

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

## **ANALIZA PORÓWNAWCZA NAPIĘĆ WAŁOWYCH W RÓŻNYCH SILNIKACH INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY**

### **COMPARATIVE STUDY OF THE SHAFT VOLTAGES IN DIFFERENT LARGE POWER INDUCTION MOTORS**

**Abstract:** The paper presents results of researches aimed at bearing faults detection in the high power induction motors. In chapter 2 are presented the causes of shaft voltages and bearing currents forming. The figure 1 shows the graphical presentation of the bearing currents forming issue. In the chapter 3, on the figures from 2 to 10 are shown different kinds of bearing damages arising in considered motors. In the chapter 4 is presented description of laboratory stand. The figure 12 presents diagram of measuring system. In the chapter 5 is presented influence of supply voltage unbalance on the value of shaft voltages. In the chapter 6 waveforms of shaft voltages, and their Fourier transforms are shown in Fig. 16, 17. Conclusions drawn from laboratory researches are presented in chapter 8.

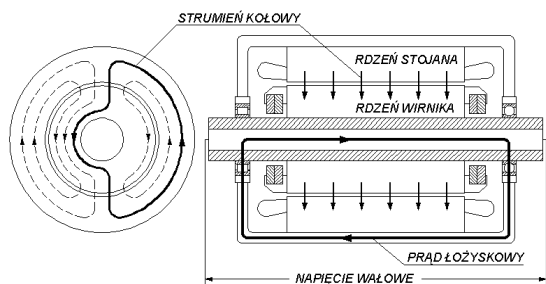
#### **1. Wstęp**

Do napędu organów urabiających górniczych kombajnów ścianowych stosowane są silniki indukcyjne trójfazowe o mocach znamionowych od 200kW do 600kW. W zakresie mocy znamionowych od 200kW do 300kW silniki wykonywane są na napięcie zasilania 1000V, w zakresie mocy od 300kW do 350kW na napięcie zasilania 1000V i 3300V, natomiast powyżej mocy znamionowej 350kW silniki wykonywane są wyłącznie na napięcie zasilania 3300V. Są to silniki przystosowane do eksploatacji w przestrzeniach zagrożonych metanem oraz wybuchem pyłu węglowego i posiadają budowę ognioszczelną z osłoną przeciwwybuchową (cecha EExdI, grupa wybuchowości I, kategoria M2). Silniki te mają wirniki krótko zwarte pręgowane, przy czym w zakresie mocy znamionowej od 200kW do 300kW stosowane są wirniki dwuklatkowe, a w zakresie mocy znamionowej od 300kW do 600kW stosuje się wirniki głębokożłobkowe. Przedmiotowe silniki są przystosowane do rozruchu poprzez bezpośrednie załączenie napięcia zasilania. Niekorzystnym zjawiskiem występującym w tych silnikach jest stosunkowo wysoki poziom napięć wałowych, które w pewnych warunkach wymuszają przepływ prądów łożyskowych powodujących przyspieszone uszkodzenia łożysk tocznych i w dalszej konsekwencji awarię silników. Napięcia wałowe są szczególnie wysokie w stanach dynamicznych np. podczas rozruchu silników przez bezpośrednie włączenia

napięcia zasilania. Obserwacja uszkodzonych elementów łożysk tocznych wielu silników potwierdza, iż niemal w każdym przypadku są wyraźnie widoczne ślady przepływu prądów łożyskowych. Przyczyny powstawania napięcia wałowego są związane z budową konkretnego silnika, która wynika z przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego oraz z zastosowanych do jego wytworzenia procesów technologicznych wywołujących niejednokrotnie powstanie wielu asymetrii w obwodach elektromagnetycznych silników. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań napięć wałowych silników o różnych mocach znamionowych i różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych oraz ocenę wpływu asymetrii napięcia zasilania silników na poziom napięcia wałowego.

#### **2. Przyczyny powstawania napięć wałowych i prądów łożyskowych w silnikach indukcyjnych dużej mocy**

W silnikach indukcyjnych dużej mocy przeznaczonych do rozruchów bezpośrednich, węzły łożyskowe są szczególnie narażone na uszkodzenia spowodowane przepływającymi prądami łożyskowymi. Źródłem prądów łożyskowych jest indukowana wzdłuż wału maszyny SEM zwana napięciem wałowym. Powstaje ona wtedy, gdy istnieje zmienny strumień magnetyczny zamykający się w obwodzie wzdłuż jarzma rdzenia stojana i wirnika obejmując wał maszyny indukcyjnej (rys. 1).



Rys. 1. Powstawanie prądu łożyskowego

Z dostępnej literatury wynika, że przyczyn powstawania napięcia wałowego należy szukać w budowie samego silnika [2, 4, 6]. Są to głównie asymetrie powstające w procesie wytwarzania silnika. Zalicza się do nich nierównomierną szczelinę powietrzną, ekscentryczność wirnika, asymetrie w obwodzie magnetycznym maszyny i jego anizotropie.

Prądy łożyskowe częściej powstają w większych maszynach o długości kadłuba przekraczającej 400 mm i małej liczbie par biegunów (większa asymetria pola magnetycznego) niż w silnikach małych o dużej liczbie par biegunów gdzie łatwiej utrzymać większą symetrię uzwojeń.

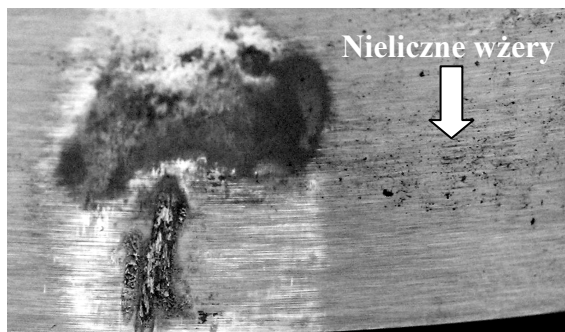
### 3. Rodzaje uszkodzeń łożysk tocznych

Okres bezawaryjnej pracy nowego lub remontowanego silnika do uszkodzenia węzłów łożyskowych wynosi przeciętnie kilka miesięcy. Charakter uszkodzeń elementów tocznych, bieżni łożysk i czopów wału omawianych silników wskazuje na uszkodzenia termiczne i mechaniczne oraz na uszkodzenia będące skutkiem przepływu prądów przez łożyska. W celu określenia jaki rodzaj uszkodzeń wywołują prądy łożyskowe, przez pewien okres czasu gromadzono zużyte łożyska i tworzono dokumentację ich uszkodzeń. Łożyska pochodziły z silników o mocach od 200kW i napięciach znamionowych 1000V i 3300V. W większości z nich charakter uszkodzeń wskazywał na występowanie prądów łożyskowych o dość znacznej wartości (rys. 2, 3) Przeprowadzone badania laboratoryjne [1, 3, 7, 8] potwierdziły obecność występowania napięć wałowych i prądów łożyskowych w przedmiotowych silnikach. Przedstawione na rysunkach 4, 5, 9, 10 uszkodzenia łożysk w postaci regularnych wgniecień (prążków) na bieżniach pierścieni łożysk są wynikiem docisku toczących się po nich elementów tocznych. Działanie prądów łożyskowych znacząco przyspiesza ich powstawanie, na skutek zmiany struktury materiału pierścieni

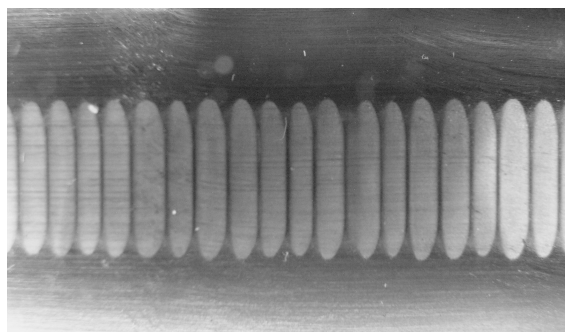
pod działaniem prądów łożyskowych. Można więc stwierdzić, że przedstawione na rysunkach od 2 do 10 uszkodzenia łożysk spowodowane zostały prądami łożyskowymi.



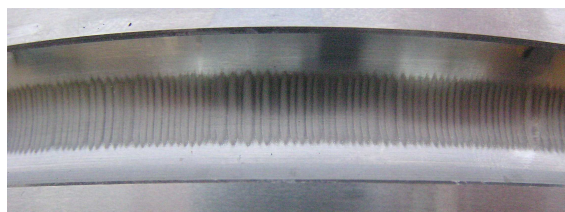
Rys. 2. Widoczny krater na powierzchni zewnętrznej pierścienia zewnętrznego



Rys. 3. Widoczny krater i małe wżery na powierzchni wewnętrznej pierścienia wewnętrznego

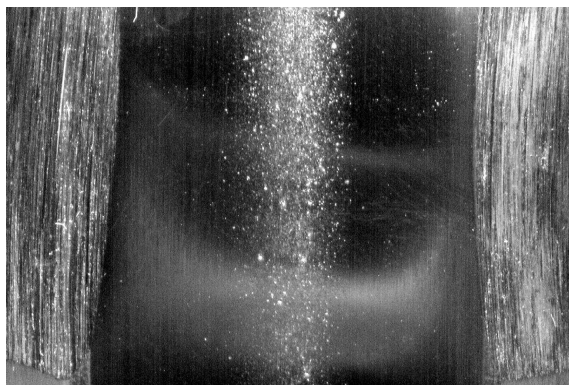


Rys. 4. Widoczne prążki na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego

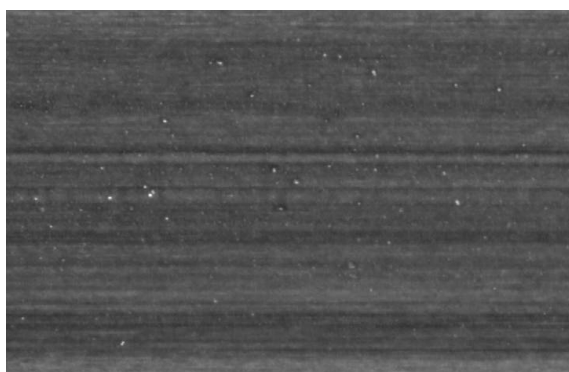


Rys. 5. Widoczne prążki na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego

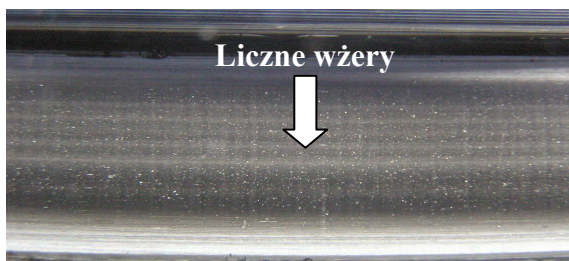




Rys. 6. Widoczne liczne małe wżery na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego łożyska kulkowego



Rys. 7. Widoczne liczne małe wżery i smugi obwodowe w łożysku waleczkowym na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego



Rys. 8. Widoczne liczne małe wżery i prążki na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego



Rys. 9. Widoczne liczne małe wżery i smugi obwodowe w łożysku waleczkowym na powierzchni waleczków



Rys. 10. Widoczne liczne małe wżery i prążki na powierzchni waleczków

#### 4. Opis stanowiska badawczego

Obiektem badań były silniki indukcyjne o mocach od 200kW do 630kW i napięciu znamionowym 1000V i 3300V przeznaczone do napędu organów urabiających górniczych kombajnów ścianowych (rys. 11).



Rys. 11. Stanowisko pomiarowe z silnikiem:

- a) dSKgw 315L-4, 300kW, 1000V,
- b) dSKgw 500Y4, 500 kW, 3300V,

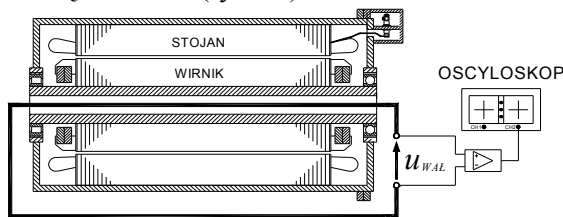
Badane silniki charakteryzuje:

- wyposażenie w system chłodzenia wodą,
- drażony przelotowy wał wirnika,
- możliwość rozruchu poprzez bezpośrednie załączenie napięcia zasilania z sieci,
- zastosowanie izolacji łożysk silnika.

Do badań i pomiarów wykorzystano następujące typy silników:

- 2SGR 315M4 (200kW, 1000V, D),
- dSKgwb 314M4 (200kW, 1000V, E),
- SG7 355L-4 (250kW, 1000V, D),
- dSKgw 315L-4 (300kW, 1000V, E),
- 3SG4W 562L-4 (350kW, 1000V, D),
- 3SG4W 562L-4A (350kW, 1000V, D),
- 2SG3W 760Y-4A (580/630kW, 3300V, D),
- dSKgw 500Y4 (500kW, 3300V, E),
- SG3W 760Y-4 (500kW, 3300V, D),
- 3SG4W 562Y-4A (350kW, 3300V, D).

Pomiary wykonywano podczas rozruchów bezpośrednich i w stanie ustalonym w takich samych warunkach otoczenia. Każdą serię badań wykonywano na kilku silnikach z danego typu w celu potwierdzenia uzyskiwanych wyników pomiaru. Podjęte badania miały na celu określenie w jakim stopniu zmiana parametrów zasilania silników oraz jakie parametry konstrukcyjne mają decydujący wpływ na wartość powstających napięć wałowych. W celu pomiaru napięcia wałowego, silnik wyposażono w przewód pomiarowy umieszczony w drażonym wale, którego końce wyprowadzono na zewnątrz silnika (rys. 12).



Rys. 12. Schemat układu do pomiaru napięcia wałowego

Napięcie zmierzone w ten sposób na końcach przewodu jest równe napięciu pomiędzy końcami wału silnika. Dokładniej metoda ta została opisana w literaturze [1].

### 5. Wpływ asymetrii napięć zasilania na wartość napięć wałowych

W celu określenia jaki wpływ na poziom napięć wałowych ma asymetria napięć zasilania przeprowadzono szereg pomiarów w stanie ustalonym oraz podczas rozruchu silnika. Asymetrię napięć uzyskano poprzez zmianę zacze- pów w transformatorze zasilającym. Badania przeprowadzono dla następujących napięć zasilania:

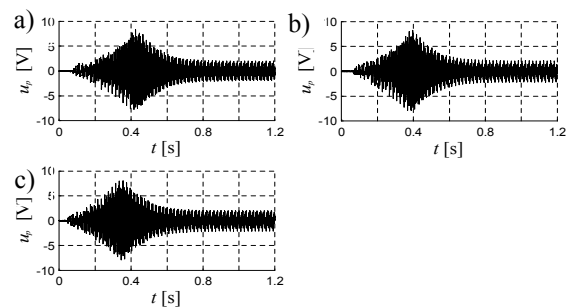
- symetrycznego,
- z asymetrią 0, +5%, -5%,
- z asymetrią -5%, -5%, +5%,
- 2-fazowego.

Podczas zasilania 2-fazowego rejestracje przeprowadzono tylko w stanie ustalonym.

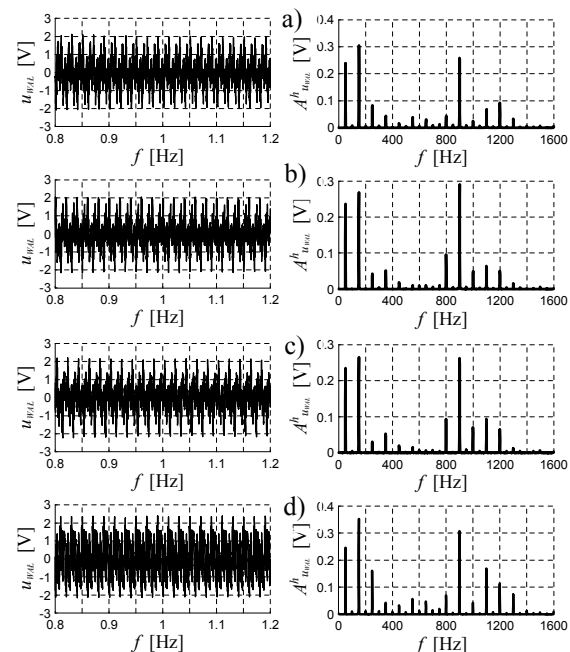
Sposób pomiaru napięcia wałowego omówiono w rozdziale 3. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 13 i 14 oraz w tabeli 1 i 2.

Z zarejestrowanych przebiegów ze stanów ustalonych obliczono transformaty Fouriera, a wyniki przedstawiono na rysunku 14.

Z otrzymanego widma harmonicznych wyodrębniono prążki o największych amplitudach, a ich wartości zestawiono w tabeli 2.



Rys. 13. Przebieg napięcia wałowego podczas rozruchu silnika i w stanie ustalonym dla następujących napięć zasilania: a) symetrycznego, b) z asymetrią -5%, -5%, +5%, c) z asymetrią 0, +5%, -5%



Rys. 14. Przebieg napięcia wałowego i jego transformata Fouriera dla następujących napięć zasilania: a) symetrycznego, b) z asymetrią 0, +5%, -5%, c) z asymetrią -5%, -5%, +5%, d) 2-fazowe

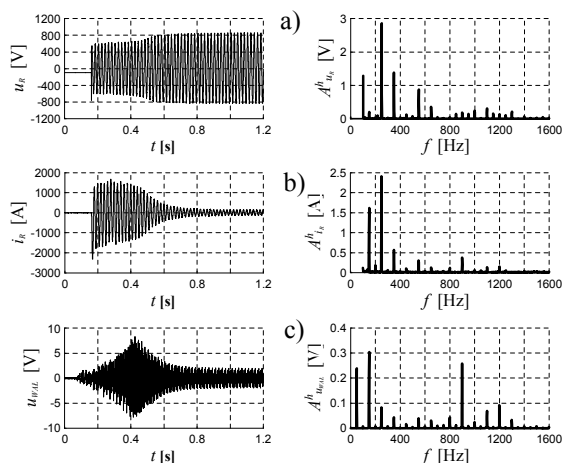
Tabela 1.  
Wartość skuteczna napięcia wałowego

	Rodzaj asymetrii napięć zasilania silnika			
	symetria	0 +5% -5%	-5% -5% +5%	zasil. 2-faz.
$u_{WAL(RMS)}$ [V]	0,82	1,16	1,17	1,46

Tabela 2.  
Amplitudy harmonicznego napięcia wałowego

$f$ [Hz]	Rodzaj asymetrii napięć zasilania silnika			
	symetria	0 +5% -5%	-5% -5% +5%	zasil. 2-faz.
	$A_{u_{WAL}}^h$ [V]			
50	0,25	0,24	0,24	0,25
150	0,31	0,27	0,27	0,36
250	0,09	0,05	0,05	0,16
800	0,05	0,10	0,10	0,07
900	0,26	0,29	0,27	0,31
1100	0,07	0,06	0,095	0,17
1200	0,10	0,05	0,065	0,12
1300	0,03	0,02	0,12	0,08

Dodatkowo na rysunku 15 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu fazowego oraz ich transformaty Fouriera ze stanu ustalonego przy symetrycznym zasilaniu. Z otrzymanego widma harmonicznego celowo usunięto prążek podstawowej harmonicznego 50Hz w celu uwidocznienia prążków o mniejszych amplitudach.



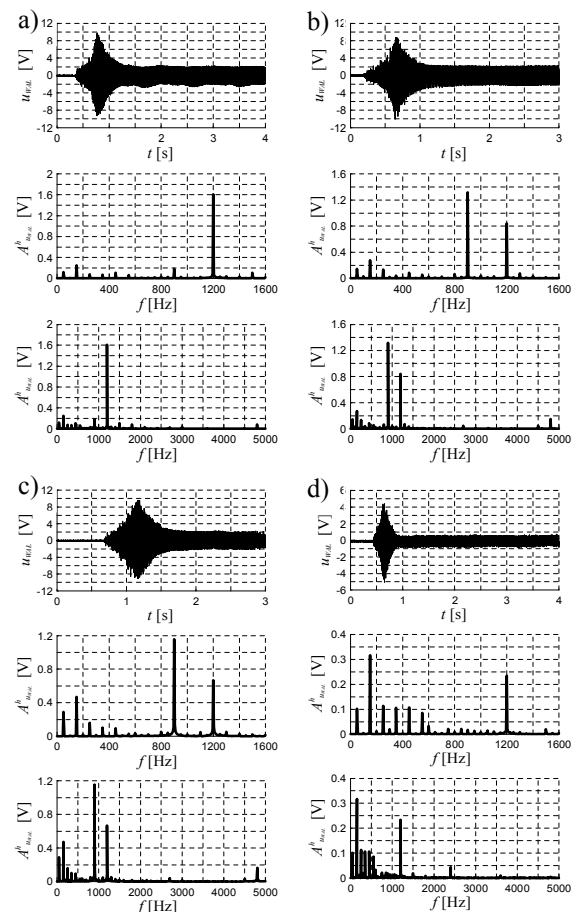
Rys. 15. Przebiegi i ich transformata Fouriera ze stanu ustalonego: a) napięcie fazowe, b) prąd fazowy, c) napięcie wałowe

Analizując obliczone transformaty Fouriera można stwierdzić, że największą amplitudę mają prążki o częstotliwościach 50, 150, 250, 900Hz.

Przyczyny ich powstawania omówiono w dalszej części artykułu. W przypadku zasilania silnika napięciem asymetrycznym zmiany napięcia wałowego w stosunku do zasilania znamionowego są niewielkie. Dużo większe zmiany wartości tego napięcia występują w przypadku zasilania 2-fazowego.

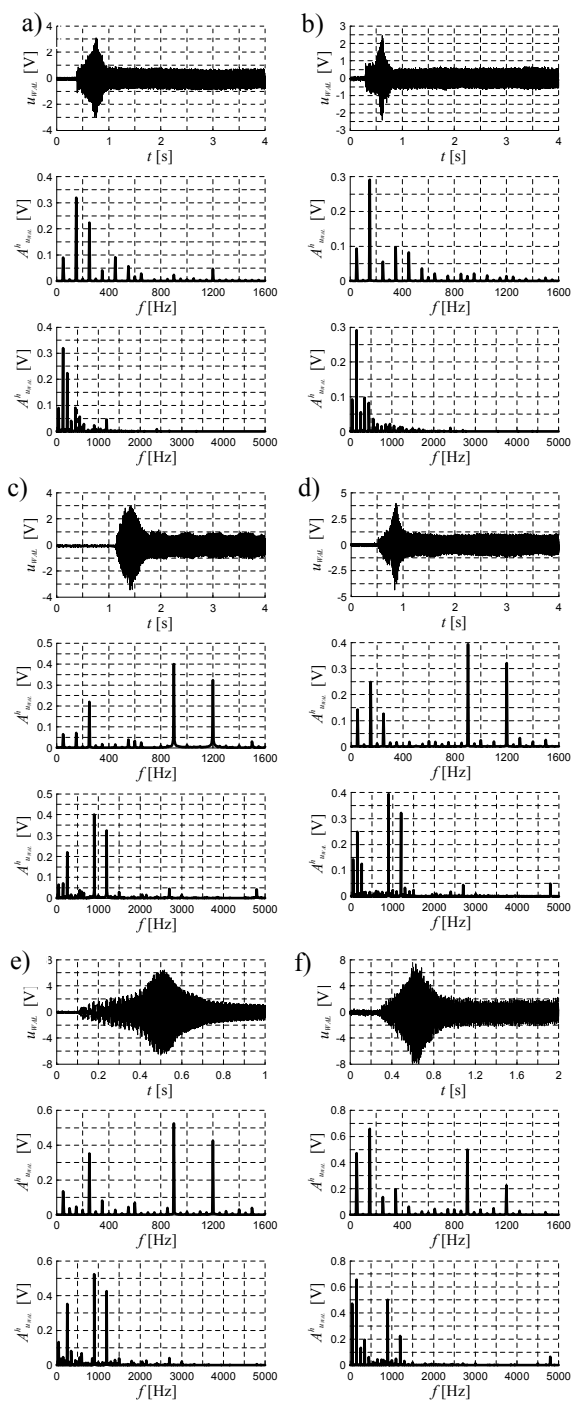
## 6. Analiza napięć wałowych przy zasilaniu symetrycznym

Pomiar napięć wałowych przeprowadzono w silnikach indukcyjnych o mocy od 200kW do 580kW i napięciach znamionowych 1000V i 3300V. Pomiary przeprowadzono podczas rozruchu bezpośredniego. Z zarejestrowanych przebiegów napięć wałowych w stanie ustalonym obliczono transformaty Fouriera a wyniki przedstawiono na rysunkach 16 i 17.



Rys. 16. Przebieg napięcia wałowego podczas rozruchu i w stanie ustalonym oraz jego transformata Fouriera w stanie ustalonym dla silników typu:

- a) 2SG3W 760Y-4A, 580/630kW, 3300V, 48/38,
- b) SG3W 760Y-4, 500kW, 3300V, 48/38
- c) dSKgw 500Y4, 500kW, 3300V, 48/38,
- d) 3SG4W 562Y-4A, 350kW, 3300V, 48/34



Rys. 17. Przebieg napięcia wałowego podczas rozruchu i w stanie ustalonym oraz jego transformata Fouriera w stanie ustalonym dla silników typu:

- a) 3SG4W 562L-4, 300kW, 1000V, 48/34,  
 b) 3SG4W 562L-4A, 350kW, 1000V, 48/34  
 c) 2SGR 315M4, 200kW, 1000V, 48/38,  
 d) dSKgwb 314M4, 200kW, 1000V, 48/38  
 e) SG7 355L4, 250kW, 1000V, 48/38,  
 f) dSKgw 315L-4, 300kW, 1000V, 48/38

Pod każdym wykresem oprócz typu silnika zamieszczono także takie dane znamionowe, jak

jego moc, napięcie zasilania oraz konstrukcyjne: liczbę żłobków uzwojenia stojana i wirnika. Większość badanych silników miała 48 żłobków w stojanie oraz 38 żłobków w wirniku. W silnikach indukcyjnych typu 3SG4W 562L-4 oraz 3SG4W 562L-4A zastosowano 34 żłobki w wirniku, co uwidacznia się w przebiegach napięcia wałowego (rys. 18, tab. 3) i ich transformatach Fouriera. Znaczącej redukcji uległy harmoniczne żłobkowe 900Hz i 1200Hz (rys. 18, tab. 4). Badania wykazały, że silniki te mają mniejszą wartość napięcia wałowego w stanie ustalonym w porównaniu z badanymi silnikami innego typu, ale podobnej mocy (tab. 3).

Silniki indukcyjne o napięciu znamionowym 3300V i mocy 500kW mają największe wartości napięcia wałowego, zarówno podczas rozruchu, jak również w stanie ustalonym. Podobne wartości ma także silnik typu dSKgw 315L-4 o napięciu zasilania 1000V i mocy 300kW (tab. 3).

Tabela 3.

Wartość napięcia wałowego (p-p) podczas rozruchu i w stanie ustalonym

Typ	$P_n$ [kW]	$U_n$ [V]	$U_{w\text{al}}^{\text{rozr.}}$ [V]	$U_{w\text{al}}^{\text{st.ust}}$ [V]
2SGR 315M4	200	1000	6,4	2,02
dSKgwb 314M4	200	1000	8,3	2,27
SG7 355L-4	250	1000	12,9	2,35
dSKgw 315L-4	300	1000	15,3	4,06
3SG4W 562L-4	300	1000	6,10	1,60
3SG4W 562L-4A	350	1000	4,85	1,25
2SG3W 760Y-4A	580/630	3300	19,1	4,64
dSKgw 500Y4	500	3300	18,7	4,46
SG3W 760Y-4	500	3300	18,8	4,64
3SG4W 562Y-4A	350	3300	9,52	1,44

Analizując uzyskane podczas badań wyniki zauważono, również, że w silnikach indukcyjnych mających 34 żłobki w wirniku zanika harmoniczna 4800Hz (rys. 17b, 18).

Pomiary napięć wałowych dla danego typu silników powtórzone co najmniej czterokrotnie dla różnych egzemplarzy silników.

Tabela 4.

Amplitudy harmonicznego napięcia wałowego

Typ	50 [Hz]	150 [Hz]	250 [Hz]	900 [Hz]	1200 [Hz]
	$A_{u_{w,AL}}^h$ [V]				
2SGR 315M4	0,06	0,08	0,23	0,40	0,32
dSKgwb 314M4	0,15	0,25	0,13	0,40	0,32
SG7 355L-4	0,14	0,05	0,35	0,54	0,43
dSKgw 315L-4	0,48	0,66	0,15	0,50	0,23
3SG4W 562L-4	0,09	0,32	0,23	0,03	0,05
3SG4W 562L-4A	0,10	0,29	0,06	0,02	0,02
2SG3W 760Y-4A	0,12	0,25	0,08	0,18	1,60
dSKgw 500Y4	0,29	0,48	0,16	1,18	0,70
SG3W 760Y-4	0,15	0,28	0,13	1,30	0,85
3SG4W 562Y-4A	0,10	0,32	0,12	0,02	0,23

Porównując transformaty napięcia wałowego z transformatami napięcia i prądu fazowego można zauważyć, że pojawiają się w nich prądkie o znaczących amplitudach i tych samych częstotliwościach: 50, 150, 250, 900, 1200Hz. Podobieństwo uzyskanych widm harmonicznym pozwala stwierdzić, że harmoniczne występujące w prądzie fazowym stojana „przenoszą się” do obwodu, w którym indukuje się siła elektromotoryczna, powodująca przepływ prądu wałowego. Przyczyną powstawania tych harmonicznym jest interakcja rozkładu czasowo-przestrzennego siły magnetomotorycznej w szczelinie powietrznej i lokalnych zmian permeancji szczeliny powietrznej, spowodowanych uzłobkowaniem stojana i wirnika, nasyceniami zębów i fragmentów rdzenia oraz ekscentrycznością statyczną i dynamiczną wirnika. Harmoniczne siły magnetomotorycznej oddziałują ze składową stałą i harmonicznymi rozkładu permeancji szczeliny, generując rozkład przestrzenno-czasowy indukcji magnetycznej, która indukuje w prętach wirnika siłę elektromotoryczną, wymuszającą przepływ prądów w klatce wirnika. W ten sposób powstaje nowa siła magnetomotoryczna, która oddziałuje

ze składową stałą i harmonicznymi rozkładu permeancji szczeliny, generując nowy zestaw harmonicznym indukcji magnetycznej. Wypadkowy rozkład przestrzenno-czasowy indukcji w szczelinie zawiera w efekcie bardzo wiele harmonicznym o różnych amplitudach i częstotliwościach. Te harmoniczne indukują harmoniczne siły elektromotorycznej w uzwojeniach stojana i tym samym wpływają na widmo harmonicznym prądu stojana. Zagadnienie powstawania harmonicznym w prądach stojana silnika indukcyjnego opisano w literaturze, między innymi w [5], gdzie podano także metodę wyznaczania częstotliwości tych harmonicznym, również przy uwzględnieniu zjawiska aliasingu przestrzennego. W obliczonych transformatach Fouriera występują harmoniczne żłobkowe o częstotliwościach 900Hz (związana z liczbą żłobków wirnika) i 1200Hz (związana z liczbą żłobków stojana). Harmoniczna o częstotliwości 150Hz powstaje w efekcie nasycania się zębów stojana i wirnika.

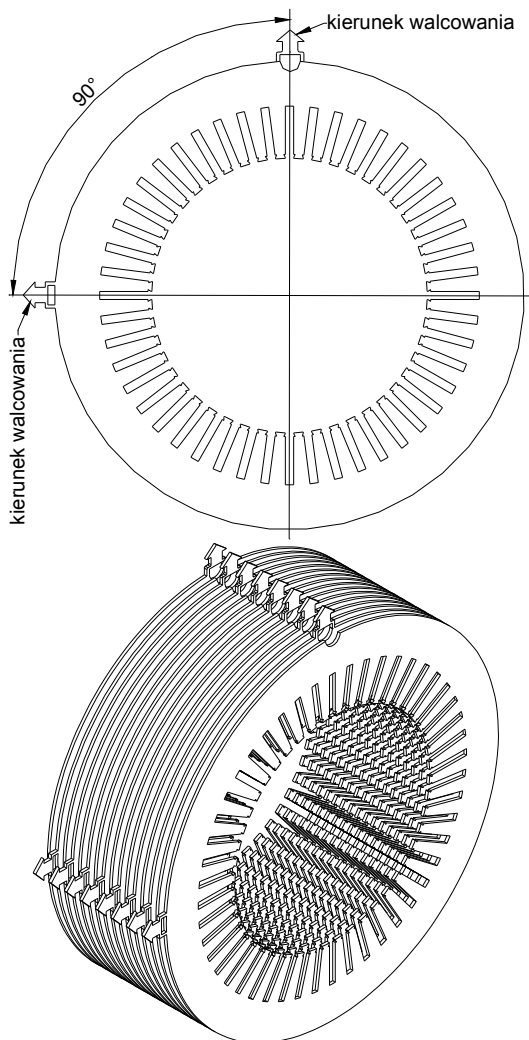
Przedstawione widma harmonicznym prądów i napięć uzyskano za pomocą transformacji Fourier-a wykonanej dla zarejestrowanych fragmentów przebiegów w stanie ustalonym. W celu uzyskania odpowiedniej rozdzielczości osi częstotliwości, transformatę obliczono z szesnastu tysięcy próbek przebiegu. W celu wyeliminowania szumów z wyników końcowych zastosowano uśrednianie wielu transformat Fourier-a, uzyskanych metodą nakładania okien czasowych w obrębie zarejestrowanego fragmentu przebiegu. Wszystkie obliczenia przeprowadzono za pomocą programu opracowanego w środowisku Matlab.

## 7. Metody eliminacji napięć wałowych i prądów łożyskowych

Najskuteczniejszym sposobem zabezpieczenia łożysk silników elektrycznych przed niszczącym działaniem prądów wałowych jest przerwanie obwodu elektrycznego, w którym płyną, na łożyskowaniu od strony przeciwnapędowej. W tym celu ZME Emit SA stosuje standartowo od strony przeciwnapędowej tarczy łożyskowe z izolowaną komorą łożyskową we wszystkich silnikach przeznaczonych do zasilania z przemienników częstotliwości oraz w silnikach wysokonapięciowych. Natomiast przy łożyskowaniu ślizgowym wszystkie silniki mają standartowo od strony przeciwnapędowej łożysko izolowane.



Dodatkowo pakiety stojana i wirnika są tak wykonane, że poszczególne blachy obraca się względem siebie o kąt  $90^\circ$  eliminując w ten sposób anizotropię związaną z kierunkiem walcowania blach (rys. 18).



Rys. 18. Sposób wykonania pakietu blach stojana i wirnika silników indukcyjnych

## 8. Wnioski

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań oraz opisane informacje literaturowe można stwierdzić, że zaobserwowane i przedstawione w rozdziale 3 uszkodzenia łożysk spowodowane zostały przepływem prądów przez łożyska.

Podczas badań stwierdzono, że:

- występujące duże wartości prądów łożyskowych w początkowej chwili rozruchu silnika, przy zerowej prędkości obrotowej silnika, powodują powstawanie bardzo nieregularnych rozległych wżerów na bieżniach pierścieni łożysk,

- występujące regularne wgniecenia (prążki) na bieżniach pierścieni łożysk tocznych są wynikiem docisku toczących się po nich elementów tocznych, a działanie prądów łożyskowych znacząco przyspiesza ich powstawanie, na skutek zmiany struktury materiału pierścieni pod działaniem prądów łożyskowych,
- powstające zygzakowate przypalenia na bieżniach i elementach tocznych są wynikiem występujących wyładowań w łożysku pomiędzy bieżnią, a elementami tocznymi na wskutek przebicia filmu olejowego,

Źródłem tych prądów jest indukowana wzdłuż wału maszyny SEM zwana napięciem wałowym. Napięcie to jest szczególnie wysokie w stanach dynamicznych silnika, głównie podczas rozruchu, po bezpośrednim załączeniu napięcia.

Wartości zmierzonych napięć podczas rozruchu znacznie przekraczają wartości dopuszczalne podawane w literaturze. Po przekroczeniu napięcia przebicia filmu olejowego prąd łożyskowy silnie wzrasta, a okres pracy łożyska bardzo się skraca. Istotne jest więc badanie przebiegów napięć i prądów wałowych w stanach nieustalonych ze względu na ich wartości wielokrotnie wyższe niż w stanach ustalonych. W przypadku zasilania silnika napięciem niesymetrycznym występują bardzo małe zmiany napięcia wałowego w stosunku do zasilania znamionowego. Większe zmiany w napięciu wałowym występują w przypadku zasilania 2-fazowego.

W silnikach indukcyjnych typu 3SG4W 562L-4 oraz 3SG4W 562L-4A, w których zastosowano 34 żłobki w wirniku, zauważono znaczne zmniejszenie się wartości napięcia wałowego podczas rozruchu i w stanie ustalonym w porównaniu z badanymi silnikami innego typu, ale podobnej mocy. Znaczącej redukcji uległy harmoniczne żłobkowe 900 i 1200Hz. Dodatkowo w silnikach tych zanika harmoniczna 4800Hz.

Największe wartości napięcia wałowego zarówno podczas rozruchu jak i w stanie ustalonym mają silniki indukcyjne o napięciu znamionowym 3300V i mocy 500kW oraz silnik typu dSKgw 315L-4 o napięciu zasilania 1000V i mocy 300kW.

## 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]. Donner G., Oakes B.K., Evon S.T.: *Motor Primer – Part III*. IEEE Trans On Ind. Appl., Vol. 39, No. 5, September/October 2003, pp. 1467-1474.

[3]. 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.

[4]. Gambica/Rema Technical Guide: *Motor Shaft Voltages and Bearing Currents under PWM Inverter Operation*. Technical Report No. 2 First Edition, 2002.

[5]. Guldemir H., Bradley K.J.: *An improved approach to the prediction of line current spectrum in induction machines*. Electrical Engineering 2003, pp. 17-23.

[6]. Kerszenbaum I.: *Shaft currents in electric machines fed by solid-state drives*. IEEE Conference Record of the Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1992. Conference Record, Papers Presented at the 1992 Annual Meeting, 4-7 May 1992, pp. 71-79.

[7]. Matras A., Rams W.: *Damages of Bearings of Induction Motor from its Bearing Currents*. 48 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Tech. Universitat Ilmenau, 22-25 Sept. 2003.

[8]. Zientek P., Niestrój R., Białoń T.: *Napięcia wałowe i prądy łożyskowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy - badania laboratoryjne*. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej "Elek-tryka" 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

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