego strumienia magnetycznego i stałej częstotliwości napięcia zasilania ($f=50\text{Hz}$) dla biegu jałowego silnika

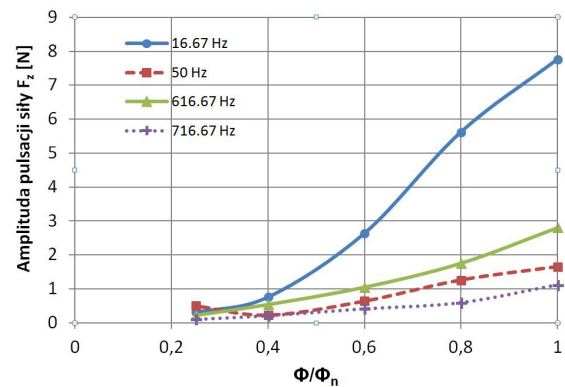
	Częstotliwości dominujących harmoniczných						
	16.67 Hz	33.33 Hz	50 Hz	100 Hz	616.67 Hz	666.67 Hz	716.67 Hz
Amplituda pulsacji F_z [N] $\Phi/\Phi_n=1$	7.76	1.27	1.65	7.53	2.8	0.39	1.11
Amplituda pulsacji F_z [N] $\Phi/\Phi_n=0.8$	5.62	1.08	1.26	9.47	1.75	0.17	0.59
Amplituda pulsacji F_z [N] $\Phi/\Phi_n=0.6$	2.64	0.91	0.64	7.34	1.04	0.13	0.41
Amplituda pulsacji F_z [N] $\Phi/\Phi_n=0.4$	0.76	1.3	0.23	5.24	0.53	0.07	0.21
Amplituda pulsacji F_z [N] $\Phi/\Phi_n=0.25$	0.31	1.18	0.5	2.29	0.21	0.03	0.1



Rys. 5. Przebiegi i analiza harmoniczna składowej zmiennej siły osiowej naciągu magnetycznego przy zmianach wartości głównego strumienia magnetycznego na biegu jałowym silnika:

- a, b - przy zasilaniu 400V, 50Hz, $\Phi/\Phi_n=1$;
 c, d - przy zasilaniu 240V, 50Hz; $\Phi/\Phi_n=0.6$;
 e, f - przy zasilaniu 100V, 50Hz, $\Phi/\Phi_n=0.25$

Można zauważyć, że wraz ze zmniejszaniem wartości głównego strumienia magnetycznego maleje amplituda harmonicznych 16.67 Hz, 50 Hz oraz amplituda częstotliwości "żłobkowych" związanych ze zmienną reluktancją magnetowodu stojana i wirnika. Na uwagę zasługuje również harmoniczna o częstotliwości 100 Hz, która jest podwojoną wartością częstotliwości napięcia zasilania. Wartość amplitudy tej harmonicznej jest dominująca niemal we wszystkich zarejestrowanych przebiegach przy zmianach wartości głównego strumienia magnetycznego. Harmoniczna o częstotliwości 300 Hz, widoczna na rys.5b pochodzi od źródła zasilania.



Rys. 6. Zmiany amplitudy wybranych harmonicznych pulsacji siły osiowej naciągu magnetycznego w funkcji zmian wartości głównego strumienia magnetycznego

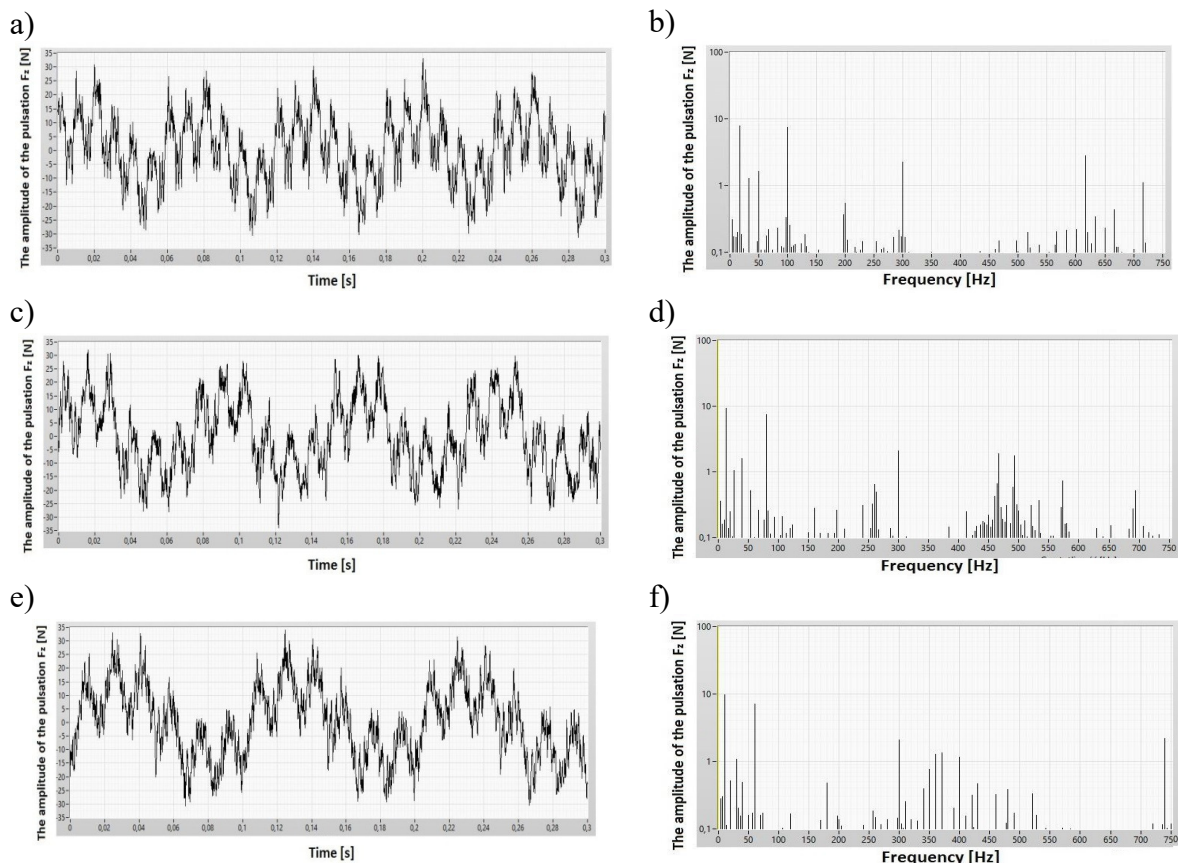
Dla biegu jałowego silnika przeprowadzono również pomiary sił osiowych naciągu magnetycznego w funkcji zmian częstotliwości napięcia zasilającego, przy zachowaniu stałej wartości głównego strumienia magnetycznego tzn. z zachowaniem zasady $U/f = \text{const.}$. Zarejestrowano przebiegi czasowe sił osiowych naciągu magnetycznego oraz przeprowadzono ich analizę częstotliwościową. Podobnie jak w poprzednim przypadku, z przebiegów usunięto wartość składową stałą w celu poprawy czytelności wyników. Wyniki zarejestrowanych przebiegów siły osiowej przy $U/f = \text{const.}$, dla częstotliwości napięcia zasilania 10-50 Hz, przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 7.

Z przedstawionych w tabeli 3 wyników można wnioskować, że sumaryczna wartość siły osiowej naciągu magnetycznego F_z jest niezależna od częstotliwości napięcia zasilania przy zachowaniu stałej wartości głównego strumienia magnetycznego. Wyniki przedstawione na rysunku 7 oraz w tabeli 3 pokazują, że przy zmianach częstotliwości zasilania i stałej war-

tości głównego strumienia magnetycznego w przebiegach siły osiowej dominują harmoniczne częstotliwości analogicznie do wyników przedstawionych w tabeli 2 i na rysunku 5. Można zauważyć, że dla każdej częstotliwości napięcia zasilania, dominującą składową w przebiegu pulsacji siły osiowej jest składowa związana z prędkością wirowania pola magnetycznego. Można uznać, że wartość amplitudy tej składowej jest stała, niezależna od wartości częstotliwości napięcia zasilania. Drugą składową dominującą w przebiegach sił osiowych jest harmoniczna o podwojonej częstotliwości napięcia zasilania $2f_s$. Wartość amplitudy tej składowej również można uznać za niezależną od częstotliwości napięcia zasilania (różnice pojawiają się dopiero przy bardzo małych wartościach napięcia zasilania i częstotliwości).

Tabela 3. Amplitudy pulsacji siły osiowej F_z dla dominujących harmonicznych przy zmianach częstotliwości napięcia zasilającego z zachowaniem $U/f = \text{const.}$ dla biegu jałowego silnika

Częstotliwości dominujących harmonicznych	16.67 Hz	33.33 Hz	50 Hz	100 Hz	616.67 Hz	666.67 Hz	716.67 Hz	ΣF_z
Amplituda pulsacji F_z [N], $U_{LL} = 400V, 50Hz$	7.76	1.27	1.65	7.53	2.8	0.39	1.11	1656
Częstotliwości dominujących harmonicznych	13.33 Hz	26.67 Hz	40 Hz	80 Hz	493.33 Hz	533.33 Hz	573.33 Hz	ΣF_z
Amplituda pulsacji F_z [N], $U_{LL} = 320V, 40Hz$	9.23	1.06	1.57	7.51	1.77	0.37	0.72	1641
Częstotliwości dominujących harmonicznych	10 Hz	20 Hz	30 Hz	60 Hz	370 Hz	400 Hz	430 Hz	ΣF_z
Amplituda pulsacji F_z [N], $U_{LL} = 240V, 30Hz$	9.78	0.51	1.07	7.18	1.33	1.14	0.47	1628
Częstotliwości dominujących harmonicznych	6.67 Hz	13.33 Hz	20 Hz	40 Hz	246.66 Hz	266.66 Hz	286.66 Hz	ΣF_z
Amplituda pulsacji F_z [N], $U_{LL} = 160V, 20Hz$	9.61	0.22	1.24	6.72	1.94	2.34	0.27	1614
Częstotliwości dominujących harmonicznych	3.33 Hz	6.66 Hz	10 Hz	20 Hz	123.33 Hz	133.33 Hz	143.33 Hz	ΣF_z
Amplituda pulsacji F_z [N], $U_{LL} = 80V, 10Hz$	11.34	0.49	0.88	4.37	0.27	1.29	0.1	1559



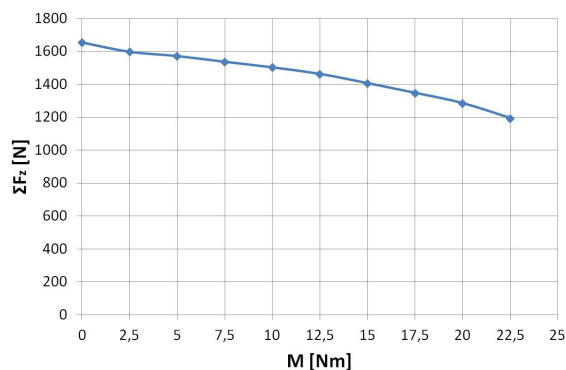
Rys. 7. Przebiegi i analiza harmoniczna składowej zmiennej siły osiowej naciągu magnetycznego na biegu jałowym silnika przy zmianach częstotliwości napięcia zasilania i stałej wartości głównego strumienia magnetycznego: a, b - przy zasilaniu 400V, 50Hz; c, d - przy zasilaniu 320V, 40Hz; e, f - przy zasilaniu 240V, 30Hz

4. Siły osiowe przy zmianach obciążenia

Wartości oraz przebiegi czasowe sił osiowych naciągu magnetycznego zarejestrowano również w stanie obciążenia silnika. W trakcie badań silnik obciążono momentem od 0 (bieg jałowy) do wartości 22.5 Nm ($1.5 M_n$). Na rysunku 8 przedstawiono zależność wypadkowej wartości siły osiowej naciągu magnetycznego w funkcji zmian momentu obciążenia. Wraz ze wzrostem obciążenia silnika sumaryczna wartość sił osiowych naciągu magnetycznego maleje. W tabeli 4 oraz na rysunku 9 przedstawiono przebiegi czasowe pulsacji oraz amplitudy dominujących harmonicznych sił osiowych naciągu magnetycznego dla wybranych wartości momentu obciążenia. Z analizy przedstawionych danych można wnioskować, że zmiana momentu obciążenia silnika tarczowego indukcyjnego powoduje:

- spadek wartości amplitudy harmonicznej 16.67 Hz, wynikającej z prędkości wirowania pola elektromagnetycznego,

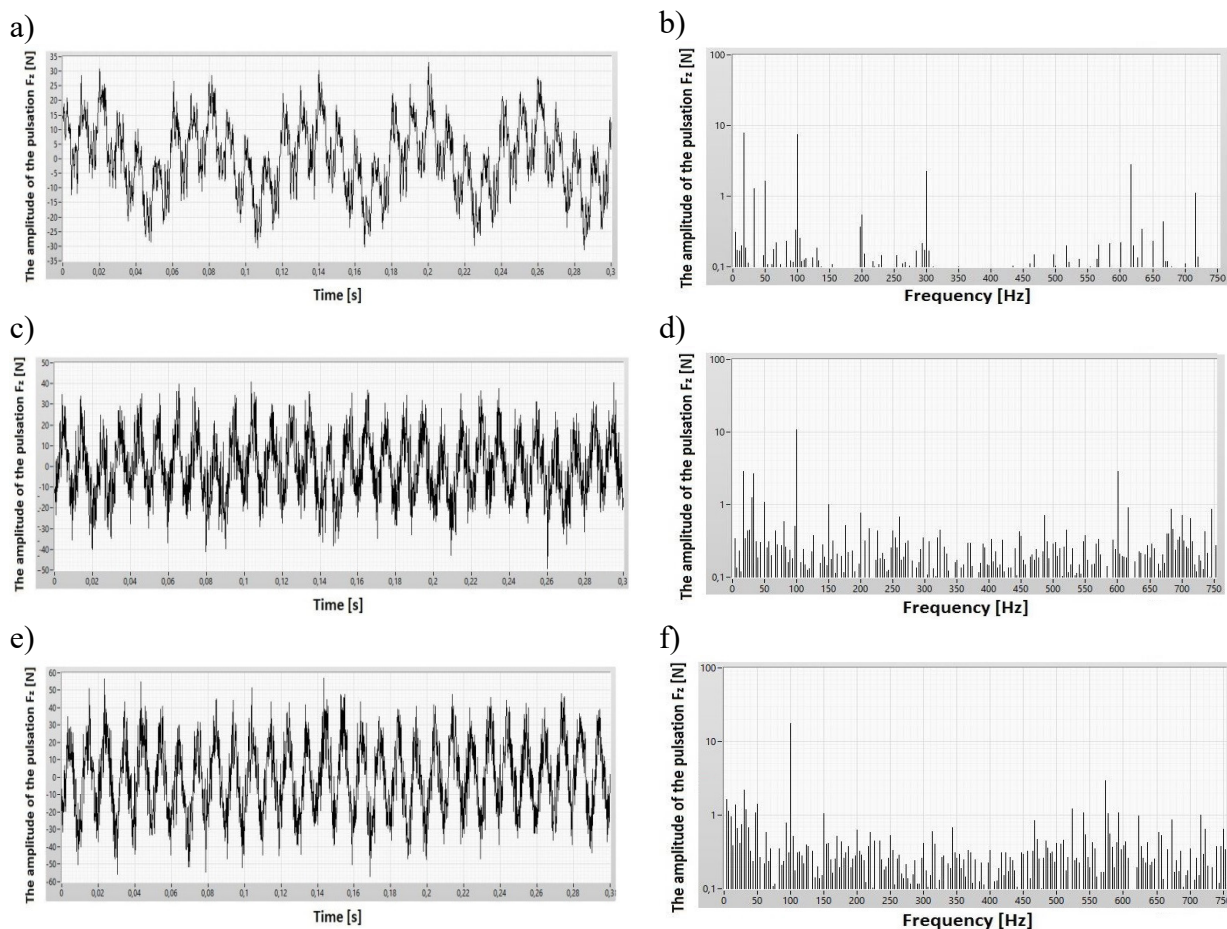
- wzrost wartości amplitudy harmonicznej 100 Hz, jako częstotliwości $2f_s$,
- przesunięcie harmonicznych "żółbkowych" wynikających ze zmiany reluktancji obwodu magnetycznego i aktualnej prędkości obrotowej wirnika w stronę niższych częstotliwości, analogicznie do wzrostu poślizgu.



Rys. 8. Zależność wypadkowej wartości siły osiowej naciągu magnetycznego w funkcji zmian momentu obciążenia silnika

Tabela 4. Amplitudy pulsacji siły osiowej F_z dla dominujących częstotliwości harmonicznych przy zasilaniu znamionowym 400V, 50Hz i zmianach momentu obciążenia silnika

Moment obciążenia [Nm]	Częstotliwości dominujących harmonicznych						
	16.67 Hz	33.33 Hz	50 Hz	100 Hz	616.67 Hz	666.67 Hz	716.67 Hz
0	7.76	1.27	1.65	7.53	2.80	0.39	1.11
2.5	5.89	2.02	1.30	8.26	0.62	0.25	0.19
5	3.61	1.77	1.28	8.40	0.28	0.31	0.11
7.5	3.63	2.33	2.58	9.47	0.52	0.10	0.05
10	2.83	2.69	1.07	10.76	0.90	0.12	0.31
12.5	2.01	2.47	0.43	11.59	0.68	0.06	0.29
15	1.91	2.44	1.12	13.68	0.21	0.06	0.27
17.5	1.78	1.81	0.38	15.16	0.04	0.19	0.34
20	1.38	1.18	1.41	17.35	0.06	0.34	0.99
22.5	1.34	0.60	3.2	20.18	0.26	0.28	0.14



Rys. 9. Przebiegi składowej zmiennej i analiza harmoniczna siły osiowej naciągu magnetycznego przy zasilaniu znamionowym 400V, 50Hz i zmianach wartości momentu obciążenia: a, b - dla biegu jałowego; c, d - przy obciążeniu 10 Nm; e, f - przy obciążeniu 20 Nm

5. Podsumowanie

W publikacji przedstawiono wyniki badań zjawiska naciągu magnetycznego w tarczowym silniku indukcyjnym z pojedynczą szczeliną powietrzną. Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie wartości sił osiowych naciągu magnetycznego w różnych stanach pracy silnika oraz ich zmian przy zmianach warunków pracy silnika. Dla każdego z analizowanych stanów pracy silnika przedstawiono przebiegi czasowe pulsacji siły osiowej oraz ich analizę częstotliwościową. Dzięki temu, określono charakterystyczne składowe częstotliwości oraz ich zmiany odpowiednio do charakteru zmian wielkości wejściowych. Przedstawione w niniejszym artykule dane powinny posłużyć szczególnie konstruktorom tego rodzaju maszyn, w trakcie projektu węzłów łożyskowych. Nieprawidłowe określenie wartości sił osiowych może powodować obniżenie sprawności całej maszyny oraz przedwczesne zużycie łożysk w konsekwencji ich złego doboru. Przyczyną tego są niekorzystne zjawiska tarcie i nadmierne straty mechaniczne. Siły te należy uwzględnić w kalkulacji obciążenia równoważnego łożysk. Zależność pomiędzy trwałością łożysk, a ich obciążeniem jest wykładnicza. Gdyby siły osiowe (biorąc pod uwagę ich 9-krotnie większą wartość w stosunku do sił generujących moment obrotowy) zostały pominięte, to żywotność łożysk zmalałaby co najmniej 3s-krotnie w stosunku do prognozowanej bez ich uwzględnienia, gdzie s oznacza stosunek obciążenia równoważnego do promienowego. W tego rodzaju maszynach zalecane jest więc stosowanie łożysk kulkowych skośnych lub stożkowych. Istnieją metody ograniczenia tak dużych wartości sił osiowych [4,5,6], jednakże w przypadku silników o stosunkowo małej mocy znacznie komplikuje do konstrukcję maszyny oraz zwiększa koszt jej wykonania. Rozwiązaniem tańszym jest, na etapie projektowania, wzmocnienie węzłów łożyskowych maszyn tarczowych pozwalających na przeniesienie odpowiednich wartości sił osiowych.

6. Literatura

- [1]. Parviainen, A.: "Design of axial-flux permanent magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines", PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, 2005.
- [2]. Valtonen, M.: "Performance characteristics of an axial-flux solid-rotor-core induction motor", PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, 2007.
- [3]. Nasiri-Gheidari, Z., Lesani, H.: "A Survey on Axial Flux Induction Motors", *Electrical Review*, 2012, 2, pp 300-305.
- [4]. Wang, R-J., Kamper, M.J., Van der Westhuizen, K., Gieras, F.J.: "Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator", *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 1, (41), pp 55-64.
- [5]. Dorrell, D.G.: "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.
- [6]. Dorrell, D.G., Popescu, M., Ionel, D.M.: "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 Rotors", *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 7, (46), pp 2675-2685.
- [7]. Tenhunen, A., Benedetti, T., Holopainen, T.P., Arkkio, A.: "Electromagnetic forces of the cage rotor in conical whirling motion", *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 2003, 5, (150), pp 563-568.

Niniejsza praca powstała w wyniku realizacji prac naukowych prowadzonych w ramach projektu finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki w Polsce, jako projekt badawczy o numerze UMO-2012/07/B/ST8-/04099.