

Jarosław Tulicki, Maciej Sułowicz  
Politechnika Krakowska

## ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SYGNAŁÓW AKUSTYCZNYCH W DIAGNOSTYCE MASZYN ASYNCHRONICZNYCH PRACUJĄCYCH PRZY ZMIENNYM OBCIĄŻENIU

### ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF ACOUSTIC SIGNALS USAGE IN THE DIAGNOSIS OF ASYNCHRONOUS MACHINES OPERATING AT VARIABLE LOAD

**Streszczenie:** Aktualnie istnieje silny trend rozwoju metod i rozwiązań diagnostycznych bazujących na sygnałach pomiarowo dostępnych niosących informację na temat stanu technicznego badanego obiektu. Mimo, że pomiary wielkości elektrycznych oraz drgań są uważane za bezinwazyjne, to w praktyce wymaga się montażu czujników do pomiaru tych sygnałów na obudowie maszyny lub objęcia co najmniej jednego przewodu fazowego przekładnikiem prądowym. W wielu praktycznych przypadkach przemysłowych, prócz braku możliwości przerwania pracy napędu, może dojść do sytuacji utrudnionego dostępu do instalacji elektrycznej lub samej maszyny. Na podstawie powyższych ograniczeń za sygnały zupełnie bezinwazyjne można uznać jedynie promieniowanie termiczne oraz przebiegi zmian ciśnienia akustycznego wokół maszyny w funkcji czasu. W niniejszym opracowaniu, przedstawiono wyniki prac nad efektywnym wykorzystaniem własności diagnostycznych wartości chwilowej sygnału akustycznego emitowanego przez niesymetryczny silnik indukcyjny klatkowy pracujący przy zmiennym obciążeniu.

**Abstract:** In modern diagnostic methods, there is a strong trend in the development of diagnostic solutions based on all available measurement signals carrying information about the technical state of the object. Although the measurement of electrical quantities and vibration are considered to be non-invasive, in practice the mounting of the sensors to the frame of the machine or to at least one phase conductor is required. In industrial practice, not only the interruption to the operation of the drive may be impossible, but also the access to the electrical system or the machine itself may be limited. In these cases, only the thermal radiation and changes in sound pressure waveforms as a function of time can be considered completely non-invasive signals. In this study, the results of the effective use of diagnostic properties of the instantaneous value of acoustic signal emitted by the asymmetric cage motor operating at variable load were shown and analyzed.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka silnika klatkowego, stany dynamiczne maszyny indukcyjnej, wibroakustyka  
**Keywords:** cage motor diagnostics, dynamic states of the induction machine, vibroacoustics

#### 1. Wstęp

W dotychczasowych rozważaniach z zakresu nieinwazyjnej diagnostyki silnika indukcyjnego bazującej na sygnałach pomiarowo dostępnych, dominujący charakter mają metody związane z analizą okresowych przyspieszeń drgań oraz sygnałów elektrycznych. W drugim przypadku, na szeroką skalę [10], [12], stosuje się przebiegi pomierzone w stanach przejściowych, ze względu na ich wysokie walory diagnostyczne oraz znaczną odporność na zakłócenia [10] momentu obciążenia badanej maszyny. Trzecim z niewymienionych powyżej sygnałów, jest chwilowa wartość ciśnienia akustycznego [1], [2]. Podobnie jak w przypadku

w dotychczas przedstawionych pracach z zakresu akustyki drganiowej [6], [7], zaprezentowano skuteczne metody wykrywania stanów awaryjnych maszyn elektrycznych z zastosowaniem przebiegów okresowych. Zgromadzona dotychczas wiedza wskazuje na pewne trudności w wyodrębnieniu sygnałów użytecznych z tła charakterystyki akustycznej maszyny, ze względu na znaczący udział składowych częstotliwości otoczenia oraz nieznaczące wartości amplitud harmonicznym diagnostycznych wywołanych danym typem uszkodzenia. Pomimo wskazanych trudności, pomiary zmiennej w czasie wartości ciśnienia akustycznego w diagnostyce technicznej należy uznać, za metodę zupełnie bezinwazyjną i wartą do rozpoznania w

dynamicznych stanach pracy silnika klatkowego z uszkodzonym wirnikiem.

## 2. Sygnały diagnostyczne

Kluczowymi składowymi widma akustycznego będącymi częstotliwościami odniesienia są odpowiednio, składowa obrotowa, pojedyncza i podwójna wielokrotność podstawowej częstotliwości źródła zasilania. Wyżej opisane harmoniczne oraz wybrane parametry konstrukcyjne badanego silnika klatkowego, wyznaczają częstotliwości pochodne biorące udział w procesie oceny stanu wirnika. Do najważniejszych sygnałów należy zaliczyć częstotliwości poślizgowe wirnika oraz częstotliwości biegunowo-rotacyjne, a także składowe będące kombinacją dwóch opisanych poprzednio częstotliwości. Wszystkie składowe widma związane z częstotliwością sieci, mają pochodzenie elektromagnetyczne i występują bez względu na stan wirnika oraz przyjętą tolerancję wykonania maszyny.

Tabela 1. Wybrane składowe sygnałów wibroakustycznych istotne w procesie diagnozowania stanu klatki wirnika

Sygnał	Uszkodzenie klatki wirnika
$f_r$ $= \frac{n}{60}$ (1)	Częstotliwość rotacji
$k2f_s \cdot s$ (2)	Częstotliwość poślizgowa
$1f_r \cdot p$ (3)	Częstotliwości biegunowo-rotacyjne
$2f_r \cdot p$ (4)	
$ 2f_s \pm 1f_r \cdot p $ (5)	Kombinacja częstotliwości sieciowej i biegunowo rotacyjnych
$ 2f_s \pm 2f_r \cdot p $ (6)	

gdzie:

$f_r$  - częstotliwość rotacji,  $f_s$  - częstotliwość sieciowa,  $p$  - liczba par biegunów,  $n$  - prędkość obrotowa,  $k = 1, 2 \dots$

## 3. Stanowisko pomiarowe

Obiektem badań laboratoryjnych był silnik typu Sg-112M-4 zasilany z sieci napięciem znamionowym. Przy tych warunkach zasilania składowe elektromagnetyczne osiągały maksymalne wartości amplitudy dla danej wartości momentu oporowego [1]. Silnik

pracował bez wentylatora, w celu minimalizacji składowych hałasu wentylacyjnego [1], [2], [3], [8]. W silniku tym istniała możliwość wymiany wirników przygotowanych na etapie produkcji z przerwą jednego pręta klatki, przerwą dwóch prętów i wirnika z ekscentrycznością dynamiczną i przerwany pręt. Moment oporowy regulowano z wykorzystaniem prądnicy obcowzbudnej stanowiącej obciążenie mechaniczne silnika i połączonej za pomocą elastycznego sprzęgła z badaną maszyną. Prąd wzbudzenia, co do wartości oraz przebiegu, kształtowano przez zmianę napięcia wymuszającego, na wyjściu przekształtnika energoelektronicznego [4]. Stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w mikrofon typu RG-50, kondycjoner sygnałów analogowych PA-3000, kartę pomiarową DAQ NI USB 6259 oraz momentomierz i obrotomierz impulsowy zabudowany w mierniku typu DATAFLEX. Wszystkie sygnały rejestrowano z częstotliwością próbkowania 20kS/s na kanał, przez okres 10s. Do analizy i zbierania pomiarów, zastosowano środowisko obliczeniowe Matlab. Mikrofon został umieszczony promieniowo nad centralną częścią korpusu do badanego silnika w odległości 0,6m, stanowiącą potrójną wartość wielokrotności średnicy maszyny.

Tabela 2. Najważniejsze parametry eksploatacyjne i konstrukcyjne silnika Sg-112M-4

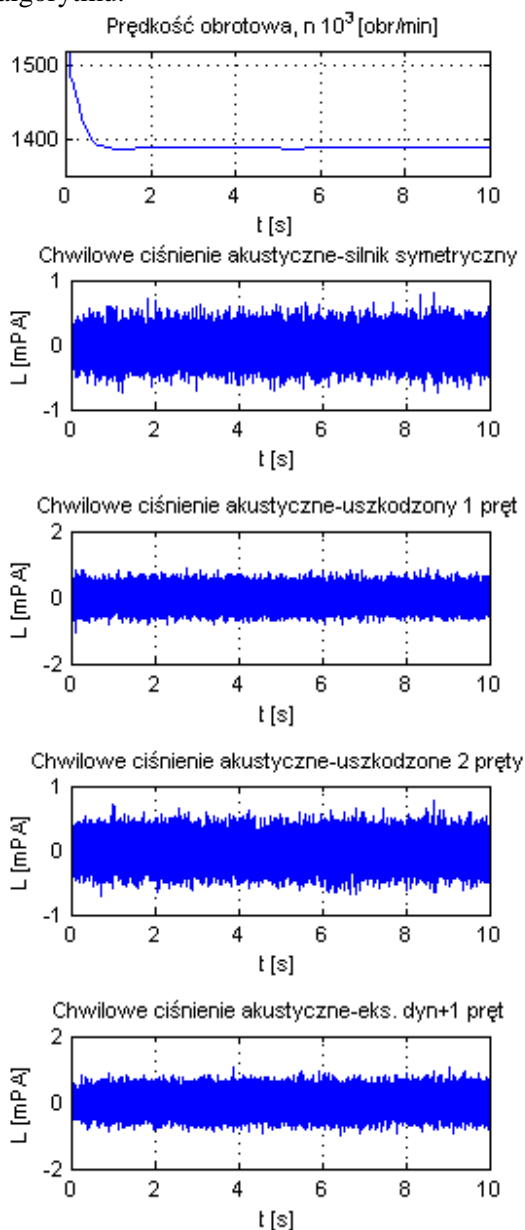
Cechy konstrukcyjne badanego silnika	
Parametr	Wartość
Moc znamionowa	4 kW
Napięcie zasilania	400V
Prąd znamionowy	8,6A
Prędkość znamionowa	1440obr/min
Liczba żłobków wirnika	28
Liczba żłobków stojana	36
Liczba par biegunów	2
Ciśnienie akustyczne	66dB

## 4. Algorytm obliczeń i wyniki pomiarów

Do poszukiwania zmian charakterystycznych częstotliwości, odpowiadających uszkodzeniu wirnika [12] w dziedzinie czasu, zastosowano zmodyfikowaną wersję algorytmu krótko-czasowego przekształcenia Fouriera [13], [15]. Modyfikacja polega na zastąpieniu prostego

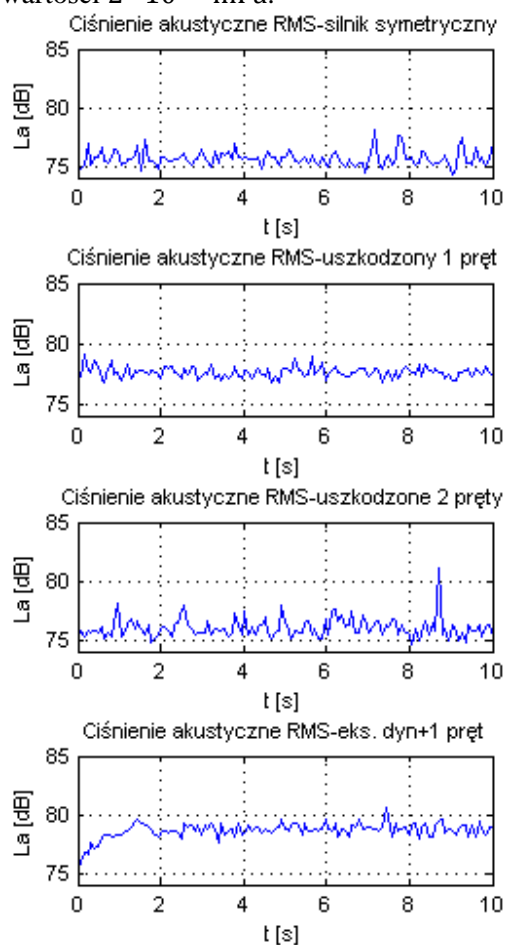
przekształcenia Fouriera, transformatą Fouriera funkcji korelacji, powszechnie nazywaną metodą Welcha [4], [15]. Zastosowanie metody Welcha, ma na celu zminimalizowanie wpływu zakłóceń zewnętrznych, poprzez uśrednienie – wygładzanie widma chwilowego.

Na poniższych przebiegach zaprezentowano wybrane przykłady pomierzonych wartości chwilowego ciśnienia akustycznego dla różnych przypadków uszkodzenia wirnika, a także wyniki obliczeń z zastosowaniem wskazanego algorytmu.



Rys. 1. Zarejestrowane przebiegi wartości chwilowej ciśnienia akustycznego i prędkości obrotowej - przypadek 1

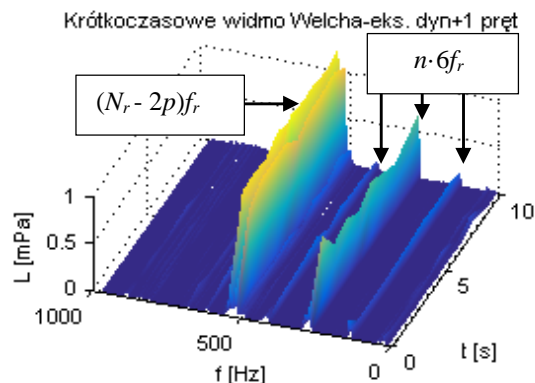
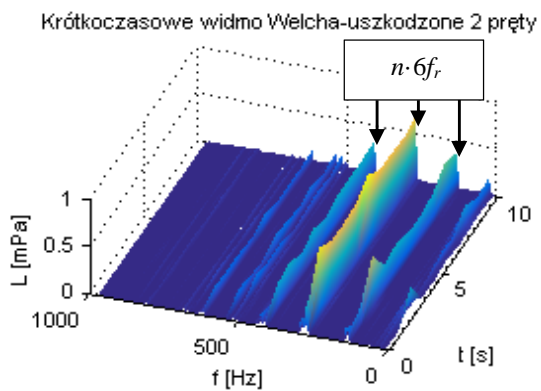
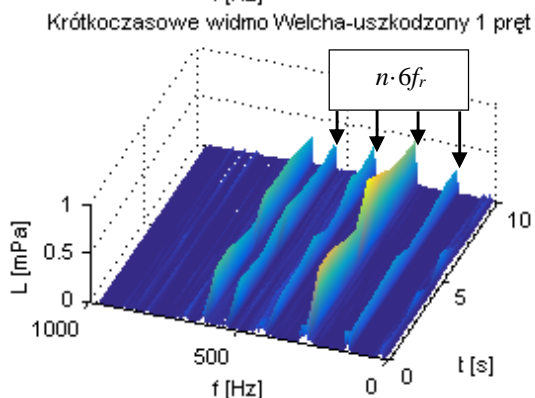
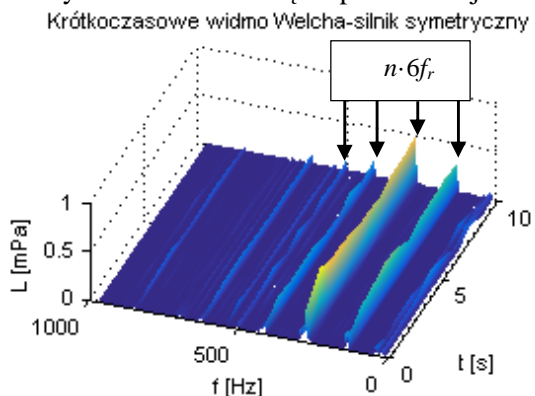
Pierwszym ważnym spostrzeżeniem z analizy przebiegów przedstawionych na rys. 1, jest ogólny wzrost poziomu ciśnienia akustycznego wraz ze wzrostem głębokości uszkodzenia klatki, choć same wartości nie przyjmują jednoznacznego trendu, mimo że rozpatrywany przebieg zmian prędkości obrotowej należy uznać za przypadek quasi-dynamiczny, a więc zbliżony do sytuacji rozpatrywania sygnału prawie stacjonarnego. Dla tego samego przypadku obliczono wartości skuteczne ciśnienia akustycznego na jeden okres składowej sieciowej, w skali decybelowej w odniesieniu do wartości  $2 \cdot 10^{-2}$  mPa.



Rys. 2. Obliczone wartości skuteczne ciśnienia akustycznego – przypadek 1

Najogólniej, można zauważyć pewne fluktuacje wartości skutecznej ciśnienia akustycznego nawet w przedziałach, gdzie prędkość obrotowa przyjmuje stałą wartość. Podobnie jak dla poprzedniego podpunktu, wartość skuteczna niesie informację o ogólnym wzroście ciśnienia akustycznego wraz z głębokością uszkodzenia wirnika, lecz nie pozwala na jednoznaczne

określenie typu uszkodzenia. Jedyną ważną cechą uzyskanych wyników, jest duża czułość metody na niesymetrię elektromagnetyczną w postaci ekscentryczności dynamicznej. Na podstawie powyższego, w dalszej części artykułu pominięto przedstawienie przebiegów wartości chwilowej oraz skutecznej ciśnienia akustycznego jako sygnałów niewnoszących istotnych wniosków z części pomiarowej.

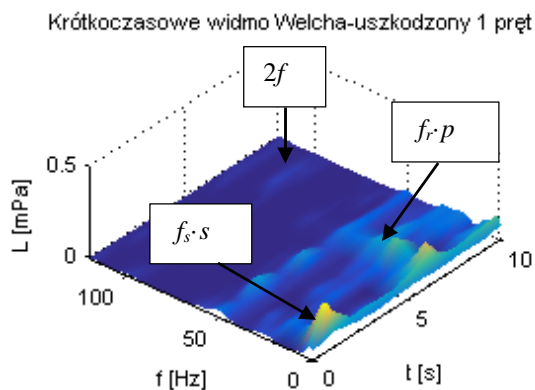
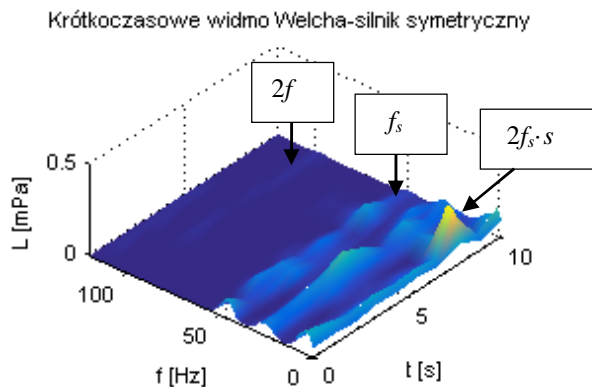


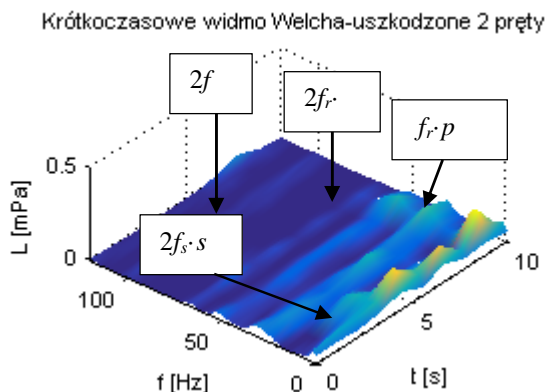
Rys. 3. Wyniki obliczeń, pasmo 0-1000Hz – przypadek 1, gdzie:  $N_r$ -liczba prętów klatki

Obserwacja pasma częstotliwości w zakresie 0Hz do 1000Hz, pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, iż składowymi dominującymi w spektrum, są wielokrotności harmonicznej rotacji. W tym przypadku opisane zależnością:

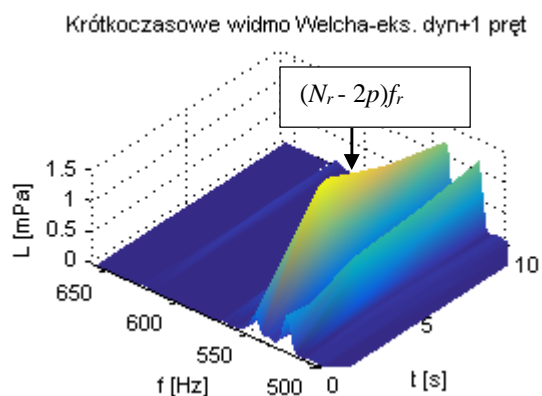
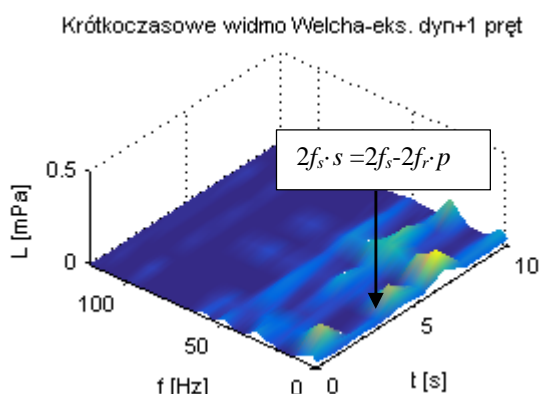
$$\cdot n \cdot 6f_r, \text{ dla } n \in \mathbb{N}^+ \quad (1)$$

Amplitudy wskazane w (1) oraz na rys. 3, ulegają zmianą wraz z prędkością obrotową, tzn. wraz ze spadkiem wartości częstotliwości zmiennej składowej rotacji, amplitudy ulegają wyraźnemu zmniejszeniu, w sytuacji przeciwnej obserwuje się wzrost wartości amplitud wymienionych powyżej składowych.





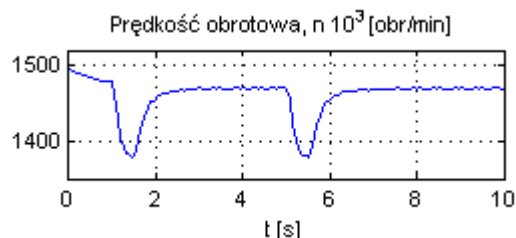
Rys. 4. Wyniki obliczeń, pasmo 0-100Hz – przypadek 1 – uszkodzenie klatki wirnika



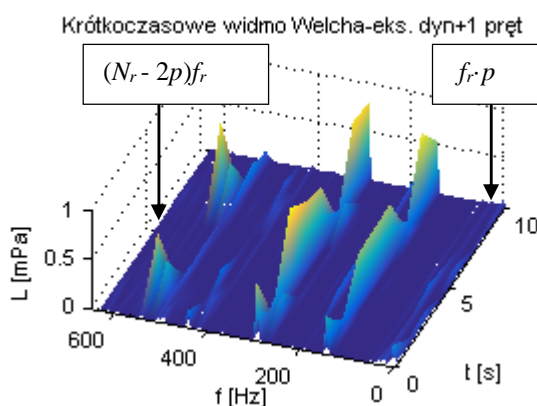
Rys. 5. Wyniki obliczeń, pasmo 0-100Hz, 500-650Hz – przypadek 1 – uszkodzenie klatki wirnika oraz ekscentryczność dynamiczna

Charakterystyczną cechą wyników analiz dla przypadku 1, jest wykrycie harmonicznych wskazujących na uszkodzenie klatki, nie mniej jednak na tle składowych rotacji (1) przyjmują małe wartości amplitud. Wyróżnikiem spośród uzyskanych wyników, jest uszkodzenie wirnika w postaci zerwania pojedynczego pręta oraz ekscentryczności dynamicznej, gdzie w paśmie żłbkowym obserwuje się dominujący charakter obocznej podstawowej częstotliwości żłbkowej [14]. Dalsze

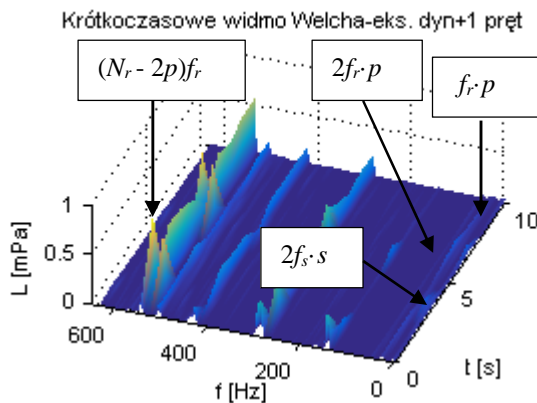
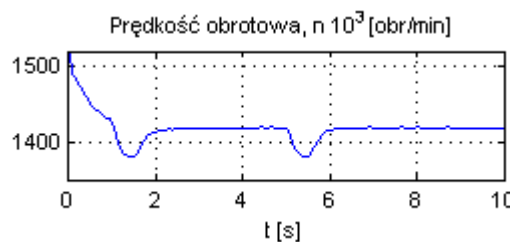
przykłady uzyskanych wyników, potwierdzają wysoką czułość zastosowania sygnałów wibroakustycznych, szczególnie w obserwacji ekscentryczności dynamicznej.

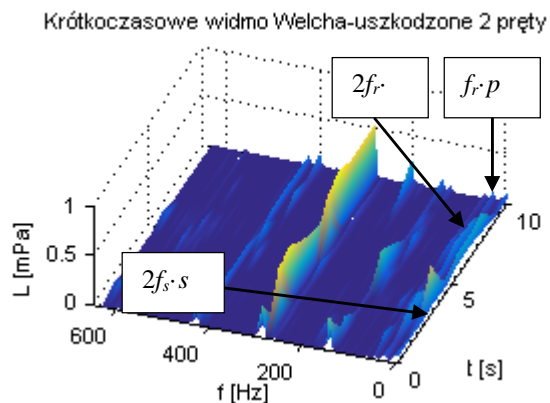


Rys. 6. Zarejestrowany przebieg prędkości obrotowej, przypadek 2

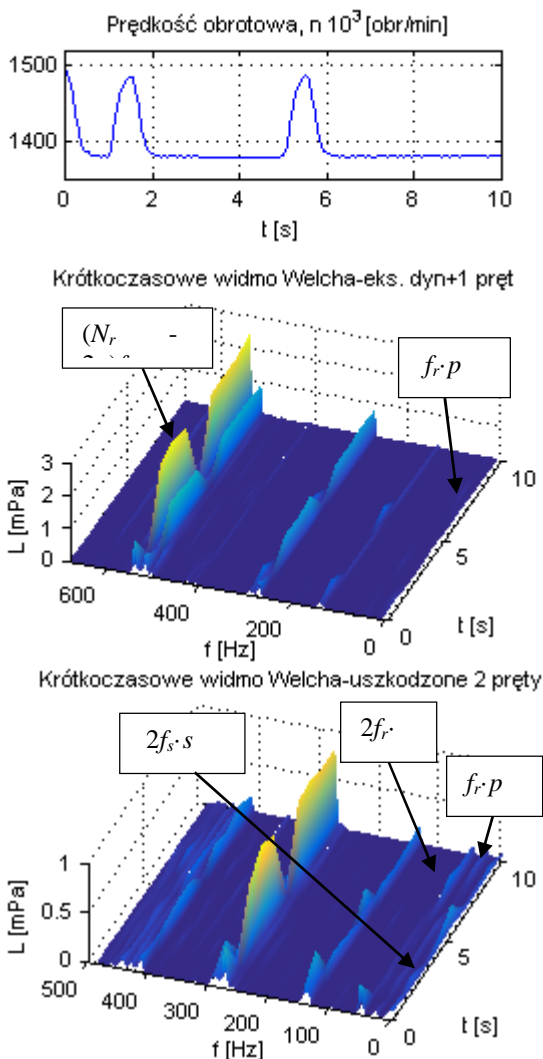


Rys. 7. Wyniki obliczeń, pasmo 0-600Hz, przypadek 2 – uszkodzenie klatki wirnika oraz ekscentryczność dynamiczna



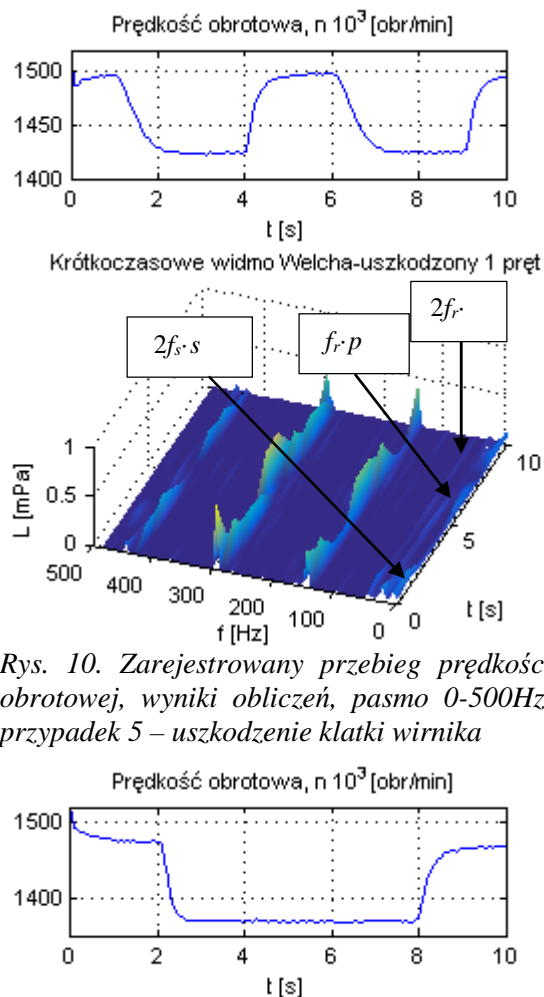


Rys. 8. Zarejestrowany przebieg prędkości obrotowej, wyniki obliczeń, pasmo 0-600Hz, przypadek 3 – uszkodzenie klatki wirnika oraz ekscentryczność dynamiczna



Rys. 9. Zarejestrowany przebieg prędkości obrotowej, wyniki obliczeń, pasmo 0-650Hz, przypadek 4 – uszkodzenie klatki wirnika oraz ekscentryczność dynamiczna

Pomimo dużej czułości sygnałów akustycznych na przebiegi wielkości elektromagnetycznych, wskazane wyniki obliczeń pozwalają jedynie na prowadzenie analizy porównawczej w określonych pasmach występowania sygnałów diagnostycznych. Powodem powyższego stanu rzeczy jest trudność w określeniu wskaźnika uszkodzenia maszyny ze względu na zmienność częstotliwości harmonicznych w zależności od prędkości obrotowej, które mogły jednocześnie stanowić wartość odniesienia. Jediną nie zależną składową od harmonicznej rotacji, jest podwójna częstotliwość sieciowa. Nie mniej jednak jej amplituda może zależeć od stanu izolacji zwojowej, co w konsekwencji będzie prowadzić do nieregularnych zmian wskaźnika bez względu na typ uszkodzenia.



Rys. 10. Zarejestrowany przebieg prędkości obrotowej, wyniki obliczeń, pasmo 0-500Hz, przypadek 5 – uszkodzenie klatki wirnika

Rys. 11. Zarejestrowany przebieg prędkości obrotowej, wyniki obliczeń, pasmo 0-500Hz, przypadek 6 – uszkodzenie klatki wirnika

## 5. Wnioski końcowe

Główną cechą wynikowych widm chwilowych dla silnika w pełni symetrycznego jak również, z uszkodzonym wirnikiem o różnym stopniu defektu, jest występowanie harmonicznych pochodzenia elektromagnetycznego związanych z budową i warunkami pracy wybranej maszyny, bez względu na aktualny stan klatki wirnika. Wymienione obserwacje są potwierdzeniem założeń teoretycznych oraz prowadzonych do tej chwili, badań z zakresu wykorzystania wibroakustyki do diagnozowania silników indukcyjnych klatkowych. Amplitudy wskazanych składowych w ścisły sposób zależą od głębokości oraz rodzaju uszkodzenia i momentu mechanicznego - mocy przekazywanej z obwodu stojana do wirnika, a więc energii magnetycznej zgromadzonej w szczeliny powietrznej. O ile amplitudy składowych poślizgowych wzrastają wraz ze wzrostem liczby uszkodzonych prętów, to warto zwrócić szczególną uwagę na składowe występujące w strefie żłobkowej badanego silnika z ekscentrycznością dynamiczną oraz pękniętym prętem klatki. W tym przypadku amplitudy składowych występujących w strefie żłobkowej [14], przyjmują zawsze maksimum lokalne z określonego przedziału tła spektrum. Można więc stwierdzić, że największą czułość w wykrywaniu niesymetrii wirnika za pomocą sygnału akustycznego, uzyskuje się dla dynamicznego, nierównomiernego rozkładu pola w szczeliny powietrznej. Przedstawiona metoda wyodrębnienia sygnałów o charakterze diagnostycznym posiada szereg wad w postaci znacznego uśrednienia widma chwilowego co stanowi pewien kompromis między redukcją zakłóceń otoczenia a składowymi emitowanymi przez badany silnik. Do prawidłowego działania proponowanego algorytmu, niezbędny jest pomiar prędkości obrotowej pozwalający na określenie zakresów pasm występowania poszukiwanych częstotliwości. Podsumowując, dokładne określenie w czasie zmian wybranych harmonicznych dla prędkości obrotowych nieznacznie różniących się od prędkości synchronicznej jest praktycznie nie możliwe. Prócz tego, proponowany sposób oceny stanu technicznego wirnika, został sprawdzony w warunkach laboratoryjnych dla pojedynczej maszyny indukcyjnej.

## 6. Literatura

- [1]. Biernat A.: *Laboratorium pomiarów maszyn elektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2006
- [2]. Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN 1989
- [3]. Dąbrowski M.: *Konstrukcja maszyn elektrycznych*. WNT Warszawa 1977
- [4]. Łępa P.: *Monitorowanie i sterowanie pracą silnika indukcyjnego w dynamicznych stanach pracy*. Praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, 2013
- [5]. Osowski S., Cichocki A., Siwek K.: *Matlab w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2006
- [6]. Pawlak M.: *Zastosowanie analizy sygnałów akustycznych do wykrywania uszkodzeń wirników i łożysk w silnikach indukcyjnych*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 92, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 199-204
- [7]. Pawlak M., Kupczyński K.: *Akustyczny detektor uszkodzeń silnika indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 64, 2010
- [8]. *Poradnik Inżyniera Elektryka. Tom II*, WNT 1975
- [9]. Przyborowski W., Kamiński G.: *Maszyny elektryczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2014
- [10]. Rad M.: *Diagnostyka wirnika maszyn indukcyjnych z wykorzystaniem analizy falkowej i układów uczących się*. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie 2009
- [11]. Skwarczyński J., Tertel Z.: *Maszyny Elektryczne*. Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie 1989
- [12]. Swędrowski L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013
- [13]. Tumański S.: *Technika Pomiarowa*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2007
- [14]. Weinreb K., Sułowicz M.: *Skuteczne wykrywanie ekscentryczności dynamicznej w silniku asynchronicznym*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 83, 2009, wyd. BOBRME Komel, s. 207-212
- [15]. Zieliński T.J.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2007

## Autorzy

Mgr inż. Jarosław Tulicki, tulicki\_jar@wp.eu  
 Dr inż. Maciej Sułowicz, msulowicz@pk.edu.pl  
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii,  
 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24