

## ZNACZENIE HARMONICZNYCH ŻŁOBKOWYCH W DIAGNOSTYCE USZKODZEŃ KLATKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO<sup>1</sup>

Andrzej SOBOLEWSKI

Wydział Elektryczny, Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, tel. (085) 746 94 10, [soboland@pb.edu.pl](mailto:soboland@pb.edu.pl)

### Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z diagnostyką uszkodzeń silnika indukcyjnego dokonywanej za pomocą metody MCSA (ang. Motor Current Signature Analysis). Wiele publikacji na ten temat wskazuje na pojawianie się tzw. częstotliwości poślizgowych wokół pierwszej, piątej i siódmej harmonicznej prądu stojana dla obciążeń powyżej połowy znamionowego [1]. Niedokładność oszacowania poślizgu ogranicza trafne wskazania tych częstotliwości. Wymagana jest więc możliwie wysoka precyzja szacunku wartości poślizgu, czego można dokonać za pomocą częstotliwości żłobkowych. Częstotliwości poślizgowe, pojawiają się w widmie prądu również wokół częstotliwości żłobkowych, co może dać podstawę do identyfikacji uszkodzeń silnika indukcyjnego za pomocą analizy harmonicznych żłobkowych i poślizgowych.

Słowa kluczowe: MCSA, diagnostyka, detekcja uszkodzeń, silnik indukcyjny, częstotliwości żłobkowe.

### APPRECIATION OF THE SLOT HARMONIC IN A FAULT DETECTION OF INDUCTION MOTOR'S CAGE

#### Summary

In this paper selected problems of fault detection of an induction motor by the MCSA (Motor Current Signature Analysis) method are considered. Many of published papers point to slip frequencies that appears around the first, fifth and seventh harmonic in stator current spectrum for more than half of nominal load [1]. Insufficient accuracy of slip estimation may make the task of slip frequencies extraction very difficult. There is a need of as high as possible precision of slip estimation. Analysis of slot frequencies makes it possible. Slip frequencies in current spectrum also appear around slot frequencies. It gives a base for searching fault symptoms of induction motor by the analysis of amplitudes of slip and slot frequencies.

Keywords: MCSA, diagnostic, fault detection, induction motor, slot harmonics.

#### 1. CHARAKTERYSTYKA USZKODZEŃ KLATEK WIRNIKÓW W SILNIKACH INDUKCYJNYCH

Silniki elektryczne są maszynami pracującymi w dwóch środowiskach związanych z siłami mechanicznymi i elektrycznymi, dlatego są narażone na uszkodzenia o charakterze zarówno elektrycznym jak i mechanicznym. Połączenie tych środowisk wynika z przekształcania energii elektrycznej na energię mechaniczną. Silniki są projektowane w taki sposób, aby to przekształcenie energii następowało w sposób stabilny, z minimalnym poziomem szumów i wibracji. Poziom taki zapewniany jest przez dokładność wykonania poszczególnych elementów silnika, stopień pasowania łożysk i obudowy oraz symetrycznie nawinięte uzwojenia

stojanów, jak również przez staranne wyważenie wałów silnika.

Gdy następuje uszkodzenie, harmonia pomiędzy siłami elektrycznymi i mechanicznymi zostaje zachwiana, prowadząc do dalszego pogłębiania się zakresu uszkodzenia maszyny. Dochodzi wówczas do asymetrii sił pochodzenia elektromagnetycznego, co w konsekwencji prowadzi do nierównomiernego naciągu magnetycznego, działającego na stojan i wirnik [2]. Taki nierównomierny rozkład sił przenosi się na łożyska, co w obciążonej maszynie w konsekwencji zwykle powoduje drgania, które sprzyjają rozwojowi procesu degradacji łożysk, w prostej linii prowadzącego do trwałego uszkodzenia maszyny.

<sup>1</sup> Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym zbudowanym w Katedrze Automatyki i Elektroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej w ramach pracy własnej W/WE/2/05.

## 1.2 Charakterystyka uszkodzeń klatek wirników w silnikach indukcyjnych

Awarie wirnika powodują nierównomierność rozkładu sił napędowych wału silnika, i są wynikiem asymetrii obwodu elektrycznego wirnika najczęściej powodowanej przez uszkodzenia uzwojeń wirników (pęknięcia pierścieni bądź prętów klatek w silnikach klatkowych). Najgroźniejszym uszkodzeniem klatki jest uszkodzenie segmentu pierścienia czołowego, powoduje bowiem bardzo nierównomierny rozpląt prądów klatki, co przyspiesza dalsze uszkodzenia. Ponadto możliwe jest odchylenie się fragmentu pierścienia pod wpływem siły odśrodkowej wirującego wirnika i uszkodzenia czoła uzwojeń stojana [3].

Powstanie uszkodzenia klatki wirnika jest często następstwem dużych naprężeń wywołanych zjawiskami elektromagnetycznymi podczas rozruchu maszyny. Płyną wtedy duże prądy rozruchowe powodujące odkształcenia termiczne prętów. Zjawiska takie można zaobserwować zwłaszcza w silnikach dużej mocy z trudnym rozruchem, wyposażonych w klatki głębokożłobkowe, bądź w silnikach z wirnikami wieloklatkowymi. Naprężenia mechaniczne prętów powodują zmęczenie naderwanie, pęknięcia prętów, bądź nawet zerwanie spawu łączącego pierścień i pręty, co jest powodem wprowadzenia asymetrii w rozkładzie prądów płynących przez klatkę wirnika, a w konsekwencji przez uzwojenia stojana.

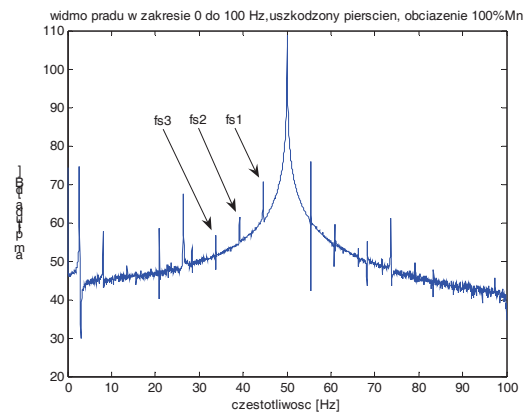
## 2 DETEKCJA USZKODZEŃ KLATEK SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

Asymetria rozpląwu prądów w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego powoduje pojawienie się cech charakterystycznych w widmach prądu fazowego stojana. Cechy te traktowane jako nośniki informacji diagnostycznej są wykorzystywane do opracowywania metod wykrywających uszkodzenie i klasyfikujących ich rodzaj, co umożliwia podjęcie decyzji diagnostycznych. Ekstrakcja tych cech stanowi kluczowe zadanie detekcji uszkodzeń w silnikach z wykorzystaniem widma prądu. Zadanie to można zrealizować wykorzystując harmoniczne żłobkowe, za pomocą których można dokonać estymacji poślizgu, którego znajomość umożliwia detekcję symptomów uszkodzeń.

### 2.1 Ocena stanu technicznego silnika na podstawie widma prądu stojana

Najczęściej stosowane metody diagnostyczne wirnika w czasie pracy ustalonej pod stałym obciążeniem wykorzystują analizę widmową prądu stojana MCSA (ang. Motor Current Signature Analysis). Metoda ta znalazła uznanie wśród badaczy przede wszystkim z powodu swojej uniwersalności i łatwości zastosowania.

Na rys. 1 widoczne są rozwarstwione harmoniczne poślizgowe silnika indukcyjnego z uszkodzonym pierścieniem klatki.



Rys. 1. Częstotliwości poślizgowe  $fs1$ ,  $fs2$  i  $fs3$  w widmie prądu silnika z uszkodzonym pierścieniem

Poznano też już dobrze wpływ uszkodzeń wirnika na widmo prądu stojana [4]. Tego typu uszkodzenia odzwierciedlają się w amplitudach prążków dla częstotliwości w sąsiedztwie pierwszej harmonicznej  $f_0$  (częstotliwości zasilania), których rozkład zależy od poślizgu  $s$ , dlatego nazwano je poślizgowymi. Częstotliwości poślizgowe mają tendencję do rozwarstwiania się, czyli do powstawania kolejnych częstotliwości poślizgowych wokół pierwszej harmonicznej, co dało początek nazewnictwu ich jako pierwsza, druga, i trzecia częstotliwość poślizgowa. Zjawisko to zostało opisane w pracy [6], gdzie autorzy sformułowali zależność do wyznaczania częstotliwości poślizgowych.

$$f_{sk} = (1 \pm 2ks)f_0 \quad (1)$$

gdzie:  $f_{sk}$  - częstotliwość poślizgowa  
 $f_0$  - częstotliwość prądu zasilającego  
 $s$  - poślizg  
 $k = 1, 2, \dots, kn$

Autorzy [5] wykazują, że obserwacja częstotliwości poślizgowych może być prowadzona nie tylko wokół pierwszej harmonicznej prądu fazowego stojana silnika, ale również wokół nieparzystych jej wielokrotności.

$$f_s = f_0 \left[ \frac{k}{p}(1-s) \pm s \right] \quad (2)$$

gdzie:  $p$  - liczba par biegunów  
 $k = 1, 2, 3, \dots$

Autorzy zauważają jednak, że tylko te częstotliwości, dla których  $k/p = 1, 5, 7, 11, 13, \dots$  pojawiają się w widmie prądu ze znaczącymi wartościami amplitud, które mogą być nośnikami informacji diagnostycznej.

## 2.2. Estymacja poślizgu

Wyznaczenie częstotliwości poślizgowych jest uzależnione od znajomości poślizgu  $s$ , ten zaś zgodnie z formułą (3) jest zależny od prędkości synchronicznej  $n_s$  i obrotowej  $n_n$ .

$$s = \frac{n_s - n_n}{n_s} \quad (3)$$

$$n_s = \frac{120 f_0}{P} \quad (4)$$

gdzie:  $n_s$ - prędkość synchroniczna.

Częstotliwości poślizgowe mogą być wyznaczone pośrednio przez pomiar prędkości obrotowej silnika, jednak zbyt duży błąd pomiarowy nie pozwala wyznaczyć poślizgu na tyle precyzyjnie, aby móc wyznaczyć częstotliwości poślizgowe z zadowalającą dokładnością. Ponadto metoda ta wymaga czujnika prędkości, co ogranicza często stosowanie tej metody do silników wyposażonych w takie czujniki. Alternatywą do pomiarów pośrednich prędkości obrotowej i na jej podstawie wyznaczania poślizgu jest estymacja poślizgu metodą analizy widma prądu, wykorzystująca harmoniczne żłobkowe. Harmoniczne te powstają na skutek zjawiska modulacji reluktancji (rezystancji magnetycznej) na powierzchni wirnika wywołwanego przez jego żłobki. Powstają wówczas zmiany w strumieniu pola magnetycznego szczeliny powietrznej między wirnikiem a stojanem. To powoduje indukcję harmonicznych prądu w uzwojeniach stojana o częstotliwościach zależnych od prędkości obrotowej wirnika. W [8] autorzy wskazują formułę pozwalającą na wyznaczenie częstotliwości żłobkowych, która ma postać:

$$f_z = f_0 + 50 \frac{h \cdot NR \cdot (1-s)}{p} \quad (5)$$

gdzie:  $f_0$  - 50 [Hz]  
 $NR$  - liczba żłobków wirnika  
 $h = 1,2$  (poziom pasma występowania częstotliwości  $f_z$ )

Amplitudy harmonicznych żłobkowych mają stosunkowo duże wartości, co pozwala wskazać je za pomocą analizy numerycznej widma i odnaleźć odpowiadające im częstotliwości żłobkowe, których znajomość zgodnie z (5) pozwoli estymować wartość poślizgu.

## 3. WERYFIKACJA METODY ANALIZY WIDMOWEJ PRĄDU FAZOWEGO STOJANA NA STANOWISKU BADAWCZYM

Pomiary prądów i ich analiza została przeprowadzona na stanowisku badawczym, którego elementami są:

- Silniki firmy Tamel 2,2kW 1497obr/min:
- Hamownica magnetyczno-ciemna;
- Rejestrator Hioki 8855 z osprzętem;
- Komputer PC.

Zasilając silnik indukcyjny z sieci energetycznej 50 [Hz] można dokonać pomiarów prądu fazowego silnika za pomocą prądowych cęgów pomiarowych. Zarejestrowane prądy stojana w stanie ustalonym pracy badanego silnika w czasie 22 [s] z okresem próbkowania 10 [kHz] pozwalają na wyodrębnienie cech sygnałów o wartości diagnostycznej z widma mierzonego prądu. Dobór okresu próbkowania jest kompromisem pomiędzy wymaganiami dokładności widma prądu związanego z rozdzielczością widma, a ilością danych do analizy numerycznej. Czas i częstotliwość próbkowania podczas pomiaru pozwala dokonać analizy widmowej w zakresie do 5 [kHz] z rozdzielczością 0.05 [Hz]. Doświadczenia zostały przeprowadzane na silnikach indukcyjnych małej mocy, których wirniki zostały uszkodzone. W dalszej kolejności dokonano grupowania silników sprawnych i z uszkodzonymi wirnikami w cztery grupy, zgodnie z typem uszkodzenia. Zestawienie grup silników i ich nazw znajduje się w tabeli 1.

Tabela 1. Zestaw grup silników badanych na stanowisku badawczym

grupy silników	nazwa grupy	nazwy silników
sprawne	s	s_1 s_2 s_3 s_4 s_5 s_6
uszkodzony 1 pręt	1p	1p_1 1p_2 1p_3
uszkodzone 2pręty	2p	2p_1 2p_2 2p_3
uszkodzony pierścień	p	p_1 p_2

Badania silników przeprowadzone były w różnych warunkach obciążenia i temperatury uzwojeń. Obciążenie było zmieniane w granicach od 56% do 113% znamionowego momentu obciążenia  $M_n$ , co odpowiada napięciom wzbudzenia hamownicy magnetyczno-ciernej w granicach od 0V

do 18V (przy ok. 16V występuje znamionowy moment obciążenia silników badanego typu).

Zebraane i skatalogowane przebiegi prądowe, poddano następnie transformacji Fouriera (FFT), dzięki czemu możliwe było utworzenie kolejnej bazy danych zawierającej informację o zawartości harmonicznych w dziedzinie częstotliwości. Ta baza stanowi podstawę wyboru elementów wektora cech, niosącego informację o rodzaju uszkodzenia danego silnika. Jako cechy (symptomy uszkodzeń) silników brane były pod uwagę prądkę, których częstotliwości, zgodnie ze wzorem (1), dla ułatwienia notacji oznaczono jako:

cn – trzecia częstotliwość poślizgowa (1-6s);  
bn – druga częstotliwość poślizgowa (1-4s);  
an – pierwsza częstotliwość poślizgowa (1-2s);  
i ich relacje: an-bn, an-cn, bn-cn, an/bn, an/cn, bn/cn

f – amplituda prądkę dla częstotliwości harmonicznej;

ap – pierwsza częstotliwość poślizgowa (1+2s);  
bp – druga częstotliwość poślizgowa (1+4s);  
cp – trzecia częstotliwość poślizgowa (1+6s);  
i ich relacje: ap-bp, ap-cp, bp-cp, ap/bp, ap/cp, bp/cp.

Uwzględniono również informację o wartości obciążenia dla każdego z badanych silników i zmierzonej prędkości obrotowej za pomocą prądnicy tachometrycznej. Silniki tego samego typu uszkodzenia tworzą grupy, których nazwy zamieszcza Tabela 1.

### 3.1. Wyznaczanie poślizgu na stanowisku laboratoryjnym

Na stanowisku laboratoryjnym dokonano pomiaru prędkości i prądów silnika, które poddano analizie częstotliwościowej za pomocą rejestratora Hioki. Dokonano również weryfikacji dokładność wskazań częstotliwości poślizgowych otrzymanych drogą pomiaru prędkości wykorzystując wzory (1) do (4). Tabela 2 przedstawia wyniki pomiaru prędkości obrotowej i wyznaczonych poślizgów dla przykładowego silnika indukcyjnego z uszkodzonym pierścieniem, obciążonego w zakresie od 56% do 113% znamionowego momentu obciążenia.

Przeprowadzono również estymację programową poślizgu, analizując występowanie częstotliwości żłbkowej i stosując formułę (5). Dokonano weryfikacji dokładności stosowanego podejścia a wyniki zamieszczono w tabeli 3.

Wyniki eksperymentów potwierdzają słuszność założeń zwiększonej dokładności estymacji poślizgu z pomocą częstotliwości żłbkowych w porównaniu do jego wyznaczenia na podstawie pomiaru prędkości. Umożliwia to wskazanie poszukiwanych harmonicznych poślizgowych z większą dokładnością i analizę ich amplitud.

Tabela 2. Zestawienie pomiaru prędkości i wycień użytych do wyznaczenie poślizgu silnika indukcyjnego z uszkodzonym pierścieniem

pomiar z prądnicy tachometrycznej	obciążenie	wyznaczony poślizg	wyznaczona częst. poślizgowa	rzeczywista częst. poślizgowa
[V]	[Nm]	-	[Hz]	[Hz]
4.295	1.13Mn	0.0550	44.4994	44.15
4.300	1.06Mn	0.0539	44.6095	44.20
4.315	Mn	0.0506	44.9395	44.30
4.325	0.94Mn	0.0484	45.1595	44.50
4.330	0.88Mn	0.0473	45.2695	44.75
4.345	0.81Mn	0.0440	45.5996	45.05
4.360	0.75Mn	0.0407	45.9296	45.45
4.375	0.69Mn	0.0374	46.2596	45.75
4.395	0.63Mn	0.0330	46.6997	46.15
4.415	0.56Mn	0.0286	47.1397	46.60

Tabela 3. Wyniki estymacji poślizgu i częstotliwości poślizgowych za pomocą częstotliwości żłbkowych

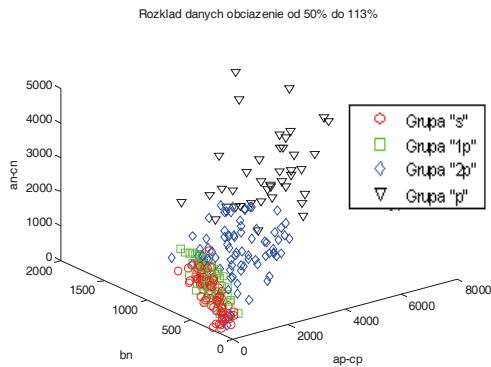
częstotliwość żłbkowa	obciążenie	estymowany poślizg	wyznaczona częst. poślizgowa	rzeczywista częst. poślizgowa
[V]	[Nm]	-	[Hz]	[Hz]
708.95	1.13Mn	0.0586	44.1357	44.15
709.55	1.06Mn	0.0578	44.2214	44.20
710.30	Mn	0.0567	44.3286	44.30
711.70	0.94Mn	0.0547	44.5286	44.50
713.35	0.88Mn	0.0524	44.7643	44.75
715.55	0.81Mn	0.0492	45.0786	45.05
718.20	0.75Mn	0.0454	45.4571	45.45
720.25	0.69Mn	0.0425	45.7500	45.75
723.15	0.63Mn	0.0384	46.1643	46.15
726.35	0.56Mn	0.0338	46.6214	46.60

### 3.2. Ekstrakcja cech występujących w sąsiedztwie pierwszej harmonicznej

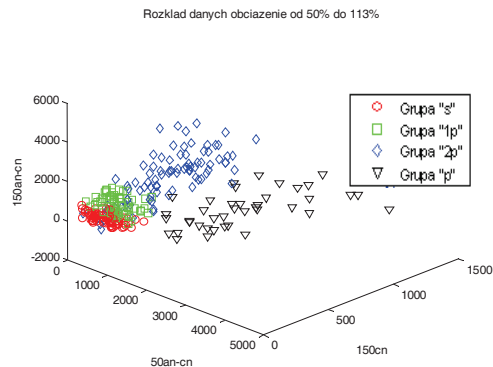
Pośród 19 cech wyodrębnionych z widma prądu z sąsiedztwa pierwszej harmonicznej, podjęto próbę wskazania trzech, dających najlepsze wyniki klasyfikacji uszkodzeń. Cechy te tworzyły wektor cech, którego elementy wyznaczono za pomocą badania rozdzielności grup silników na płaszczyźnie parametrów (wielkości cech) metodą k-średnich dla wszystkich kombinacji trójelementowych zestawów cech. Wyznaczone dla każdej kombinacji wektora cech wartości błędów klasyfikacji stanowią wskaźnik optymalnego wyboru cech z rozważanego zakresu. Okazało się, że dla widma badanego wokół pierwszej harmonicznej najlepszym pod kątem błędu klasyfikacji okazały się parametry (an-cn), (bn), (ap-cp). Rys. 2 przedstawia rozkład wartości parametrów dla wszystkich badanych grup silników.

Tabela 4 przedstawia procentowy i ilościowy udział rozpoznawanych prawidłowo grup silników spośród wszystkich prezentowanych. Taki wybór cech pozwala przeprowadzić klasyfikację badanych silników metodą k-średnich z błędem całkowitym nie większym niż 25% wszystkich badanych przypadków.

Przykładowo 95% wszystkich badanych silników z grupy „p” rozpoznano poprawnie. Podczas gdy błędne diagnozy klasyfikujące tę grupę do silników z dwoma uszkodzonymi prętami (grupa „2p”) sięgnęły 5% przypadków.



Rys. 2. Rozkład wartości cech (an-cn), (bn), (ap-cp) wokół pierwszej harmonicznej



Rys. 3. Rozkład wartości cech (50an-cn), (150cn), (150an-cn), wybranych z zakresu od 25 [Hz] do 500 [Hz]

Tabela 4. Wyniki klasyfikacji poszczególnych grup badanych silników dla widma wokół pierwszej harmonicznej

od 0.5 Mn	262.00	kl1	kl2	kl3	kl4	suma
Grupa "s"	liczba	56.00	18.00	2.00	0.00	<b>76.00</b>
	%	<b>73.68</b>	23.68	2.63	0.00	
Grupa "1p"	liczba	20.00	41.00	1.00	0.00	<b>62.00</b>
	%	32.26	<b>66.13</b>	1.61	0.00	
Grupa "2p"	liczba	3.00	13.00	63.00	5.00	<b>84.00</b>
	%	3.57	15.48	<b>75.00</b>	5.95	
Grupa "p"	liczba	0.00	0.00	2.00	38.00	<b>40.00</b>
	%	0.00	0.00	5.00	<b>95.00</b>	

3.3. Ekstrakcja cech z zakresu od 25Hz do 500Hz

Zważywszy na występowanie częstotliwości poślizgowych nie tylko w okolicach pierwszej harmonicznej, podjęto próby ekstrakcji cech analizując harmoniczne poślizgowe wokół nieparzystych harmonicznych w zakresie od 25 Hz do 500Hz.

Najlepszy wynik klasyfikacji, jaki udało się uzyskać na trójelementowych wektorach cech metodą k-średnich wykazywał około 6.5%-owy zbiór przypadków cech silników błędnie zakwalifikowanych. Elementami tego wektora były cechy z okolic trzeciej harmonicznej 150(an-cn), 150(cn), oraz z okolic pierwszej harmonicznej 50(an-cn). Rys. 3 przedstawia rozkład parametrów wektora, a Tabela 5 macierz omyłek klasyfikacji dla tego zestawu cech. Rozszerzenie zakresu wyboru cech zdecydowanie wpływa na poprawę jakości klasyfikacji, pozwala również na wskazanie tych cech, które niosą z sobą najwięcej informacji diagnostycznej.

Tabela 5. Wyniki klasyfikacji poszczególnych grup badanych silników dla widma w zakresie 25[Hz] do 500[Hz]

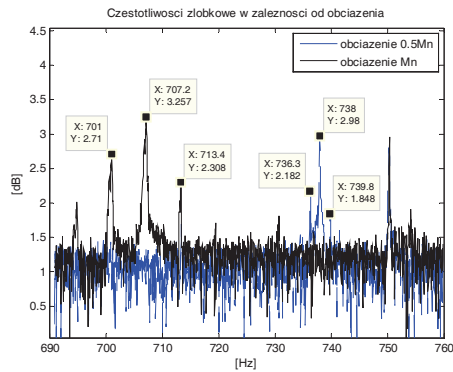
od 0.5 Mn	262.00	kl1	kl2	kl3	kl4	suma
Grupa "s"	liczba	71.00	4.00	1.00	0.00	<b>76.00</b>
	%	<b>93.42</b>	5.26	1.32	0.00	
Grupa "1p"	liczba	3.00	59.00	0.00	0.00	<b>62.00</b>
	%	4.84	<b>95.16</b>	0.00	0.00	
Grupa "2p"	liczba	3.00	3.00	78.00	0.00	<b>84.00</b>
	%	3.57	3.57	<b>92.86</b>	0.00	
Grupa "p"	liczba	1.00	1.00	1.00	37.00	<b>40.00</b>
	%	2.50	2.50	2.50	<b>92.50</b>	

3.4. Ekstrakcja cech wokół częstotliwości żłbkowych

Częstotliwości żłbkowe wykorzystywane do estymacji poślizgu, charakteryzują się również sąsiedztwem częstotliwości poślizgowych. Pojawiają się one tutaj podobnie jak w okolicach nieparzystych harmonicznych. Oba rodzaje częstotliwości zależne są od poślizgu. Podstawiając za  $f_z$  wyrażenie po prawej stronie równania (5) a za  $f_s$  wyrażenie po prawej stronie równania (1) można znaleźć relacje między obiema częstotliwościami:

$$f_z = f_s \frac{NR}{4} \tag{6}$$

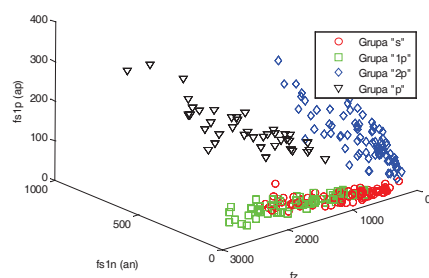
W przypadku badanych silników liczba żłbków NR wynosi 28, co oznacza, że odległość częstotliwości żłbkowej  $f_z$  od 750 Hz jest siedmiokrotnie większą niż odległość częstotliwości poślizgowej  $f_s$  od częstotliwości żłbkowej  $f_z$ . Rys. 4 przedstawia porównanie fragmentów widm prądu silnika z uszkodzonym pierścieniem dla dwóch wartości obciążenia: połowy znamionowej i wartości znamionowej.



Rys. 4. Częstotliwości żłbkowe  $f_z$  ( $x$ :707.2 oraz  $x$ :738) i poślizgowe wokół nich ((an) $x$ :701, (ap) $x$ :713.4 oraz (an) $x$ :736.3, (ap) $x$ :739.8) w zależności od obciążenia

Analiza poziomu amplitud harmonicznych żłbkowych i poślizgowych niesie z sobą również informacje diagnostyczne. Rys. 5 przedstawia rozkład cech, którymi są harmoniczne żłbkowe  $f_z$ , harmoniczne poślizgowe (an) oraz (ap) wokół częstotliwości żłbkowej  $f_z$  czterech grup silników, badanych pod obciążeniem od 50% do 113% wartości znamionowego momentu obciążenia. Analizując rozkład cech można stwierdzić, że harmoniczne żłbkowe analizowane w odniesieniu do harmonicznych poślizgowych można uzyskać informacje o stanie technicznym wirnika badanego silnika w stopniu wyższym niż to jest możliwe analizując harmoniczne poślizgowe w odniesieniu do pierwszej harmonicznej. Analiza harmonicznych żłbkowych pozwala bowiem niemal jednoznacznie wskazać silniki z uszkodzonymi wirnikami, należącymi do grup z uszkodzonymi pierścieniami „p” i uszkodzonymi dwoma prętami „2p”.

rozkład danych, obciążenie od 50% do 113%



Rys. 5. Rozkład wartości amplitud częstotliwości żłbkowych i poślizgowych w ich sąsiedztwie

#### 4. PODSUMOWANIE

Wyniki badań silników z czterema rodzajami uszkodzeń wirników wskazują na możliwość wykorzystania częstotliwości żłbkowych do celów estymacji poślizgu. Analiza amplitud tych harmonicznych w połączeniu z analizą amplitud częstotliwości poślizgowych, jakie występują w ich sąsiedztwie, ma również wartość diagnostyczną przyczyniającą się do zwiększenia trafności decyzji diagnostycznych. Można, bowiem za jej pomocą

wskazać silniki wykazujące cechy uszkodzeń określonych typów.

#### LITERATURA

- [1] Kliman G. B., Stein J.: *Induction motor fault detection via passive current monitoring*. International Conference In Electrical Machines, Cambridge, MA, pp.13-17, August 1990.
- [2] Glinka T., Jakubiec M., Lechowicz K., Brandt M., Szczerba J.: *Badanie sił naciągu magnetycznego w silnikach indukcyjnych*. ZN AGH nr 1190, „Elektrotechnika” nr 12/88. str. 229-244.
- [3] Gogolewski J., Paszek W., Gabryś W., Kubek J.: *Uszkodzenia maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1967.
- [4] Kliman G. B., Stein J.: *Methods of motor current signature analysis*. Electric Machines and Power Systems, pp.463-474, 1992, vol. 20, no 5, pp. 463-474 (22 ref.).
- [5] Kliman G. B., Koegel R. A., Stein J., Endicott R.D., Madden M. W.: *Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors*. IEEE Trans. Energy Conv. Vol. EC-3, no.4, pp.873-879, Dec. 1988.
- [6] Filipetti F. et al.: *AI techniques in induction machines diagnosis including the speed rifle effect*. IEEE Industry Applications Society Annu. Meet. Conf., San Diego, CA, Oct. 6–10, 1996, pp. 655–662.
- [7] Riley C. M., Lin B. K., Habetler T. G., Kliman G. B.: *Stator current harmonics and their casual vibrations: a preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications*. IEEE Trans. of Industry Applications. Vol. 35. no.1 Jan-Feb. 1999.



#### Andrzej SOBOLEWSKI

od 1998 r. jest asystentem w Katedrze Automatyki i Elektroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej. W obrębie jego zainteresowań znajdują się zagadnienia związane z diagnostyką procesów

przemysłowych, automatyzacją procesów oraz sztuczna inteligencją. W ostatnich latach swoje prace badawcze skupia na zastosowaniu sieci neuronowych w problemach diagnostyki i monitoringu silników indukcyjnych.