

Konrad Weinreb, Maciej Sułowicz  
 Politechnika Krakowska, Kraków

## SKUTECZNE WYKRYWANIE EKSCENTRYCZNOŚCI DYNAMICZNEJ W SILNIKU ASYNCHRONICZNYM

### EFFECTIVE DETECTING OF THE DYNAMIC ECCENTRICITY IN ASYNCHRONOUS MOTOR

**Abstract:** In the article a detection method will be analysed, which improves detection efficiency and assessment of dynamic eccentricity level. The method based on the analysis and selection of the characteristic features for stator current spectrum, which take the components related to the third harmonic current into consideration. Generally accepted assessment methods of variety faults are based on current spectrum analysis (mostly close to fundamental harmonic), with the assumption of sinusoidal voltage supplying and linear magnetic circuit. In case of simultaneous variety faults, the spectrum changes are often ambiguous. For example, the dynamic eccentricity and cage damage result in spectrum by appearing the harmonic with the same frequency. The assessment efficiency can be increased by broaden the harmonic components set, especially these, which are changing under the third harmonic component of stator current. Based on the measurements of low voltage motor, analysis results for different faults will be presented. The spectrum features caused by third harmonic stator current, which are unambiguously the evidence of a particular rotor fault, will be indicated.

#### 1. Wprowadzenie

W artykule zostanie poddana analizie metoda, poprawiająca skuteczność wykrywania i oceny poziomu ekscentryczności dynamicznej z widma prądu stojana, przy uwzględnieniu składowych generowanych przez wyższe harmoniczne, głównie trzecią, napięcia zasilania. Na podstawie pomiarów dla niskonapięciowego silnika małej mocy zostaną przedstawione wyniki analiz dla wybranych, z góry zadanych, przypadków uszkodzeń. Zostaną wskazane cechy widma prądu pochodzące od wpływu podstawowej i trzeciej harmonicznej napięcia jednoznacznie świadczące o danym rodzaju uszkodzenia wirnika. Poczynione obserwacje zostaną zweryfikowane na dwóch przykładach silników dużej mocy pracujących w układach napędowych procesów technologicznych.

Przedmiotem przedstawionych w artykule analiz jest trójfazowy silnik asynchroniczny klatkowy, pracujący przy stałych obrotach wirnika, bliskich znamionowym. Symetryczne uzwojenie stojana, o całkowitej liczbie żłobków na biegun i fazę, jest połączone w gwiazdę i wytwarza przepływ, którego harmoniczne są nieparzystą krotnością liczby par biegunów magnetycznych –  $p$ . W napięciach zasilania uwzględnia się wszystkie nieparzyste harmoniczne, w tym trzecią harmoniczną o składowej symetrycznej kolejności zgodnej lub przeciwnej.

Wówczas, w widmie prądu fazowego stojana należy wyróżnić harmoniczne [1], [2]:

- sieciowe, o częstotliwościach i kolejności składowych symetrycznych równych harmonicznym widma napięcia zasilania;
- poślizgowe, o częstotliwościach związanych z poślizgiem.

Harmoniczne poślizgowe związane liczbą żłobków wirnika  $N_r$ , zwane harmonicznymi żłobkowymi mają częstotliwości:

$$f_s = |kf_0 + lN_r f_r| \quad (1)$$

gdzie:  $f_0$  – częstotliwość podstawowej harmonicznej [Hz];  $f_r = n/60$  – częstotliwość wirnika [Hz];  $n$  – obroty wirnika [ $\text{min}^{-1}$ ];  $k = 1, 3, 5, \dots$ ;  $l = \pm 1, \pm 2, \dots$ .

Powyższe harmoniczne są charakterystyczne dla silnika zasilanego niesymetrycznym układem napięć z ekscentrycznością statyczną.

Dla diagnostyki szczególne znaczenie ma podstawowa harmoniczna żłobkowa, występująca również w widmie nieuszkodzonego silnika. Jej częstotliwość związana jest z wartością parametru  $g$ , będącą najmniejszą liczbą naturalną z przedziału ( $1 \leq g \leq 2p$ ), dla której reszta z dzielenia  $gN_r$  przez  $6p$  należy do zbioru  $\{0, 2p, 4p\}$ . W ten sposób wyróżnia się trzy typy silnika wyznaczające porządek występowania składowych symetrycznych prądów stojana ko-

lejności zerowej, zgodnej i przeciwnej w układzie równań modelu matematycznego maszyny [3]. Przy przyjętych założeniach jedna albo dwie podstawowe harmoniczne żłobkowe mają częstotliwości, dla silnika typu:

$$\text{„0” (reszta wynosi } 2p) - |f_0 - gN_r f_r| \quad (2)$$

$$\text{„1” (reszta = 0) - } |f_0 - gN_r f_r|, |f_0 + gN_r f_r| \quad (3)$$

$$\text{„2” (reszta wynosi } 4p) - |f_0 + gN_r f_r| \quad (4)$$

W przypadku niesymetrii elektrycznej klatki lub ekscentryczności dynamicznej, w prądzie fazowym stojana wystąpią harmoniczne o częstotliwościach, związanych z  $k$ -tą harmoniczną napięcia i należących odpowiednio do zbiorów [1]:

$$\text{dla } k = 1, 7, \dots; f_s \in \{A \cup B\} \quad (5)$$

$$\text{dla } k = 5, 11, \dots; f_s \in \{A \cup C\} \quad (6)$$

$$\text{dla } k = 3, 9, \dots; f_s \in \{B \cup C\} \quad (7)$$

gdzie:

$$A = \{kf_0 + 16pf_r\}; B = \{kf_0 + (4 + 16)pf_r\}; \\ C = \{kf_0 + (2 + 16)pf_r\}; l = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

Z wymienionych we wzorach (5), (6) i (7) harmonicznym, szczególnie ważne dla wykrycia i oceny uszkodzenia są:

- oboczne względem podstawowej harmonicznej, o częstotliwościach

$$|f_0 - 2pf_r| \text{ i } |3f_0 - 2pf_r| \quad (9)$$

- oboczne względem podstawowej żłobkowej harmonicznej, o częstotliwościach dla silnika

- typu „0”

$$|f_0 + (gN_r - 2p)f_r| \text{ i } |3f_0 - (gN_r + 2p)f_r| \quad (10)$$

- typu „1”

$$|f_0 - (gN_r - 2p)f_r| \text{ i } |3f_0 - (gN_r + 2p)f_r| \quad (11)$$

$$|f_0 + (gN_r + 2p)f_r| \text{ i } |3f_0 + (gN_r - 2p)f_r| \quad (12)$$

- typu „2”

$$|f_0 - (gN_r + 2p)f_r| \text{ i } |3f_0 + (gN_r - 2p)f_r| \quad (13)$$

- oraz te, których częstotliwości spełniają dodatkowo zależność

$$|f_0 \pm N_s f_r| \text{ albo } |3f_0 \pm N_r f_r| \quad (14)$$

gdzie:  $N_s$  jest liczbą żłobków stojana.

Najmniejsza możliwa różnica częstotliwości dwóch harmonicznym, przy poślizgu  $s$  wynosi:

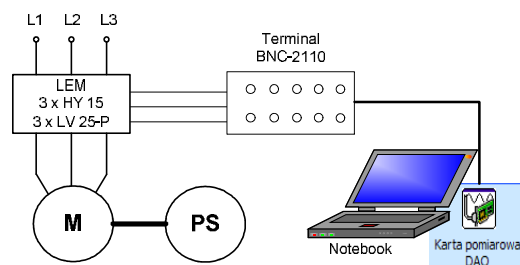
$$\Delta f_s = 2sf_0 = 2f_0 - 2pf_r \quad (15)$$

## 2. Opis układu pomiarowego

Obiektem badań laboratoryjnych był silnik *Sg112M-4* o danych:  $P_N = 4$  kW,  $U_N = 380$  V ( $\Delta$ ),  $I_N = 8.6$  A,  $n_N = 1430$  obr/min. i liczbie żłobków stojana –  $N_s = 36$  i wirnika –  $N_r = 28$ . Jest to silnik typu „0”, o parametrze  $g = 1$ .

Silnik, zasilony napięciem znamionowym przy połączeniu uzwojenia stojana w gwiazdę, pracował przy  $n = 1440$  obr/min. Silnik miał wymieniane wirniki, w tym: symetryczny, z zadaną przerwą prętów klatki oraz z mimośrodowym osadzeniem wału, odpowiadającym 40% ekscentryczności dynamicznej –  $\varepsilon_d = 0.4$ . Silnik był obciążony prądnicą prądu stałego, zasilającą zestaw grzałek oporowych o mocy 3.6 kW. Prądnicą była wzbudzana z wyjścia układu mostkowego zasilanego z autotransformatora, co pozwalało na płynną regulację obciążenia badanego silnika. Sprzężenie badanego silnika i prądnicy stanowiącej jego obciążenia było zrealizowane z pomocą specjalnego sprzęgła.

Schemat ideowy połączenia elementów stanowiska pomiarowego z układem akwizycji sygnałów przedstawiono na rysunku 1.

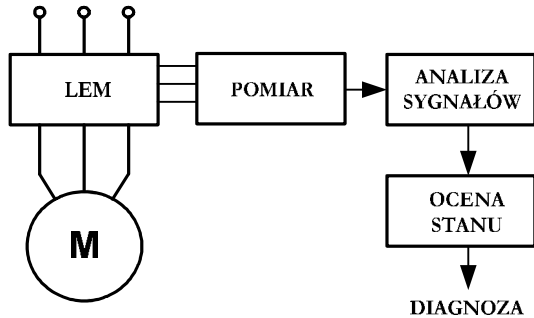


Rys. 1. Ideowy schemat systemu akwizycji do badań silnika w laboratorium

Wszystkie pomiary wykonano przy pomocy zestawu akwizycji sygnałów składającego się z następujących elementów: karty pomiarowej DAQCard 6036E; układu kondycjonowania sygnałów NI BNC 2110; przetworników prądowych LEM HY-15; przetworników napięciowych LEM LV 25-P; wielożyłowego kabla typu SHC68-68-EPM Shielded Cable, 68-D-Type to 68 VHDCI; kabli BNC; zasilacza do przetworników pomiarowych LEM.

Dla badanego silnika zarejestrowano w tych samych chwilach czasowych przebiegi czasowe trzech prądów i trzech napięć fazowych, z częstotliwością próbkowania 10 kHz, przy konfigu-

racji wejść analogowych karty pomiarowej w trybie różnicowym. Dane zbierano przez okres 10 sekund. Następnie zebrane dane przetwarzano i analizowano w programie MATLAB, zgodnie ze schematem blokowym, przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy przetwarzania sygnałów diagnostycznych

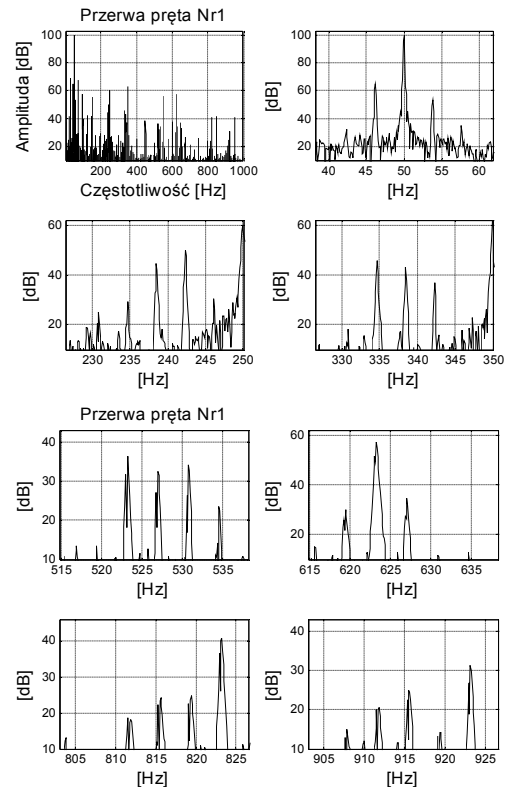
Na podstawie analizy wzajemnych relacji amplitud wybranych harmonicznym wyznaczonego za pomocą szybkiej transformacji FFT widma prądu, następuje ocena stanu technicznego badanego silnika.

### 3. Wyniki pomiarów i ich analiza

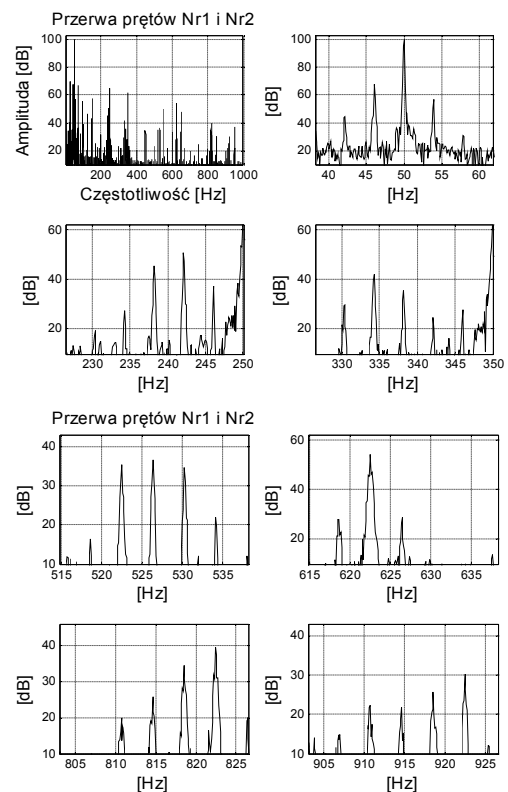
W przedstawionych widmach amplitudowych prądu fazowego stojana każdego z silników wyróżniono przedziały częstotliwości istotne dla dalszej analizy zmian charakterystycznych harmonicznym składowych.

Porównanie amplitud tych samych harmonicznym przy dwóch rodzajach uszkodzeń, przedstawione w Tabeli 1 prowadzi do następujących wniosków:

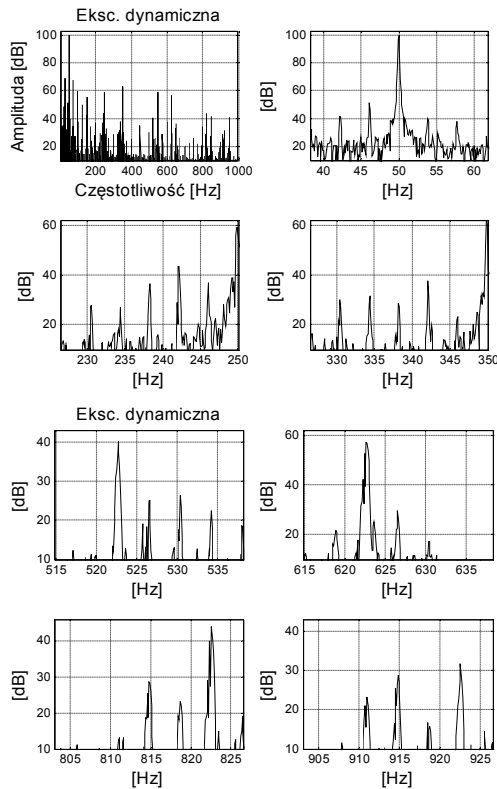
- niesymetria klatki nie wpływa na zmiany amplitud harmonicznym o częstotliwościach  $|f_0 \pm N_s f_r|$  [4] oraz  $|3f_0 \pm N_r f_r|$  [5], ekscentryczność dynamiczna powoduje ich wzrost;
- harmoniczne oboczne względem podstawowej (formuła (9)) i podstawowej żłobkowej (formuła (10)) harmonicznym, generowane w wyniku niesymetrii klatki mają parami zbliżone amplitudy;
- amplitudy wymienionych harmonicznym obocznych, generowanych przez ekscentryczność dynamiczną są odpowiednio



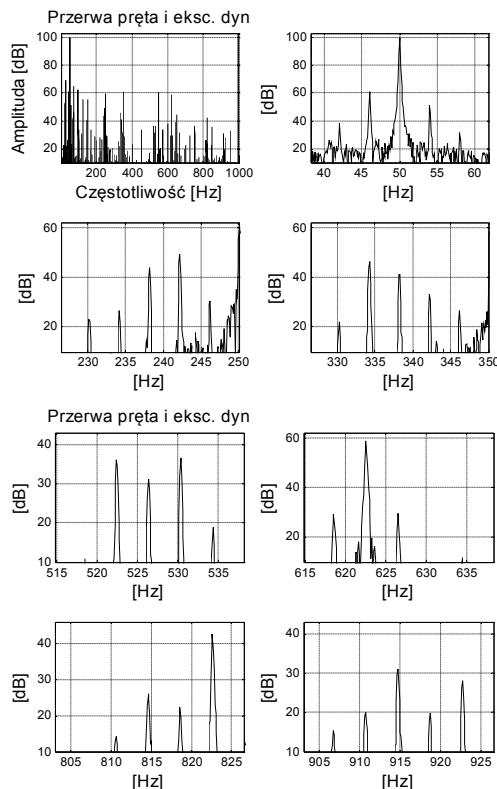
Rys. 3. Widmo prądu stojana silnika z przerwanym prętem klatki wirnika



Rys. 4. Widmo prądu stojana silnika z przerwanymi dwoma prętami klatki



Rys. 5. Widmo prądu stojana silnika z ekscentrycznością dynamiczną  $\varepsilon_d = 0.4$



Rys. 6. Widmo prądu stojana silnika z przerwanym prętem klatki i ekscentrycznością dynamiczną  $\varepsilon_d = 0.4$

mniejsze dla harmonicznych związanych z trzecią harmoniczną zasilania, niż dla harmonicznych związanych z podstawową harmoniczną zasilania;

- w przypadku równoczesnego wystąpienia obu rodzajów uszkodzenia silnika - „wirnik Nr 4” widoczna jest synergia zmian amplitud wyróżnionych harmonicznych widma.

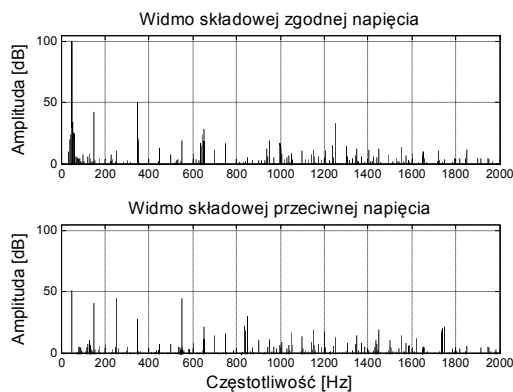
Tabela 1. Częstotliwości i amplitudy harmonicznych prądu stojana silnika Sg112M-4

Częstotliwość $f_s =  kf_0 + lf_r $			Amplituda harmonicznej [dB]			
$k$	$l$	[Hz]	Nr wirnika			
			1	2	3	4
3	-8	42	32.3	44.6	41.9	38.6
1	-4	46	64.8	<b>67.6</b>	<b>51.5</b>	60.7
1	0	50	100	100	100	100
3	-4	54	53.4	<b>56.9</b>	<b>39.8</b>	51.7
3	0	150	55.3	55.9	55.5	55.5
3	-16	234	29.1	27.3	27.2	26.5
1	-12	238	44.8	45.2	36.7	44.0
1	8	242	50.1	50.8	43.5	49.0
3	4	246	30.4	37.2	37.0	30.6
3	-20	330	18.1	29.8	30.1	22.0
1	-16	334	45.8	41.9	31.7	46.2
1	12	338	43.0	35.6	28.6	41.3
3	8	342	37.1	24.7	37.5	33.2
3	-28	522	36.2	<b>35.2</b>	<b>40.1</b>	36.1
1	-24	526	32.3	36.5	25.1	31.3
1	20	530	34.1	34.6	26.4	36.6
3	16	534	23.5	22.1	22.4	19.0
3	-32	618	30.1	<b>28.2</b>	<b>21.8</b>	29.1
1	-28	622	57.3	54.6	57.2	58.9
1	24	626	34.5	<b>29.0</b>	<b>29.5</b>	29.6
3	-40	810	18.5	20.0	12.9	14.1
1	-36	814	24.0	<b>25.7</b>	<b>28.8</b>	26.0
1	32	818	24.8	34.5	23.0	22.2
3	28	822	40.8	<b>39.5</b>	<b>44.0</b>	42.8
1	-40	910	20.0	22.2	23.2	20.0
1	36	914	24.9	<b>21.8</b>	<b>28.7</b>	31.0
3	32	918	14.2	25.7	15.8	19.7

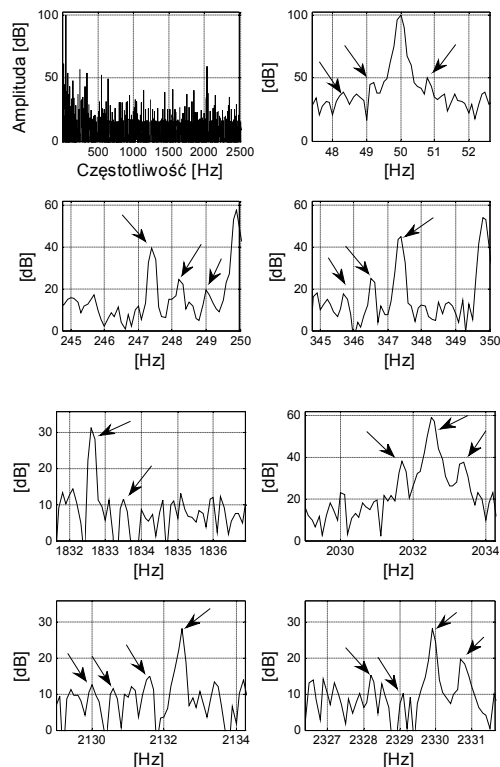
\*Uwaga: 1 - przerwa jednego pręta; 2 – przerwa dwóch kolejnych prętów; 3 – ekscentryczność dynamiczna; 4 - ekscentryczność dynamiczna i przerwa pręta; wyróżniono amplitudy harmonicznych wskazujących na niesymetrię klatki albo na ekscentryczność dynamiczną.

Za pomocą opisanego powyżej przenośnego zestawu pomiarowego przebadano kilkanaście silników wysokiego napięcia, pracujących w różnych układach napędowych. Wszystkie badania były prowadzone w oparciu o nieinwazyjny pomiar prądu stojana w obwodzie wtórnym przekładników prądowych oraz po-

miar napięć zasilających silnik w obwodzie wtórnym przekładników napięciowych. Pomiar wykonano podczas normalnej pracy silnika pod obciążeniem, wynikającym w chwili pomiaru z charakteru obciążenia napędzanego procesu. Dla uzasadnienia poprawności proponowanej metody diagnozowania uszkodzeń ważną wydaje się ocena napięć zasilających badany silnik. Widmo składowych symetrycznych zarejestrowanych napięć, dla pierwszych 40 harmonicznych przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Widmo składowych symetrycznych napięcia zasilania



Rys. 8. Widmo prądu fazowego stojana silnika SCDDm 122r

Poniżej zostaną przedstawione wyniki analizy widma prądu fazowego stojana dla dwóch wybranych silników, potwierdzające zasadność przedstawionej metody wykrywania i oceny określonych uszkodzeń silnika.

#### Przykład 1

Silnik SCDDm 122r o danych znamionowych:  $P_N = 630$  kW,  $U_N = 6$  kV,  $I_N = 75.5$  A,  $n_N = 2960$  obr/min. i liczbie żłobków stojana –  $N_s = 48$  i wirnika –  $N_r = 40$  pracuje w Elektrociepłowni jako pompa zasilająca, z obrotami 2973.8 obr/min. i prądem stojana 61.4 A. Jest to silnik typu „2”, w którym parametr  $g = 1$ .

Na rysunku 8 strzałkami wyróżniono istotne dla diagnozy harmoniczne zmierzonego widma. Przedstawione w Tabeli 2 wartości amplitud wybranych harmonicznych prądu wskazują na niewielką niesymetrię klatki wirnika.

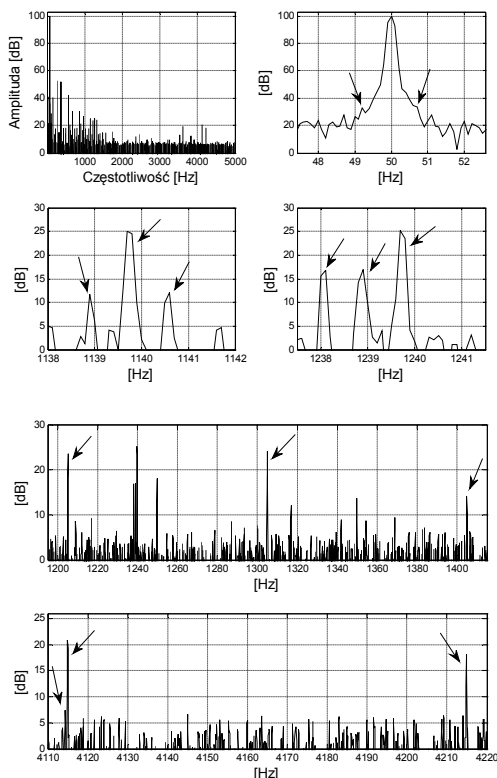
Tabela 2. Częstotliwości i amplitudy harmonicznych prądu silnika SCDDm 122r

Częstotliwość i amplituda harmonicznej prądu			
$f_s =  kf_0 + lf_r $			[dB]
$k$	$l$	[Hz]	
3	-4	48.3	39.3
1	-2	49.2	46.6
1	0	50.0	100.0
3	-2	50.8	50.1
1	-6	247.4	39.4
1	4	248.2	24.3
3	2	249.1	19.5
3	-10	345.6	17.4
1	-8	346.5	25.0
1	6	347.4	44.9
3	-40	1832.5	31.5
1	-38	1833.4	11.6
1	-42	2031.6	38.2
1	40	2032.5	59.2
3	38	2033.4	37.7
3	-46	2129.9	12.5
1	-44	2130.7	11.5
1	42	2131.6	14.9
3	40	2132.5	28.1
3	-50	2328.1	15.2
1	-48	2329.0	10.3
1	46	2329.9	28.1
3	44	2330.8	19.7

#### Przykład 2

Silnik SZD Vr1136t o danych znamionowych:  $P_N = 800$  kW,  $U_N = 6$  kV,  $I_N = 95$  A,  $n_N = 985$  obr/min. i liczbie żłobków stojana –  $N_s = 72$  i wirnika –  $N_r = 82$  pracuje z obrotami

991.4 obr./min. i prądem stojana 86.9 A. Jest to silnik typu „2”, w którym parametr  $g = 3$ .



Rys. 9. Widmo prądu fazowego stojana silnika SZDVR1136t

Tabela 3. Częstotliwości i amplitudy wybranych harmoniczných prądu fazowego stojana silnika SZDVR1136t

Częstotliwość i amplituda harmoniczných prądu			
$f_s =  kf_0 + lf_r $			[dB]
$k$	$l$	[Hz]	
1	-6	49.1	33.0
1	0	50.0	100.0
3	-6	50.9	33.4
3	-78	1138.9	11.7
1	-72	1139.7	25.0
3	66	1140.6	12.1
3	-84	1238.0	16.8
1	-78	1238.9	17.0
1	72	1239.7	25.2
3	-82	1205.0	23.6
1	-82	1305.0	24.1
1	82	1405.0	14.2
1	-252	4114.0	7.5
1	246	4114.9	20.9
3	240	4115.8	2.5
3	246	4214.9	18.1

Badany silnik wykazuje cechy ekscentryczności dynamicznej i statycznej (rys. 9, Tabela 3), co może wynikać z warunków jego pracy w układzie napędowym w pozycji pionowej.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań różnych typów silników asynchronicznych klatkowych pozwalają wnioskować, że możliwe jest rozróżnienie skutków odmiennych uszkodzeń silnika poprzez analizę porównawczą zmian amplitud ściśle określonych harmoniczných widma prądu fazowego stojana.

Częstotliwości tych harmoniczných różnią się o  $\pm 2pf_r$  (formuły (9)-(13)) od częstotliwości harmoniczných sieciowych oraz żłobkowych lub związane są bezpośrednio z liczbą żłobków stojana bądź wirnika (formuła (14)).

#### 4. Literatura

- [1] Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M.: *Influence of the Main Magnetic Circuit Saturation on Stator Current Spectrum for a Cage Induction Motor with Rotor Asymmetry*. Czasopismo Techniczne, Z.3-E/2006, PK Kraków, pp. 65-76
- [2] Elawgali S.: *Effect of Eccentricities and Cage Asymmetry on Induction Machine Currents, Considering Deformation of Supply Voltages*. Proc. of the ICEM'2004, Cracow, Poland, 5-8.09.2004, pp. 443-448
- [3] Sobczyk T., Weinreb K., Sułowicz M., Węgiel T., Warzecha A.: *Effects in Stator Currents of Cage Motors Due to Saturation of Main Magnetic Circuit*. Proc. of the SDEMPED'2003, Atlanta. GA, USA. 24-26.08.2003, pp. 81-86
- [4] Weinreb K.: *Обнаружение динамического эксцентриситета и обрыва стержней клетки в асинхронном двигателе методом спектрального анализа тока статора*. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Основной выпуск. №1(53)2008, pp. 119-126
- [5] Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G.-A.: *Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, Dec. 2008, pp. 4109-4126

#### Autorzy

Dr inż. Konrad Weinreb,  
e-mail: [peweinre@cyf-kr.edu.pl](mailto:peweinre@cyf-kr.edu.pl)  
Dr inż. Maciej Sułowicz,  
e-mail: [pesulowi@cyf-kr.edu.pl](mailto:pesulowi@cyf-kr.edu.pl)  
Politechnika Krakowska,  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej,  
Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii,  
Katedra Maszyn Elektrycznych  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków