

Bronisław Drak, Piotr Zientek, Roman Niestrój, Andrzej Boboń
Politechnika Śląska, Gliwice
Józef Kwak, Zabrzeńskie Zakłady Mechaniczne, Zabrze
Jan Marek Lipiński, Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT S.A., Żychlin

WPLYW ASYMETRII SZCZELINY POWIETRZNEJ NA WARTOŚĆ NAPIĘĆ I PRĄDÓW WAŁOWYCH W SILNIKACH INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY

INFLUENCE OF THE AIR GAP ASYMMETRY ON THE VALUES OF SHAFT VOLTAGES AND CURRENTS IN HIGH POWER INDUCTION MOTORS

Abstract: The paper presents the influence of the air gap asymmetry on the values of shaft voltages and currents. The investigations were performed with use of high power induction motor dSKgw 315 L-4 of 300 kW rated power and 1000 V rated voltage. In the section 1 are presented sorts of threats caused by bearing currents. Sorts of eccentricity of electrical machines are presented in section 2. In the section 3 the laboratory measurement system is described and applied measurement methods are presented as well. The results of laboratory investigations are presented in section 4. Conclusions drawn from investigations are placed in section 5.

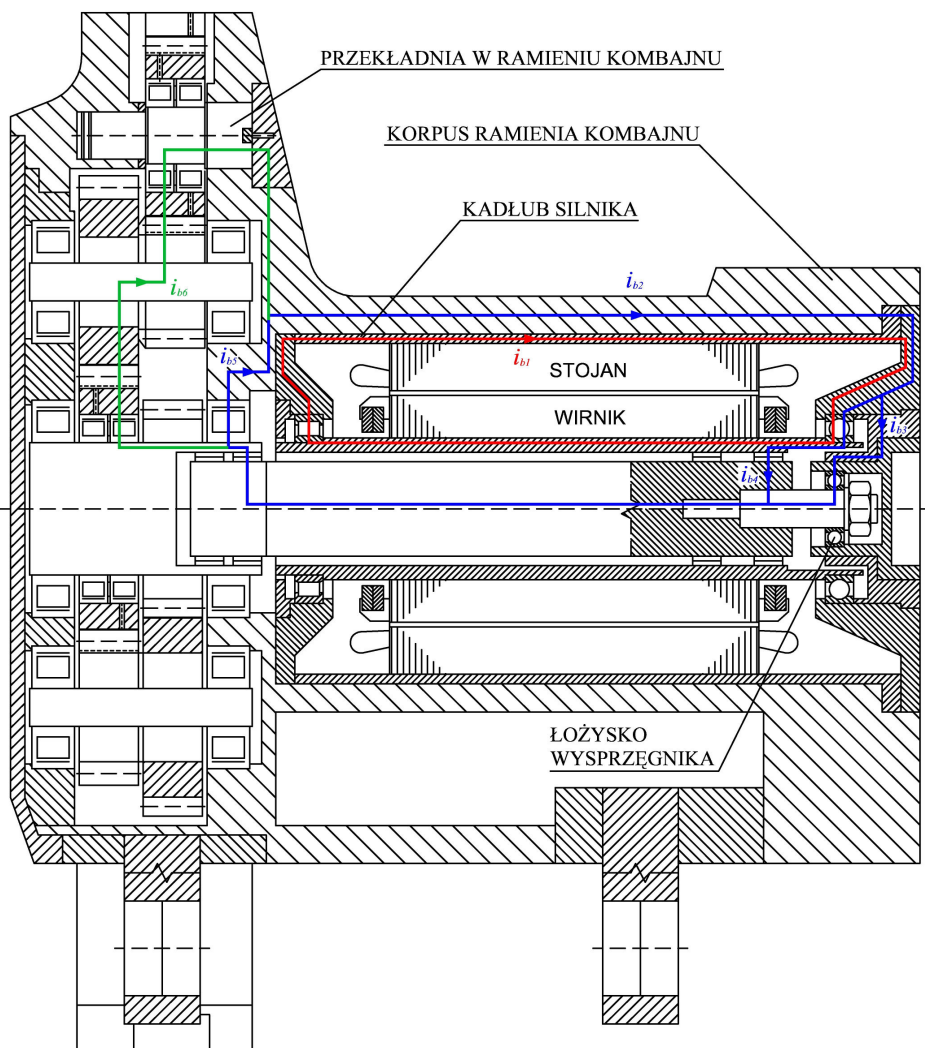
1. Wstęp

W silnikach indukcyjnych trójfazowych o mocach 300 kW i napięciach znamionowych 1000 V lub 3300 V przeznaczonych do napędu organów urabiających górniczych kombajnów ścianowych stwierdzono wysoki poziom napięć wałowych w stanach dynamicznych, wywołanych bezpośrednim załączeniem zasilania z sieci [1, 2]. Przedmiotowe silniki są przystosowane do takiego rozruchu i w związku z tym w kombajnach nie stosuje się urządzeń rozruchowych. Wysoki poziom napięć wałowych może wywoływać prądy łożyskowe, co znacznie przyspiesza uszkodzenie łożysk.

Produkowane obecnie w kraju silniki o mocach 300 kW i większych do napędu organów urabiających są wyposażone w wyprężniki obrotów, a ich moment obrotowy przenoszony jest do przekładni w ramieniu poprzez wałek bezpieczeństwa umieszczony wewnątrz przelotowego wału drążonego silnika. Należy podkreślić, iż w przypadku silników z wyprężnikami obrotów, po ich zabudowaniu w ramieniu kombajnu, istnieją dwa obwody, w których mogą indukować się napięcia wałowe (rys. 1).

Pierwszą z tych dróg tworzą: drążony wał silnika, obydwie łożyska wału oraz tarcze łożyskowe i korpus silnika. Prąd łożyskowy (i_{b1}) płynący tą drogą stwarza zagrożenie dla łożysk wirnika silnika. Drugą drogę przepływu prądu łożyskowego stanowią: wałek bezpieczeństwa,

łożysko wysprężnika, tarcza łożyskowa strony przeciwnapędowej, część korpusu ramienia, w którym posadowiony jest silnik oraz obudowa i łożysko przekładni ramienia od strony silnika (prąd i_{b3}). W przypadku gdy wystąpią odpowiednie warunki, gdy wałek wyprężnika obrotów jest zazębiony z wałem silnika, część prądu łożyskowego i_{b2} może płynąć także poprzez łożysko silnika strony przeciwnapędowej (prąd i_{b4}). Dodatkowo w wyjątkowej sytuacji prąd ten może popłynąć także poprzez zębunki przekładni (prąd i_{b6}), a nie przez łożysko przekładni ramienia (prąd i_{b5}). Prąd łożyskowy płynący tą drogą stwarza głównie zagrożenie dla łożyska wyprężnika (prąd i_{b3}), łożyska silnika strony przeciwnapędowej (prąd i_{b4}) oraz łożyska przekładni ramienia (prąd i_{b5}). W związku z powyższym można stwierdzić, że nadmierne napięcia wałowe silników mogą oddziaływać negatywnie zarówno na łożyska własne silnika, jak i na łożyska przekładni przenoszącej napęd z silnika do organu urabiającego. Celowe jest więc podjęcie badań mających na celu zmniejszenie napięć wałowych do poziomu wartości bezpiecznych, które nie wywołają przepływu niebezpiecznych prądów łożyskowych. W konsekwencji nastąpi wydłużenie okresu bezawaryjnej pracy silnika bez konieczności instalowania w nim dróg łożysk izolowanych.



Rys. 1. Droga przepływu prądu łożyskowego w silniku indukcyjnym oraz w ramieniu kombajnu

2. Rodzaje ekscentryczności

Mimośrodowość, czyli ekscentryczność maszyn jest wynikiem nierównej szczeliny powietrznej, która istnieje między stojanem a wirnikiem [4, 6]. Spowodowane jest to tym, że tolerancje szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem są bardzo małe. Niewielkie ich przekroczenie może spowodować tarcie wirnika o stojan, co w konsekwencji może prowadzić do uszkodzenia maszyny.

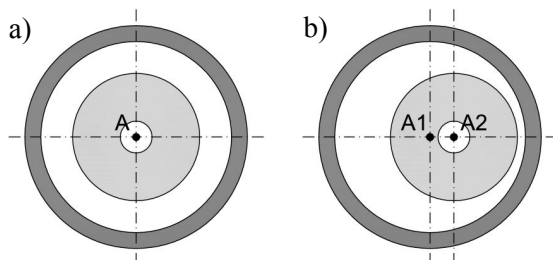
Nierównomierność szczeliny powietrznej może być uszkodzeniem pierwotnym lub wtórnym.

O uszkodzeniu pierwotnym mówi się wówczas, gdy silnik posiada niesymetrię od początku eksploatacji. Jest ona wywołana najczęściej niekołowym otworem stojana lub tym, że przekrój poprzeczny wirnika jest niekołowy.

Natomiast, z uszkodzeniem wtórnym mamy do czynienia wtedy, gdy wystąpi niesymetria szczeliny powietrznej na skutek długotrwałej eksploatacji w warunkach np. niewyosiowania napędu lub zużycia łożysk. Rozróżnia się trzy rodzaje ekscentryczności [3]: statyczna, dynamiczna i mieszana. W przypadku ekscentryczności statycznej, położenie minimalnej szczeliny powietrznej jest stałe w przestrzeni. Niewspółosiowość statyczna może zostać wywołana przez owalność rdzenia stojana lub przez niepoprawne pozycjonowanie (ustawienie) wirnika lub stojana na etapie przekazania do eksploatacji. Jeżeli układ wirnik-wał jest dostatecznie sztywny, wówczas poziom ekscentryczności statycznej nie ulega zmianie. W przypa-

dku ekscentryczności dynamicznej środek wirnika nie jest środkiem wirowania (obrotu) i położenie minimalnej szczeliny powietrznej przemieszcza się po obwodzie stojana. Mimośrodowość ta może być spowodowana takimi czynnikami jak: zgięty wał wirnika, nierównomierny naciąg magnetyczny, zużyte łożyska, niewspółosiowość lub mechaniczny rezonans przy krytycznej prędkości. Występowanie ekscentryczności dynamicznej powoduje przedwczesne zużycie łożysk, grzanie się łożysk i niekontrolowany ubytek smarowania, co w konsekwencji przy dużym jej poziomie powoduje tarcie wirnika o stojan doprowadzając do zniszczenia maszyny [3].

Według danych literaturowych [6] w nowych silnikach dopuszczalna jest nierównomierność szczeliny powietrznej do 10%. Jednakże producenci silników zwykle starają się zapewnić jeszcze niższy poziom ekscentryczności, aby zredukować drgania i hałas oraz zmniejszyć niesymetryczną siłę promieniową.



A – środek stojana i oś obrotu wirnika,

A1 - środek stojana,

A2 – oś obrotu wirnika

Rys. 2. Usytuowanie wirnika w otworze stojana: a) współosiowe, b) mimośrodowe

W silnikach indukcyjnych najczęściej występuje jednocześnie ekscentryczność statyczna i dynamiczna, czyli tzw. ekscentryczność mieszana. W tym przypadku oś wirowania znajduje się gdzieś pomiędzy punktami A1 i A2, jak pokazano na rysunku 2. Asymetria szczeliny powietrznej powoduje zmianę sprzężeń magnetycznych pomiędzy poszczególnymi uzwojeniami silnika. Ma to znaczny wpływ na postać widma prądu stojana. Zależność ta jest wykorzystywana do wykrywania ekscentryczności maszyn elektrycznych metodą analizy spektralnej prądu stojana (ang. Motor Current Signature Analysis MCSA) [3, 5, 6, 7]. Dla silników indukcyjnych, charakterystyczne częstotliwości dla każdego rodzaju ekscentryczności można opisać równaniem:

$$f_e = f_s \left[(kN_r \pm n_d) \frac{1-s}{p_b} \pm n_w \right] \quad (1)$$

gdzie:

f_s – częstotliwość sieciowa,

$k = 1, 2, 3, \dots$ – kolejna liczba naturalna,

N_r – liczba zębów wirnika,

$n_d = 1, 2, 3, \dots$ – rząd ekscentryczności dynamicznej ($n_d = 0$, gdy ekscentryczność dynamiczna nie występuje),

s – poślizg,

p_b – liczba par biegunów,

$n_w = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$ – rząd harmonicznych czasowych stojana.

W zbiorze częstotliwości wyznaczonych z zależności (1) występują dwie częstotliwości powiązane z liczbą par biegunów p_b i liczbą zębów wirnika N_r charakterystyczne dla stanu symetrii [3] (w przypadku braku przewodu zerowego w zasilaniu silnika, występuje tylko jedna taka częstotliwość). Harmoniczne o tych częstotliwościach noszą nazwę tzw. głównych harmonicznych zębówkowych (ang. Principal Slot Harmonics PSH). Główną harmoniczną zębówkową dla silników indukcyjnych można obliczyć z zależności:

$$f_{PSH} = N_r f_r \pm f_s \quad (2)$$

Porównując wzory (1) i (2) można zauważyć, że częstotliwość PSH jest obliczana dla:

$$k=1, n_d=0, n_w=1 \text{ oraz } f_r = f_s \frac{1-s}{p_b}.$$

We wzorze (1) występują trzy grupy harmonicznych:

- k – związane z wirnikiem,
- n_d – związane z ekscentrycznością,
- n_w – związane ze stojanem.

Jeżeli jednocześnie występuje ekscentryczność statyczna i dynamiczna, to w widmie prądu stojana będą widoczne harmoniczne o częstotliwościach bliskich częstotliwości sieciowej:

$$f_{ed} = |f_s \pm k f_r| \quad (3)$$

Podsumowując powyższe rozważania można jednoznacznie stwierdzić, że w przypadku występowania różnych asymetrii szczeliny powietrznej można zaobserwować występowanie w widmie prądu stojana następujące rodzaje harmonicznych:

- ekscentryczność mieszana

$$f_e = f_s \left[(kN_r \pm n_d) \frac{1-s}{p_b} \pm n_w \right] \quad (4)$$

- ekscentryczność statyczna

$$f_{es} = f_s \pm kN_r f_r \quad (5)$$

- ekscentryczność dynamiczna

$$f_{ed} = f_s \pm k f_r \quad (6)$$

gdzie:

f_s – częstotliwość sieci zasilającej, s - poślizg,

p_b – liczba par biegunów, $k = 1, 2, 3, \dots$

N_r – liczba żłobków wirnika, $n_d = 1, 2, 3, \dots$

$$n_w = 1, 3, 5, \dots, f_r = f_s \frac{1-s}{p_b}$$

3. Opis stanowiska badawczego

Obiektem badań był silnik indukcyjny typu dSKgw 315L-4 o mocy znamionowej 300 kW i napięciu znamionowym 1000 V. Na silniku tym realizowano wcześniej badania napięć wałowych powstających podczas rozruchów przy bezpośrednim załączeniu napięcia zasilania, oraz podczas pracy na biegu jałowym. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.

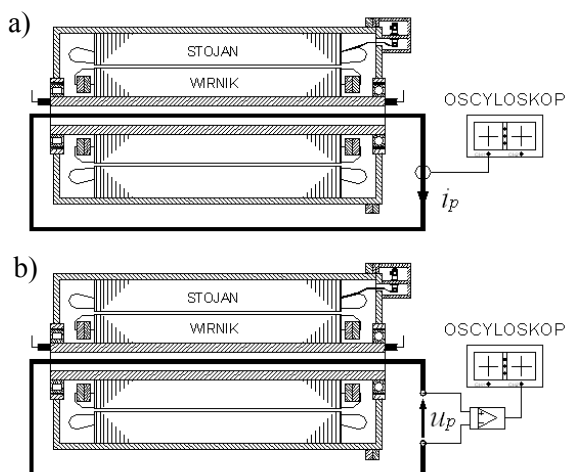


Rys. 3. Stanowisko pomiarowe z silnikiem typu dSKgw 315L-4, 300 kW, 1000 V

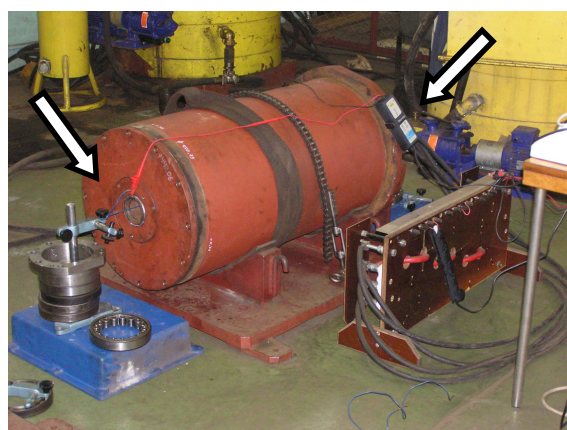
Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu określenie jak wpływa różny stopień ekscentryczności wirnika na wartość napięcia wałowego i prądu łożyskowego. Do badań wykorzystano silnik z drążonym wałem, wewnątrz którego umieszczono przewód pomiarowy o przekroju 50 mm². Dodatkowo, silnik wyposażono w izolowane łożysko. Dla każdego rodzaju ekscentryczności wirnika, pomiary wykonano dwukrotnie. Raz mierzono napięcie na otwartym przewodzie umieszczonym wewnątrz wału silnika (rys. 4b) (napięcie to jest równe napięciu wałowemu mierzonemu na końcach wału silnika [1]), a za drugim razem

przewód ten zwarto i mierzono wartość prądu przepływającego w tym przewodzie (rys. 4a). O wartości tego prądu decyduje poziom napięcia wałowego oraz przekrój tego przewodu. W ten sposób uzyskuje się układ pomiarowy o takich samych cechach i właściwościach dla każdej serii pomiarowej. Metody te opracowane zostały przez autorów artykułu, a szeroko opisane zostały w publikacjach [1, 2, 8]. Sposób pomiaru napięcia wałowego, prądu łożyskowego oraz prądu w zwartym przewodzie pomiarowym przedstawiono na rysunkach 5-7. Zmianę przebiegu szczeliny powietrznej w silniku uzyskano poprzez zmianę położenia wirnika w otworze stojana.

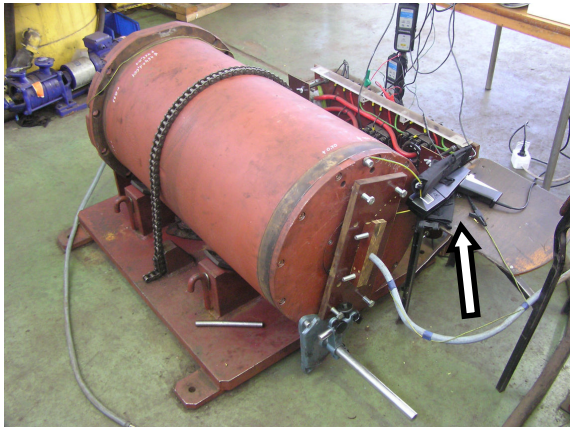
W przedmiotowym silniku konstrukcyjna wartość szczeliny powietrznej wynosi 1,4 mm.



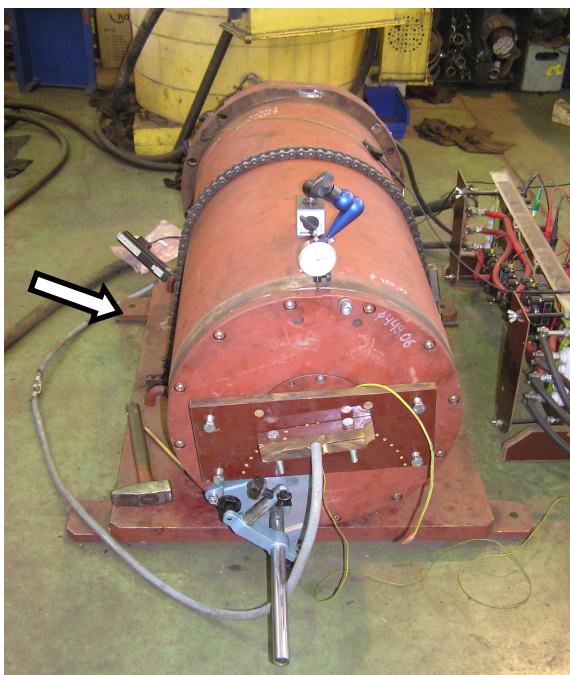
Rys. 4. Schemat układu pomiarowego



Rys. 5. Sposób pomiaru napięcia wałowego



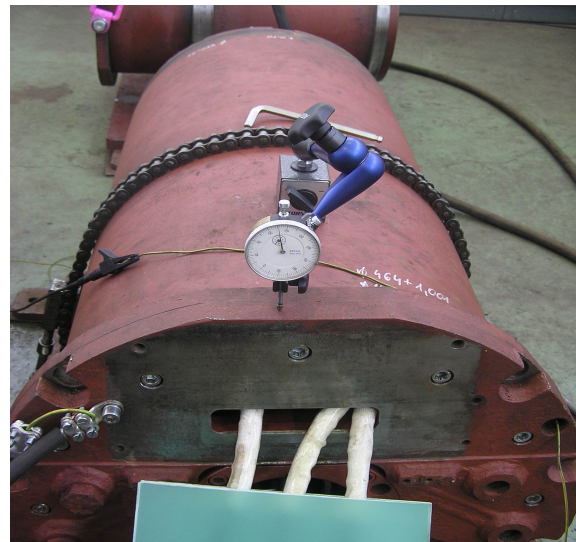
Rys. 6. Sposób pomiaru prądu łożyskowego



Rys. 7. Sposób pomiaru prądu w zwartym przewodzie pomiarowym

Wykonane pomiary średnic zewnętrznych pakietu wirnika, oraz jego centryczności w odniesieniu do osi czopów łożyskowych wału wykazały, iż średnice, błędy kształtu oraz bicia promieniowe pakietu blach wirnika mieszczą się w założonym konstrukcyjnie polu tolerancji js7 (odchyłki $\begin{matrix} +0,026 \\ -0,026 \end{matrix}$ mm), w związku z czym uznano iż wirnik nie wymaga korekt. Podobnie pomierzono otwór pakietu stojana i stwierdzono, że pomierzone średnice oraz błędy kształtu otworu pakietu mieszczą się w konstrukcyjnie założonym polu tolerancji H8 (odchyłki $\begin{matrix} +0,081 \\ -0,000 \end{matrix}$ mm). Zmianę położenia wirnika w otworze stojana zrealizowano przez przemieszczanie tarcz łożyskowych względem kadłuba, które umo-

żliwiono w wyniku powiększenia luzów promieniowych na połączeniach zamków tarcz łożyskowych N i D z odpowiednimi zamkami kadłuba. W tym celu średnice zamków N i D kadłuba roztoczono w/g osi otworu pakietu stojana o wartość 0,8 mm. Również średnice zamków tarcz łożyskowych N i D zostały stoczone w/g osi komór łożyskowych o wartość 0,8 mm. Dodatkowo w tarczach łożyskowych powiększono otwory dla śrub mocujących tarcze z kadłubem o wartość 1 mm. Zabiegi te pozwoliły zmieniać położenie wirnika w otworze stojana przy zachowaniu równoległości ich osi, jak też przy skośnym usytuowaniu w/w osi. Pomiar ustawienia tarcz łożyskowych w odniesieniu do kadłuba, a co za tym idzie ustalenie konkretnego przebiegu szczeliny powietrznej między stojanem a wirnikiem dokonywano czujnikami zegarowymi (rys. 8). W ten sposób uzyskano regulację szczeliny jednostronnej w zakresie 0,6 – 2,2 mm.



Rys. 8. Kontrolowany pomiar przesunięcia pokrywy silnika (zmiana grubości szczeliny powietrznej)

Zmniejszenie wartości minimalnej szczeliny powietrznej poniżej 0,6 mm zdaniem autorów byłoby zbyt ryzykowne, albowiem mogłoby grozić zatarciem pakietów wirnika i stojana.

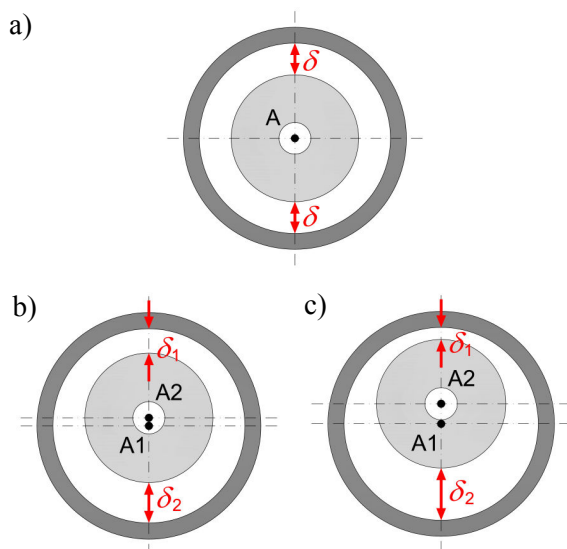
W silniku zastosowano po stronie przeciwnapędowej łożysko kulkowe 60242ZC3, a po stronie napędowej łożysko walcowe z izolowanym elektrycznie pierścieniem zewnętrznym INSOCOAT NU1022ML/C3 VA3091 produkcji SKF (rys. 9). W celu wykonania pomiarów prądów łożyskowych wymagane było połączenie krótkim przewodem zewnętrznego pierścienia izolowanego łożyska walco-

wego z korpusem silnika (rys. 6). Na przewód założono sondę pomiarową typu: TCP404XL.



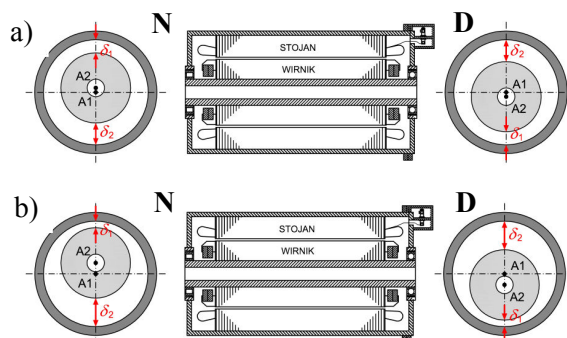
Rys. 9. Konstrukcja tarczy łożyskowej z izolowanym łożyskiem od strony napędowej w silniku indukcyjnym typu dSKgw 315L-4

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla szczeliny powietrznej znamionowej (czyli symetrycznej) (rys. 10a), oraz dla kilku asymetrii (rys. 10b, c, rys. 11). Przedstawione asymetrie na rysunku 10 b i c wykonano w ten sposób, że ustawiono taką samą asymetrię po stronie napędowej i przeciwnapędowej silnika, zachowując jednocześnie równoległość osi wyznaczającej środek stojana i osi obrotu wirnika. Inaczej przedstawia się sytuacja na rysunku 11, gdyż tam nie zachowano równoległości w/w osi. Miało to na celu przedstawienie innego typu ekscentryczności statycznej, która najczęściej występuje w silnikach indukcyjnych.



Rys. 10. Usytuowanie wirnika w otworze stojana:

- a) szczelina symetryczna: $\delta=1,4\text{mm}$,
 b) asymetria szczeliny: $\delta_1=0,9\text{mm}$, $\delta_2=1,9\text{mm}$,
 c) asymetria szczeliny: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$



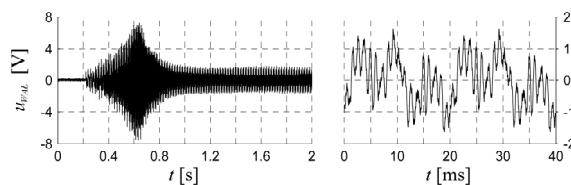
Rys. 11. Usytuowanie skośne wirnika w otworze stojana:

- a) asymetria, skośne ustawienie osi wirnika względem osi stojana: strona N: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$, strona D: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$,
 b) asymetria, skośne ustawienie osi wirnika względem osi stojana: strona N: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$, strona D: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$

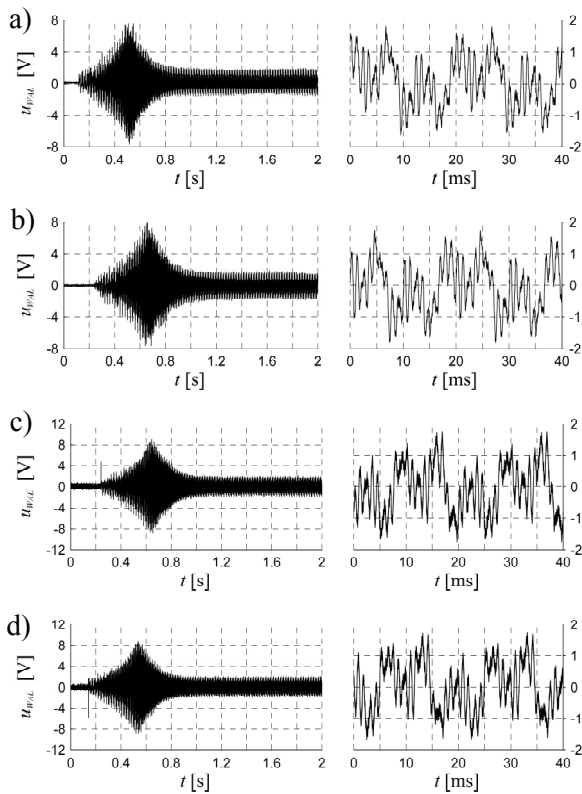
W celu dokładnego zobrazowania proporcji co do wielkości ustawianych szczelin w badanym silniku, na powyższych rysunkach celowo przesadnie powiększono szczelinę powietrzną.

4. Wyniki badań

Wykorzystując metody pomiarowe opisane w rozdziale 3 dokonano pomiaru napięcia wałowego przy rozwartym przewodzie pomiarowym umieszczonym wewnątrz wału silnika, oraz jednoczesny pomiar napięcia wałowego i prądu w zwartym przewodzie pomiarowym. Pomiary wykonano podczas rozruchu silnika, oraz w stanie ustalonym. Wyniki przedstawiono na rysunkach 12-17. Dodatkowo z przebiegów tych ze stanu ustalonego wykonano transformaty Fouriera, w celu określenia różnic w zarejestrowanych przebiegach. Wyniki przedstawiono na rysunkach 18-19. Wszystkie te pomiary i obliczenia wykonano dla każdej ekscentryczności wirnika, zachowując takie same warunki pomiaru (zastosowane metody pomiarowe, użyty sprzęt pomiarowy, temperatura silnika i temperatura łożysk).

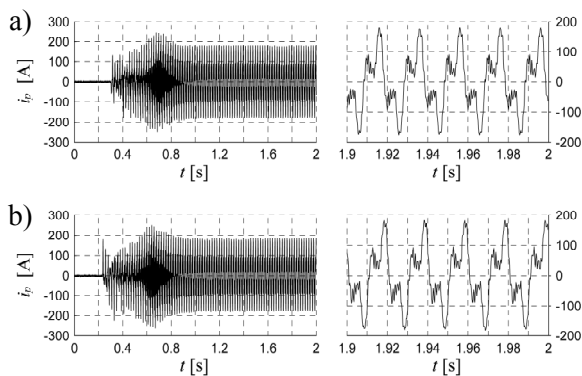


Rys. 12. Przebieg napięcia wałowego przy szczeliny powietrznej symetrycznej ($\delta=1,4\text{mm}$)



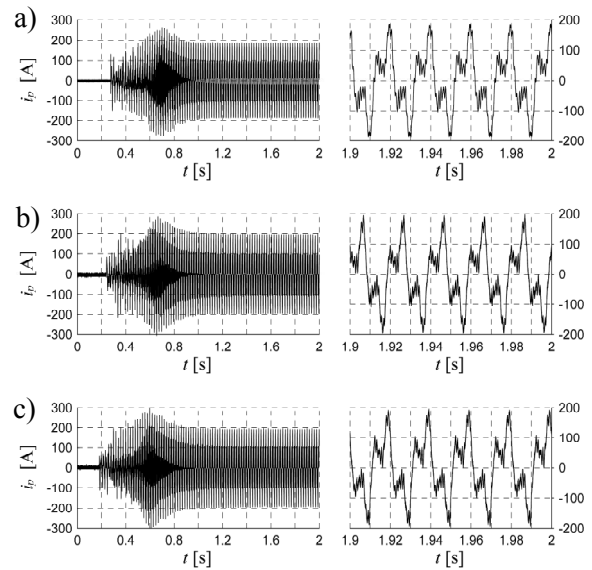
Rys. 13. Przebieg napięcia wałowego przy różnej wartości szczeliny powietrznej:

- a) asymetria: $\delta_1=1,9\text{mm}$, $\delta_2=0,9\text{mm}$,
 b) asymetria: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$,
 c) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=1,8\text{mm}$, $\delta_2=1,0\text{mm}$, strona D: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$,
 d) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$, strona D: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$



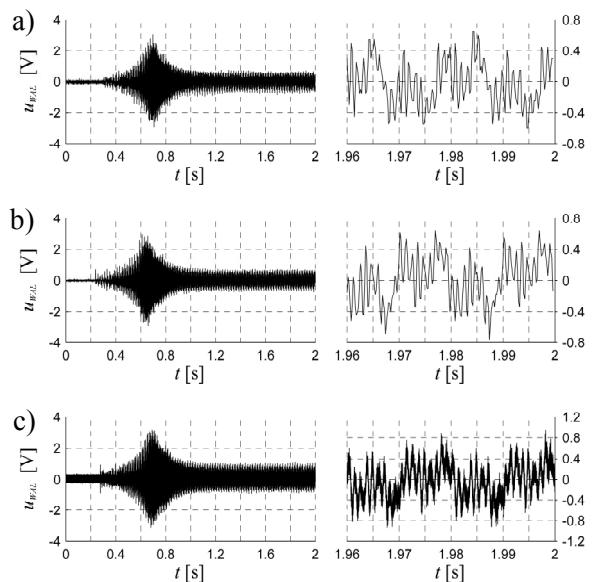
Rys. 14. Przebieg prądu w zwartym przewodzie pomiarowym przy różnej wartości szczeliny powietrznej:

- a) symetryczna: $\delta=1,4\text{mm}$,
 b) asymetria: $\delta_1=1,9\text{mm}$, $\delta_2=0,9\text{mm}$,



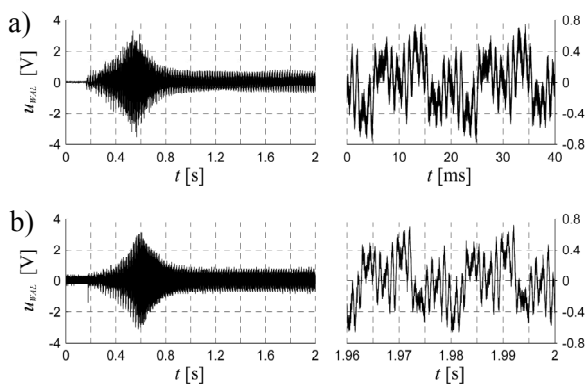
Rys. 15. Przebieg prądu w zwartym przewodzie pomiarowym przy różnej wartości szczeliny powietrznej:

- a) asymetria: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$,
 b) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=1,8\text{mm}$, $\delta_2=1,0\text{mm}$, strona D: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$,
 c) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$, strona D: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$



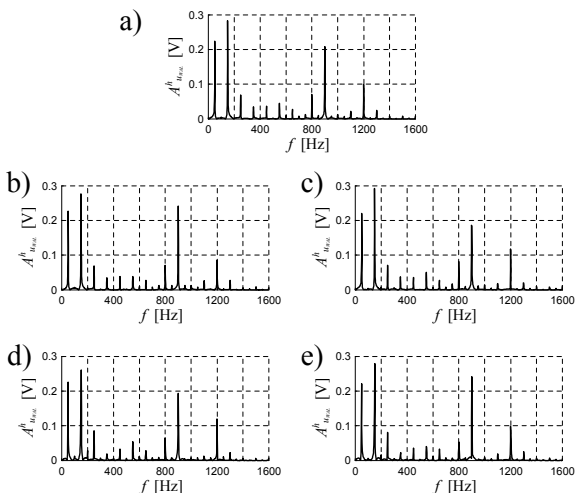
Rys. 16. Przebieg napięcia wałowego przy zwartym przewodzie pomiarowym przy różnej wartości szczeliny powietrznej:

- a) symetryczna: $\delta=1,4\text{mm}$,
 b) asymetria: $\delta_1=1,9\text{mm}$, $\delta_2=0,9\text{mm}$,
 c) asymetria: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$,



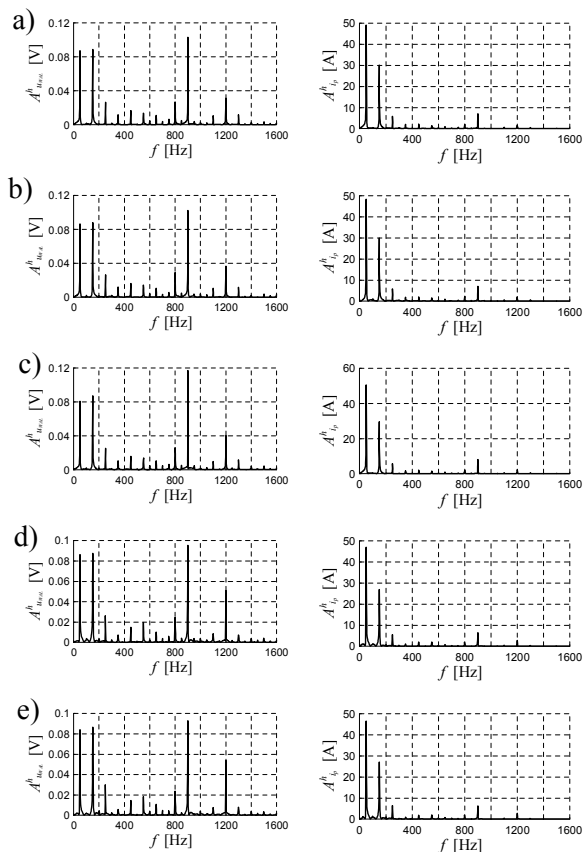
Rys. 17. Przebieg napięcia wałowego przy zwartym przewodzie pomiarowym przy różnej wartości szczeliny powietrznej:

a) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=1,8\text{mm}$, $\delta_2=1,0\text{mm}$, strona D: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$,
 b) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$, strona D: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$



Rys. 18. Transformata Fouriera napięcia wałowego ze stanu ustalonego, przy różnej wartości szczeliny powietrznej:

a) symetryczna: $\delta=1,4\text{mm}$,
 b) asymetria: $\delta_1=1,9\text{mm}$, $\delta_2=0,9\text{mm}$,
 c) asymetria: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$,
 d) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=1,8\text{mm}$, $\delta_2=1,0\text{mm}$, strona D: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$,
 e) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$, strona D: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$



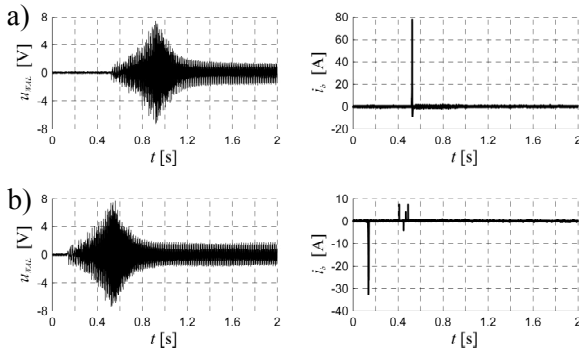
Rys. 19. Transformata Fouriera napięcia wałowego i prądu w zwartym przewodzie, przy różnej wartości szczeliny powietrznej:

a) symetryczna: $\delta=1,4\text{mm}$,
 b) asymetria: $\delta_1=1,9\text{mm}$, $\delta_2=0,9\text{mm}$,
 c) asymetria: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$,
 d) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=1,8\text{mm}$, $\delta_2=1,0\text{mm}$, strona D: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$,
 e) asymetria, skośne ustawienie osi stojana i wirnika: strona N: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$, strona D: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$

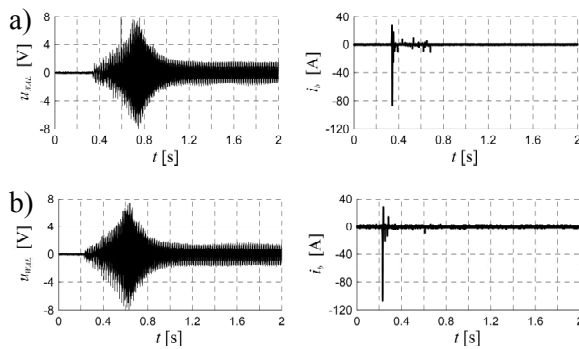
Przedstawione na rysunku 19 transformaty Fouriera wykonane zostały dla napięcia wałowego przy zwartym przewodzie pomiarowym. Z tego względu poszczególne harmoniczne posiadają dużo mniejsze wartości niż przy rozwartym przewodzie (rys. 18).

Na podstawie analizy poszczególnych harmonicznych można jednoznacznie stwierdzić, że asymetria szczeliny powietrznej nie wpływa w znaczący sposób na wartość napięcia i prądu wałowego. Dodatkowo dla każdej asymetrii szczeliny powietrznej wykonano jednoczesny pomiar napięcia wałowego i prądu łożyskowego. Dla każdej asymetrii wykonano kilka

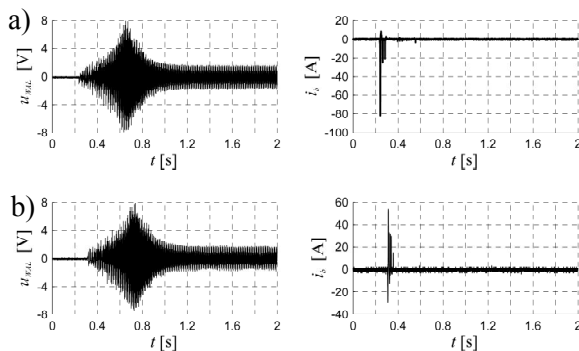
takich pomiarów, a wyniki przedstawiono na rysunkach 20-25.



Rys. 20. Przebieg napięcia wałowego i prądu łożyskowego przy symetrycznej szczelinie powietrznej dla trzech kolejnych rozruchów



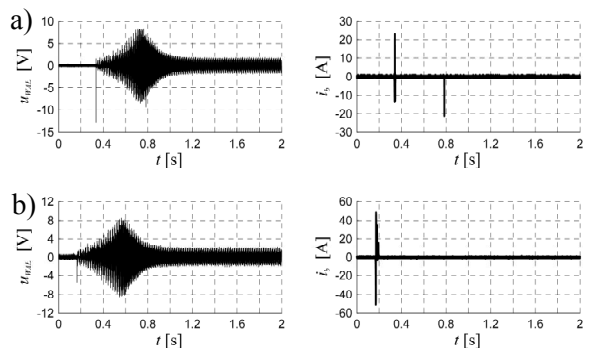
Rys. 21. Przebieg napięcia wałowego i prądu łożyskowego przy asymetrii szczeliny powietrznej: $\delta_1=1,9\text{mm}$, $\delta_2=0,9\text{mm}$



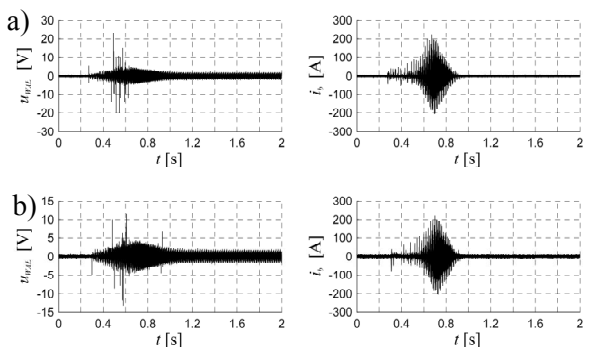
Rys. 22. Przebieg napięcia wałowego i prądu łożyskowego przy asymetrii szczeliny powietrznej: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$

Jak widać z zarejestrowanych przebiegów największe wartości prądu łożyskowego występują w początkowej chwili rozruchu, kiedy występuje jeszcze metaliczne zwarcie pomiędzy elementami tocznymi łożyska i biegniami. Prąd łożyskowy występuje w postaci krótkiego impulsu i osiąga wartość maksymalną w zakresie od 50 A do 80 A. Cza-

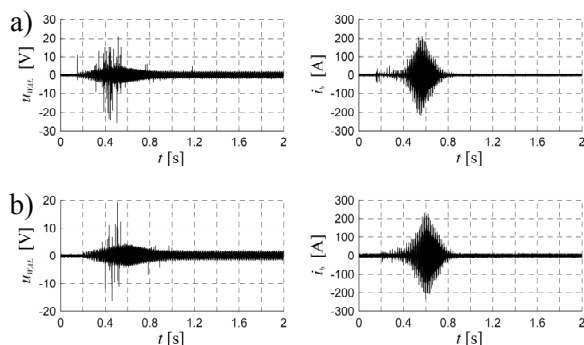
mi jednak zdarza się, że przekracza wartość 100A (rys. 21b). Największe wartości prądu łożyskowego występują w przypadku asymetrii szczeliny powietrznej przy skośnym ustawieniu osi stojana i wirnika, przedstawionym na rysunku 11b. Wyniki pomiarów dla tego typu asymetrii przedstawiono na rysunku 24. W tym przypadku ekscentryczności maszyny największe wartości prądu łożyskowego występują w momencie największych wartości napięcia wałowego. Przy tak dużym skośnym ustawieniu osi wirnika w obu łożyskach silnika występuje metaliczne zwarcie elementów tocznych z biegniami, co przy dużej wartości napięcia wałowego powoduje przepływ bardzo dużych prądów łożyskowych. Powtórne ustawienie symetrycznej szczeliny powietrznej w badanym silniku spowodowało przepływ prądu łożyskowego o podobnej wartości (rys. 25). Świadczy to o uszkodzeniu biegni łożysk i elementów tocznych pod wpływem prądów łożyskowych.



Rys. 23. Przebieg napięcia wałowego i prądu łożyskowego przy asymetrii szczeliny powietrznej: skośne ustawienie osi stojana i wirnika, strona N: $\delta_1=1,8\text{mm}$, $\delta_2=1,0\text{mm}$, strona D: $\delta_1=1,0\text{mm}$, $\delta_2=1,8\text{mm}$



Rys. 24. Przebieg napięcia wałowego i prądu łożyskowego przy asymetrii szczeliny powietrznej: skośne ustawienie osi stojana i wirnika, strona N: $\delta_1=2,2\text{mm}$, $\delta_2=0,6\text{mm}$, strona D: $\delta_1=0,6\text{mm}$, $\delta_2=2,2\text{mm}$



Rys. 25. Przebieg napięcia wałowego i prądu łożyskowego przy symetrycznej szczelinie powietrznej (szczelina ta została powtórnie ustawiona po badaniach przedstawionych na rysunku 24)

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i dokonanych analiz transformat Fouriera można jednoznacznie stwierdzić, że asymetria szczeliny powietrznej nie wpływa w znaczący sposób na wartość napięcia i prądu wałowego. Zbyt duża asymetria szczeliny powietrznej może jednak spowodować metaliczne zwarcie w łożyskach, co powoduje przepływ prądów łożyskowych o bardzo dużej wartości. Prądy te powodują powstawanie wżerów na bieżniach łożysk, znacznie skracając czas ich użytkowania.

Literatura

- [1]. Drak B., Zientek P., Niestrój R., Kwak J.: *Uszkodzenia łożysk w silnikach indukcyjnych użytych w organach urabiających kombajnów górniczych*. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne, nr 75/2006, ss. 137-146.
- [2]. Drak B., Zientek P., Niestrój R., Kwak J.: *Napięcia i prądy wałowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy użytych w organach urabiających kombajnów górniczych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 76/2007, ss.55-62.
- [3]. Drozdowski P., Petryna J., Weinreb K.: *Interakcja efektów elektrycznych, magnetycznych oraz mechanicznych w silnikach indukcyjnych w aspekcie diagnostyki*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 54, 1997, BOBRME Komel, str. 109-116.
- [4]. Kowalski Cz. T., Ewert P.: *Zastosowanie analizy widmowej prądu stojana do monitorowania ekscentryczności silników indukcyjnych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Nr 60, seria Studia i Materiały, nr 27, 2007.

[5]. Kowalski Cz. T., *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, seria Monografie nr 18, zeszyt 57, Wrocław 2005.

[6]. Nandi S., Toliyat H. A., Li X.: *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, Decem-ber 2005, str. 719-729.23.

[7]. Thomson W. T., Fenger M.: *Current signature analysis of detect induction motor faults*. Industry Applications Magazine, IEEE, Volume 7, Issue 4, July-Aug 2001, str. 26-34.

[8]. Zientek P., Niestrój R., Białoń T.: *Napięcia wałowe i prądy łożyskowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy - badania laboratoryjne*. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" Z.3 (203), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, ss.99-112.

Autorzy

Dr hab. inż. Bronisław Drak, prof. Pol. Śl.
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel/fax: 032-2371447

e-mail: Bronislaw.Drak@polsl.pl

dr inż. Andrzej Bobon
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-237xxxx

e-mail: Andrzej.Bobon@polsl.pl

mgr inż. Piotr Zientek
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-2372652

e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl

mgr inż. Roman Niestrój
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-2372526

e-mail: Roman.Niestroj@polsl.pl

mgr inż. Józef Kwak
Zabrzeńskie Zakłady Mechaniczne S.A.
ul. 3-go Maja 89, 41-800 Zabrze
tel: 032-7755301

mgr inż. Jan Marek Lipiński
Zakład Maszyn Elektrycznych EMIT S.A.
ul. Narutowicza 72, 99-320 Żychlin
tel.: 024-2854684

e-mail: Jan_lipinski@cantonimotor.com.pl

