

POLITECHNIKA GDAŃSKA

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI**



**KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW
INFORMACYJNYCH**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Ariel Dzwonkowski

***METODA DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK NA PODSTAWIE
ANALIZY PRZEBIEGÓW PRĄDU I NAPIĘCIA
ZASILAJĄCEGO SILNIK INDUKCYJNY***

**Promotor:
dr hab. inż. Leon Swędrowski, prof. PG**

Gdańsk, wrzesień 2011

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	6
STRESZCZENIE.....	10
1. WPROWADZENIE.....	13
2. CEL, ZAKRES I TEZY PRACY.....	15
2.1. Cel pracy.....	15
2.2. Zakres pracy.....	15
2.3. Tezy pracy.....	16
3. PRZEGLĄD METOD DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK W SILNIKACH INDUKCYJNYCH.....	17
3.1. Podstawowe informacje dotyczące diagnostyki łożysk.....	17
3.2. Budowa łożysk.....	18
3.3. Uszkodzenia łożysk.....	21
3.4. Wybrane metody diagnostyki łożysk.....	25
3.4.1. Metody wibroakustyczne diagnostyki łożysk.....	26
3.4.1.1. Pomiar emitowanych drgań.....	26
3.4.1.2. Pomiar impulsów udarowych.....	26
3.4.1.3. Pomiar emitowanego hałasu.....	29
3.4.1.4. Metoda obwiedni wysokoczęstotliwościowych.....	29
3.4.2. Metody prądowe diagnostyki łożysk.....	31
3.4.2.1. Metoda analizy widma prądu stojana w stanie pracy ustalonej.....	33
3.4.2.2. Statystyczna metoda adaptacyjna czasowo – częstotliwościowa.....	35
3.4.2.3. Metoda detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem wektora Parka.....	36
3.5. Podsumowanie.....	39
4. NOWA METODA DIAGNOSTYKI ŁOŻYSK SILNIKÓW INDUKCYJNYCH.....	42
4.1. Proponowana metoda.....	42
4.2. Podstawy matematyczne proponowanej metody diagnostyki łożysk.....	44
4.3. Podsumowanie.....	50
5. BADANIA SYMULACYJNE.....	51

5.1. Wprowadzenie.....	51
5.2. Obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego.....	55
5.3. Wyniki badań modelu matematycznego silnika indukcyjnego.....	62
5.3.1. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego.....	62
5.3.2. Widmo mocy chwilowej dla silnika uszkodzonego.....	63
5.3.2.1. Silnik z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska.....	64
5.3.2.2. Silnik z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska.....	66
5.3.2.3. Silnik z uszkodzeniem elementu tocznego łożyska.....	69
5.4. Podsumowanie.....	72
6. BADANIA EKSPERYMENTALNE USZKODZEŃ ŁOŻYSK Z WYKORZYSTANIEM NOWEJ METODY DIAGNOSTYCZNEJ.....	74
6.1. Sposób przeprowadzania badań nową metodą.....	74
6.2. Stanowisko badawcze.....	76
6.2.1. Część sprzętowa stanowiska badawczego.....	76
6.2.2. Część programowa stanowiska badawczego.....	82
6.3. Pomiary testowe.....	89
6.3.1. Pomiary wykonane wibrometrem laserowym.....	90
6.3.2. Pomiary wykonane systemem DREAM.....	92
6.3.3. Pomiary wykonane kamerą termowizyjną.....	93
6.3.4. Podsumowanie.....	94
6.4. Badania silników indukcyjnych z symulowanymi uszkodzeniami łożysk w oparciu o analizę sygnałów elektrycznych.....	95
6.4.1. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego.....	95
6.4.2. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem łożyska symulowanym przez drgania wzбудnika o częstotliwości $f_h = 40$ Hz.....	96
6.4.3. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem łożyska symulowanym przez drgania wzbudnika o częstotliwości $f_h = 27,3$ Hz.....	97
6.4.4. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem łożyska symulowanym przez drgania wzbudnika o częstotliwości $f_h = 30$ Hz.....	99
6.4.5. Podsumowanie.....	100

6.5. Badania silników indukcyjnych z rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk w oparciu o analizę mocy chwilowej.....	101
6.5.1. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego.....	102
6.5.2. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia zewnętrznego łożyska.....	103
6.5.3. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego łożyska.....	108
6.6. Podsumowanie.....	113
7. ANALIZA METROLOGICZNA UKŁADU POMIAROWEGO.....	117
7.1. Wstęp.....	117
7.2. Niepewność pomiaru mocy chwilowej w układzie z przetwornikiem napięcia i przetwornikiem prąd-napięcie.....	118
7.2.1. Niepewność pomiaru napięcia – $u(u)$	119
7.2.1.1. Wariancja estymacji przetwornika napięciowego – $u^2(k_u)$	120
7.2.1.2. Wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych – $u^2(u_{wy})$	122
7.2.1.3. Wariancja złożona estymaty napięcia.....	124
7.2.2. Niepewność pomiaru prądu.....	125
7.2.2.1. Wariancja estymacji przekładni przetwornika prąd-napięcie – $u^2(k_i)$	126
7.2.2.2. Wariancja złożona estymaty prądu – $u^2(i)$	128
7.2.3. Niepewność pomiaru mocy chwilowej – $u(p)$	129
7.3. Niepewność pomiaru mocy chwilowej w układzie z bocznikiem i dzielnikiem napięcia.....	131
7.3.1. Niepewność pomiaru napięcia.....	132
7.3.1.1. Wariancja estymacji przekładni dzielnika napięciowego – $u^2(k_D)$	133
7.3.1.2. Wariancja złożona estymaty napięcia – $u^2(u)$	134
7.3.2. Niepewność pomiaru prądu.....	135
7.3.2.1. Wariancja estymacji przełożenia prądu na napięcie dla bocznika – $u^2(R_b)$	136
7.3.2.2. Wariancja złożona estymaty prądu – $u^2(i)$	137
7.3.3. Niepewność pomiaru mocy chwilowej – $u(p)$	138
7.4. Podsumowanie	138

8. PODSUMOWANIE, WNIOSKI KOŃCOWE ORAZ NAJWAŻNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA.....	140
8.1. Podsumowanie	140
8.2. Wnioski końcowe.....	143
8.3. Ważniejsze osiągnięcia autora.....	144
8.4. Kierunki dalszych badań.....	144
LITERATURA.....	146
ZAŁĄCZNIK 1.....	152
ZAŁĄCZNIK 2.....	156
ZAŁĄCZNIK 3.....	158

Wykaz ważniejszych oznaczeń

\bar{u}_{wy}	–	wartość średnia napięcia wyjściowego
\bar{u}	–	wartość średnia napięcia wejściowego
\bar{i}	–	wartość średnia prądu
θ	–	kąt naporu
α, β	–	kąty przesunięcia fazowego między prądem i napięciem
ΔR_1	–	błąd graniczny rezystora R_1 , podany przez producenta w specyfikacji
ΔR_2	–	błąd graniczny rezystora R_2 , podany przez producenta w specyfikacji
Δu_k	–	poprawka wskazania wzorca
Δu_Q	–	poprawka wskazania karty pomiarowej
\hat{a}	–	wartość szczytowa amplitudy przyspieszenia drgań
\tilde{a}	–	wartość skuteczna amplitudy przyspieszenia drgań
B_d	–	średnica kulki lub rolki
C	–	współczynnik udaru
c	–	współczynnik wrażliwości
d	–	średnica łożyska
D	–	dokładność łożyska
E	–	estymator wartości oczekiwanej
f	–	częstotliwość napięcia zasilającego
f_c	–	częstotliwość koszyka
f_e	–	częstotliwość dodatkowej składowej harmonicznej prądu stojana
f_g	–	częstotliwość harmonicznej prądu stojana
f_H	–	częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia elementów łożyska
f_{in}	–	częstotliwość przetaczania elementów tocznych po wewnętrznym pierścieniu
f_n	–	częstotliwość próbkowania
f_{out}	–	częstotliwość przetaczania elementów tocznych po zewnętrznym pierścieniu
f_r	–	częstotliwość obrotowa wału
f_{rol}	–	częstotliwość kulek

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

f_s	–	częstotliwość żłobkowa
f_{sy}	–	częstotliwość synchroniczna
g	–	przypieszenie ziemskie
H	–	współczynnik udziału składowej o częstotliwości ω_H w przebiegu prądu
h	–	indeks podstawowej strefy żłobkowej
H	–	poziom hałasu generowanego przez łożysko
I	–	wartość skuteczna prądu
\mathbf{I}	–	wektor prądów stojana
i	–	prąd wejściowy
$i(t)$	–	wartość chwilowa prądu
$i_H(t)$	–	wartość chwilowa prądu z uwzględnieniem składowej modulującej
I_m	–	amplituda prądu
J	–	moment bezwładności wirnika silnika
K	–	współczynnik kurtozy
k	–	współczynnik rozszerzenia
k_D	–	przekładnia dzielnika napięciowego
k_i	–	przekładnia przetwornika prąd-napięcie
k_u	–	przekładnia przetwornika napięciowego
\mathbf{L}	–	macierz indukcyjności własnych
l_t	–	długość elementu tocznego
N	–	liczba próbek sygnału
n	–	prędkość obrotowa
N_b	–	liczba kulek lub rolek
NR	–	liczba żłobków wirnika
NS	–	liczba żłobków stojana
p	–	liczba par biegunów
$p(t)$	–	wartość mocy chwilowej
P_d	–	średnica podziałowa łożyska
$p_H(t)$	–	chwilowa moc czynna, zmodulowana przez sygnał o częstotliwości ω_H
Q	–	jakość łożyska
R	–	opory ruchu łożyska

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

R	–	macierz rezystancji własnych i wzajemnych
R_1	–	rezystancja pierwszego rezystora dzielnika napięciowego równa 20 k Ω
R_2	–	rezystancja drugiego rezystora dzielnika napięciowego równa 10 M Ω
R_b	–	rezystancja bocznika równa 0,1 Ω
s	–	poślizg wirnika silnika indukcyjnego
t	–	czas
T	–	trwałość łożyska
T_{em}	–	moment elektromagnetyczny generowany przez silnik
T_{ex}	–	moment zewnętrzny przenoszony przez sprzęgło
U	–	wartość skuteczna napięcia
u	–	napięcie wejściowe
U	–	wartość skuteczna napięcia
$u(i)$	–	niepewność pomiaru prądu
$u(p)$	–	niepewność pomiaru mocy chwilowej
$u(t)$	–	wartość chwilowa napięcia
$u(u)$	–	niepewność pomiaru napięcia
u^2	–	wariancja
$u^2(i)$	–	wariancja pomiaru prądu
$u^2(k_D)$	–	wariancja estymacji przekładni dzielnika napięciowego
$u^2(k_{DB})$	–	wariancja estymacji typu B przekładni dzielnika napięciowego
$u^2(k_u)$	–	wariancja estymacji przekładni przekładnika napięciowego
$u^2(R_b)$	–	wariancja estymacji przełożenia prądu na napięcie dla bocznika
$u^2(u)$	–	wariancja pomiaru napięcia
$u^2(u_{wy})$	–	wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych
U_i	–	niepewność rozszerzona pomiaru prądu
u_k	–	napięcie podane ze wzorca
u_{ki}	–	niepewność wartości prądu wyjściowego kalibratora
U_m	–	amplituda napięcia
u_m	–	niepewność wynikająca z błędu granicznego multimetru
u_{mb}	–	niepewność wynikająca z błędu granicznego multimetru
u_{mD}	–	niepewność wynikająca z błędu granicznego multimetru

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

U_p	–	niepewność rozszerzona pomiaru mocy chwilowej
u_Q	–	wskazanie karty pomiarowej
u_r	–	niepewność pomiaru wynikająca z rozrzutu wyników mierzonych
u_{rb}	–	niepewność pomiaru wynikająca z rozrzutu wyników mierzonych
u_{rD}	–	niepewność pomiaru wynikająca z rozrzutu wyników mierzonych
U_u	–	niepewność rozszerzona pomiaru napięcia
u_{we}	–	napięcie na wejściu przetwornika napięciowego
u_{wy}	–	napięcie wyjściowe
V	–	poziom drgań generowanych przez łożysko
\mathbf{V}	–	wektor napięć
v_n	–	prędkość uderzeń łożyska pracującego poprawnie
x	–	zmienna losowa
A	–	permeancja szczeliny powietrznej
σ	–	odchylenie standardowe
$\boldsymbol{\psi}$	–	wektor strumieni sprzężonych
ω	–	pulsacja napięcia
ω_H	–	pulsacja składowej modulującej przebieg prądu

Definicje

<i>Moc chwilowa</i>	–	iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego
<i>Częstotliwości charakterystyczne</i>	–	częstotliwości drgań mechanicznych, wywołane przez uszkodzone łożyska, które zależą od konstrukcji łożyska oraz prędkości obrotowej i wskazują na uszkodzenia poszczególnych elementów łożyska
<i>Częstotliwości uszkodzeniowe</i>	–	częstotliwości charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń łożyska

Streszczenie

Rozprawa dotyczy pomiarów diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych. Tematyka ta jest stale rozwijana ze względu na fakt, iż według danych statystycznych łożyska są najczęstszą przyczyną awarii silników indukcyjnych.

W pracy, na podstawie literatury, dokonano krytycznej analizy wybranych metod diagnostyki łożysk silników indukcyjnych, opartych na pomiarach i analizie różnych wielkości fizycznych.

Dalej autor pracy zaproponował wykorzystanie do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych metodę opartą na pomiarach i analizie iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego maszyny. Przeprowadzono rozważania matematyczne, potwierdzające możliwość wykorzystania zaproponowanej metody do diagnostyki łożysk. W pracy przedstawiono również wyniki badań modelu matematycznego silnika indukcyjnego, związane z wykorzystaniem nowej metody analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych.

W ramach realizacji pracy opracowano system pomiarowy, przeznaczony do badań silników indukcyjnych z symulowanymi oraz rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk. Integralną częścią tego systemu jest opracowana przez autora niniejszej rozprawy specjalistyczna aplikacja „Analiza – Łożyska” umożliwiająca diagnozowanie uszkodzeń łożysk zgodnie z proponowaną metodą.

W pracy zaprezentowano również wyniki przeprowadzonych na stanowisku badawczym pomiarów wykonanych na silnikach indukcyjnych z symulowanymi oraz rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk.

Rozdział pierwszy wprowadza w tematykę rozprawy z podkreśleniem znaczenia pomiarów diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych.

Rozdział drugi zawiera cel, tezy oraz zakres niniejszej rozprawy doktorskiej.

Podstawowe zagadnienia związane z budową i kryteriami jakości łożysk przedstawiono w rozdziale trzecim rozprawy. W rozdziale tym zaprezentowano także podstawowe przyczyny uszkodzeń łożysk oraz dokonano przeglądu znanych z literatury i stosowanych metod diagnostyki łożysk silników indukcyjnych. Przedstawiono główne

metody wibracyjne oraz prądowe ze względu na fakt, iż metody te są najczęściej wykorzystywane do monitorowania stanu technicznego łożysk.

W rozdziale czwartym pracy szczegółowo opisano proponowaną metodę diagnostyki łożysk opartą na analizie przebiegów prądu i napięcia zasilającego silniki indukcyjne. Omówiono podstawy matematyczne tej metody diagnostyki łożysk silników indukcyjnych, podając wyniki obliczeń teoretycznych iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia wraz ze wskazaniem składowych widma, możliwych do wykorzystania w diagnostyce łożysk. Przedstawiono również zalety nowej metody w porównaniu z obecnie stosowanymi metodami prądowej diagnostyki łożysk silników indukcyjnych.

W rozdziale piątym przedstawiono opis matematyczny i badania symulacyjne obiektu – silnika indukcyjnego. Zaprezentowano wyniki przeprowadzonych przez autora pracy badań uproszczonego modelu matematycznego jednej fazy silnika indukcyjnego opracowanego w programie PSpice. W rozdziale tym przedstawiono również obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego, wykorzystany do dalszych badań symulacyjnych. Zaprezentowano wyniki badań tego modelu matematycznego dla różnych typów uszkodzeń łożysk silników indukcyjnych przy różnych wartościach momentu obciążenia maszyn oraz dokonano ich analizy, ze wskazaniem składowych możliwych do wykorzystania w diagnostyce łożysk.

W rozdziale szóstym opisane zostało stanowisko badawcze, wraz z opracowanym przez autora niniejszej rozprawy systemem pomiarowym, wykorzystane do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych opartej na analizie mocy chwilowej, pobieranej przez silnik indukcyjny.

W rozdziale tym przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych, wykonanych na stanowisku badawczym, z wykorzystaniem wibrometru laserowego, systemu diagnostyki wibracyjnej DREAM oraz kamery termowizyjnej. Zamieszczono także wyniki badań silników indukcyjnych z symulowanymi oraz rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk. Uzyskane wyniki poddano szczegółowej analizie.

W rozdziale siódmym przeprowadzono analizę metrologiczną wykorzystanego do badań układu pomiarowego. Zaprezentowano wyniki obliczeń niepewności

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

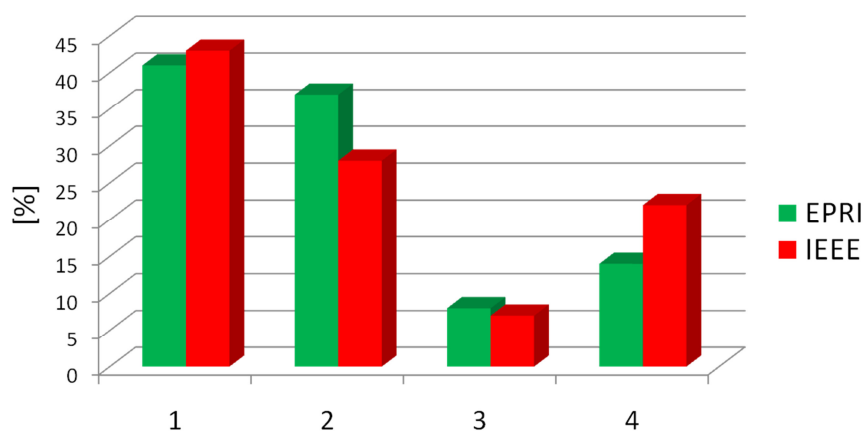
pomiarowych dla dwóch układów pomiarowych: z przetwornikami napięcie-napięcie i prąd-napięcie oraz dla układu z bocznikiem i dzielnikiem napięcia.

Końcowa część rozprawy zawiera podsumowanie, wnioski końcowe oraz propozycje kierunków dalszych badań.

1. Wprowadzenie

Silnik indukcyjny jest najczęściej spotykaną maszyną w przemyśle – szacuje się, że około 65% energii elektrycznej wytwarzanej na świecie, zużywanej jest przez ten rodzaj maszyn. Bezawaryjne funkcjonowanie urządzeń, ich właściwa diagnostyka oraz obsługa stały się bardzo ważnym elementem współczesnego przemysłu oraz zagadnieniem ekonomicznym, opłacalnym do przeanalizowania. Koszty maszyn oraz przestoju produkcji wynikające z ich uszkodzeń liczone są niekiedy w milionach euro. W porównaniu z nakładami poniesionymi na rzecz diagnostyki, dzięki której możliwe jest dużo wcześniejsze zaplanowanie remontu maszyny i niedopuszczenie do jej awarii, są to znaczące kwoty. Dlatego diagnostyka techniczna urządzeń, jest obecnie tak rozpowszechniona i widoczna praktycznie w każdej gałęzi przemysłu.

Według licznych źródeł, głównym źródłem awarii obiektów ruchomych są uszkodzenia ich łożysk (rysunek 1.1).



Rys.1.1. Przyczyny awarii silników indukcyjnych: 1 – uszkodzenia łożysk, 2 – uszkodzenia stojana, 3 – uszkodzenia wirnika, 4 – pozostałe uszkodzenia

Daje to podstawę do stwierdzenia, że to właśnie ich monitorowanie jest kluczowym elementem nadzorowania obiektów, w szczególności silników. W tym celu mierzone i wykorzystywane są różne wielkości fizyczne maszyny, takie jak temperatura, wibracja, zjawiska akustyczne, strumień magnetyczny czy prąd stojana. Z mierzonymi wielkościami fizycznymi powiązane są konkretne metody diagnostyczne.

Diagnostyka maszyn i urządzeń zajmuje się określeniem aktualnego stanu technicznego urządzeń w celu podwyższenia ich trwałości, niezawodności

i efektywności działania. Ze względu na fakt, że największy procent awarii silników elektrycznych jest spowodowany uszkodzeniem łożysk, ten dział diagnostyki rozwija się szczególnie dynamicznie.

Rozwój techniki i postęp umożliwiają tworzenie coraz bardziej skomplikowanych procesów produkcyjnych. Wytwarzane w czasie takich procesów produkty mają charakteryzować się niskim nakładem pracy, surowców, oraz minimalnymi kosztami. Takie założenia mogą być spełnione przy maksymalnej trwałości, niezawodności i wydajności linii produkcyjnej. Utrzymanie maszyn stanowi znaczny procent kosztów wielu zakładów. Procesy zużycia i starzenia się maszyn przebiegają w sposób ciągły. Zdarzające się uszkodzenia nie zawsze są wynikiem nagłych awarii. Koszty zaplanowanych remontów są przeważnie znacznie niższe od strat produkcyjnych poniesionych z tytułu nagłego zatrzymania produkcji.

Diagnostyka maszyn elektrycznych pozwala na ocenę stanu technicznego urządzenia bez konieczności jego demontażu poprzez analizę generowanych przez nie sygnałów diagnostycznych i porównanie tych sygnałów z nominalnymi. Zastosowanie nowoczesnych, nieniszczących i tanich metod diagnostyki wspomaganych techniką komputerową umożliwia zmniejszenie kosztów produkcji i zwiększenie niezawodności eksploatacyjnej maszyn elektrycznych.

2. CEL, ZAKRES I TEZY PRACY

2.1. Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie, analiza teoretyczna oraz weryfikacja doświadczalna nowej metody do diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych, opartej na analizie przebiegów prądu i napięcia zasilającego maszynę. Rozwiązanie problemu wymaga opracowania, wykonania i przeprowadzenia badań symulacyjnych i doświadczalnych silników indukcyjnych z różnymi typami uszkodzeń łożysk.

Celem rozprawy jest również opracowanie algorytmu do wnioskowania diagnostycznego, który pozwoli na podniesienie trafności określania stanu technicznego łożysk proponowaną metodą. Rozwiązanie problemu wymaga wykonania wspomaganego komputerowo stanowiska diagnostycznego, przeznaczonego do pomiarów wielkości zasilających badane maszyny, a w szczególności do analizy sygnałów diagnostycznych oraz przeprowadzenie analizy metrologicznej zaproponowanego układu pomiarowego.

2.2. Zakres pracy

Zakres prezentowanej pracy obejmuje m.in. realizację następujących zadań:

1. Przeprowadzenie studium literaturowego, mające na celu ocenę skuteczności znanych metod diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych,
2. Wykonanie wstępnych badań symulacyjnych,
3. Wykonanie szczegółowych badań symulacyjnych obwodowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego,
4. Przygotowanie obiektów do badań,
5. Weryfikacja przygotowanych obiektów metodą wibracyjną,
6. Zaproponowanie nowej metody diagnostyki łożysk silników indukcyjnych,
7. Przeprowadzenie analizy metrologicznej zaproponowanego układu,
8. Opracowanie komputerowego systemu do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych opartego na nowej metodzie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik,
9. Przeprowadzenie badań diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych opartych na zaproponowanej metodzie.

2.3. Tezy pracy

Teza główna pracy

W silniku indukcyjnym mogą wystąpić uszkodzenia elementów układu elektromagnetycznego lub uszkodzenia elementów mechanicznych. Z danych statystycznych wynika, iż najczęściej awariom w maszynach indukcyjnych ulegają łożyska. Urządzenia do diagnostyki łożysk przeważnie wykorzystują metody wibracyjne. Przy braku bezpośredniego dostępu do silnika nie mogą być jednak stosowane. W takich przypadkach diagnostyka możliwa jest w oparciu o pomiar i analizę wielkości zasilających silnik. Stosowane dotychczas metody diagnostyczne, oparte na analizie widma prądu zasilającego nie zapewniają wysokiego prawdopodobieństwa trafności diagnoz. Dlatego też celowe jest opracowanie nowej metody diagnostycznej do wykrywania uszkodzeń łożysk w silnikach indukcyjnych na podstawie pomiaru i analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego maszynę a także opracowania wspomaganego komputerowo stanowiska wraz z systemem do wnioskowania diagnostycznego. Działania te umożliwią poprawę trafności oceny stanu technicznego łożysk, zmniejszając tym samym liczbę awarii maszyn, co związane jest ze zmniejszeniem zagrożenia dla życia ludzkiego, środowiska naturalnego oraz ze wzrostem ekonomicznej efektywności eksploatowanych maszyn.

Tezy szczegółowe pracy

1. Diagnostyka silników indukcyjnych oparta na analizie iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego maszynę umożliwi poprawne wykrywanie i rozróżnianie uszkodzeń łożysk.
2. Opracowana metoda będzie posiadała nowe właściwości, niespotykane w dotychczas znanych metodach.

3. Przegląd metod diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych

W rozdziale tym zostały przedstawione wyniki studiów literaturowych przeprowadzonych przez autora rozprawy. Omówiono podstawowe zagadnienia związane z budową łożysk oraz kryteriami ich jakości, następnie przedstawiono podstawowe przyczyny uszkodzeń łożysk. Dokonano również przeglądu znanych z literatury i stosowanych metod diagnostyki łożysk silników indukcyjnych. Przedstawiono główne metody wibracyjne oraz prądowe ze względu na fakt, iż metody te są najczęściej wykorzystywane do monitorowania stanu technicznego łożysk.

3.1. Podstawowe informacje dotyczące diagnostyki łożysk

Systemy nadzoru diagnostycznego łożysk wykorzystują sygnały generowane w węzłach łożyskowych nadzorowanych maszyn. Z punktu widzenia diagnostyki łożysk ważne jest jak najczęstsze kontrolowanie zmian stanu dynamicznego maszyn w węzłach łożyskowych, w celu określenia typu uszkodzenia oraz stopnia jego zaawansowania. Podejście takie pozwala zapobiec skutkom niespodziewanych awarii maszyn i wcześniej podjąć odpowiednie działania zapobiegawcze oraz naprawcze. Monitorowanie stanu dynamicznego węzłów łożyskowych umożliwia przeprowadzenie remontów, które wynikają z aktualnego stanu technicznego maszyny, co pozwala również na zaniechanie, niejednokrotnie przedwczesnych, remontów zapobiegawczych, związanych z czasem pracy danej maszyny oraz remontów poawaryjnych, w przypadku wystąpienia awarii [9, 11, 30, 68, 79].

Przeprowadzanie remontów, uwarunkowanych stanem maszyny, umożliwia wyznaczenie optymalnego czasu potrzebnego na obsługę techniczną, co pozwala na oszczędności finansowe, związane z ponoszeniem kosztów na niepotrzebne przeglądy i nieprzewidziane awarie. Obsługa techniczna maszyn oparta na monitorowaniu ich stanu technicznego jest najtańszą metodą eksploatacji maszyn i pozwala na wykonywanie napraw maszyn wtedy, gdy wymaga tego ich stan techniczny [30, 68].

3.2. Budowa łożysk

Właściwa konstrukcja i dobór łożyska powinny pozwolić na uzyskanie jak najmniejszych oporów ruchu przy przenoszeniu obciążenia z elementów wirujących na korpus a także dokładne pozycjonowanie części wirujących [7, 32].

Pod względem budowy łożyska dzielą się na dwa podstawowe rodzaje: ślizgowe i toczne.

W łożyskach ślizgowych nie występują ruchome elementy pośredniczące. Czop wału lub inny obrotowy element umieszczony jest w cylindrycznej panewce (części łożyska współpracującej z czopem) z pasowaniem luźnym. Powierzchnia czopa wału ślizga się po powierzchni panewki lub bezpośrednio po powierzchni otworu łożyska. Oznacza to, iż w czasie pracy występuje tarcie ślizgowe.

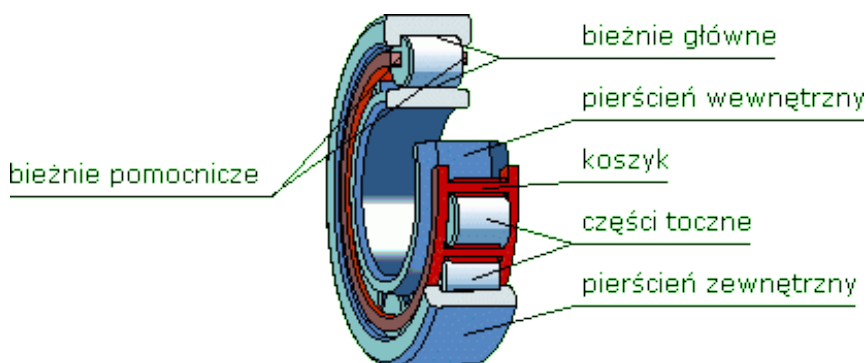
Dla prawidłowego funkcjonowania łożysk ślizgowych konieczne jest odpowiednio dobrane ich smarowanie. Ze względu na rodzaj środka smarnego i techniki smarowania łożyska ślizgowe dzielą się na:

- a) suche – w których smarowanie odbywa się okresowo smarem stałym bądź też procesu smarowania nie przeprowadza się w ogóle,
- b) powietrzne – w których odległość pomiędzy panewką a wałem utrzymywana jest przez poduszkę powietrzną, wytwarzającą się na skutek dostarczenia do panewki sprężonego powietrza,
- c) olejowe – w których w części korpusu łożyska znajduje się olej. W łożyskach tych podczas ruchu wału wytwarza się cienka warstwa oleju (tzw. film olejowy). Łożyska olejowe można podzielić na:
 - hydrodynamiczne – w których następuje samoczynne tworzenie filmu olejowego (w tym wypadku w łożysku ślizgowym musi istnieć kieszeń smarna). Smarowaniem hydrodynamicznym jest smarowanie tzw. pierścieniem luźnym,
 - hydrostatyczne – w których olej dostarczany jest do panewki pod ciśnieniem [7, 32, 36].

Łożyska ślizgowe najczęściej stosowane są w drobnych konstrukcjach o bardzo małych obciążeniach (np. w zegarkach), w urządzeniach pracujących przy dużych prędkości obrotowych, w sytuacjach, w których konieczne jest stosowanie łożysk dzielonych skrajnych, przy przenoszeniu dużych obciążeń oraz przy obciążeniach udarowych, gdy wymagane jest tłumienie drgań wału.

Znacznie częściej wykorzystywane są łożyska toczne. Podstawowymi elementami łożyska tocznego są: elementy toczne, koszyk, pierścienie (zewnątrzny i wewnętrzny) z bieżniami. Budowa łożyska tocznego przedstawiona jest na rysunku 3.2.

Elementami tocznymi w łożysku tocznym są kulki lub wałeczki – o kształcie walca, stożka bądź baryłki. Elementy te przetaczają się pomiędzy bieżniami pierścieni łożyska, przenosząc obciążenia w ruchu łożysk.



Rys.3.2. Budowa łożyska tocznego [36]

W łożysku tocznym wyróżnia się bieżnie: główną, która przenosi obciążenia w głównym kierunku działania łożyska, oraz bieżnie pomocnicze, służące do przenoszenia obciążeń działających w innym kierunku niż główny i prowadzenia elementów tocznych. Pierścień zewnętrzny łożyska osadzony jest w oprawie, natomiast pierścień wewnętrzny umieszczony jest na czopie wału [7, 32, 48].

Ważnym elementem łożyska jest koszyk, którego zadaniem jest oddalanie od siebie elementów tocznych, eliminowanie tarcia ślizgowego pomiędzy elementami tocznymi i zapewnienie ich równomiernego rozmieszczenia na obwodzie łożyska, niekiedy również ich prowadzenie. Ponadto koszyk zapewnia utrzymanie zwartości łożyska, a przede wszystkim nierozłączności zespołu elementów tocznych [7, 32, 36].

W celu zapewnienia niezawodności pracy łożysk tocznych konieczne jest ich odpowiednie smarowanie. Środek smarujący łożyska toczne tworzy między elementami tocznymi, bieżniami i koszykami warstwę oddzielającą, zapobiegając zjawiskom tarcia metalu o metal. Głównym zadaniem smaru jest zatem zmniejszenie ściernego i zmęczeniowego zużycia powierzchni. Środek smarny zabezpiecza również powierzchnie łożysk przed korozją. Do smarowania łożysk używa się dwóch rodzajów środka smarnego: w łożyskach pracujących w temperaturze do $+70^{\circ}\text{C}$ stosuje się smary plastyczne; w temperaturze wyższej od $+80^{\circ}\text{C}$ lepsze wyniki osiąga się przy stosowaniu

olejów mineralnych. Dobór odpowiedniego smaru i systemu smarowania zależy od rodzaju łożyska i jego warunków pracy. Ze względu na rodzaj smaru oraz technikę uszczelnienia łożyska toczne można podzielić na:

- a) łożyska uszczelnione – w których uszczelka najczęściej jest wykonana z tworzywa sztucznego a łożysko smarowane jest smarem plastycznym, którego trwałość użytkowa jest dłuższa od trwałości łożyska. W tym wypadku na ogół nie ma konieczności dodatkowego smarowania łożyska,
- b) łożyska z uszczelnieniem częściowym, w których wypływananiu smaru plastycznego zapobiega uszczelnienie wykonane w postaci metalowego pierścienia,
- c) łożyska bez własnych uszczelnień, w których uszczelnianie odbywa się poprzez specjalne pokrywki z uszczelkami gumowymi lub z tworzyw sztucznych, zamontowane na końcu osi lub na wale.

Ważne jest aby w każdym przypadku materiał, z którego wykonano uszczelki był odpowiedni do rodzaju oleju lub smaru plastycznego [7, 32, 48].

Do najważniejszych zalet łożysk tocznych można zaliczyć:

- mniejszy współczynnik tarcia niż konwencjonalnych ślizgowych łożysk hydrodynamicznych
- nieznacznie większy od kinematycznego statyczny współczynnik tarcia, co powoduje małą wrażliwość na warunki pracy – czyli rozruch i zatrzymanie urządzenia,
- dużą sztywność podparcia,
- małą wrażliwość na rodzaj substancji smarownej,
- łatwy montaż i demontaż.

Łożyska toczne łatwo przenoszą drgania na obudowę, w związku z czym ich praca wywołuje wysoki poziom szumu, co stanowi wadę z punktu widzenia konstrukcyjnego maszyny. Szum ten może być jednak wykorzystany jako sygnał diagnostyczny, umożliwiając monitorowanie stanu technicznego łożysk w czasie ich normalnej pracy, bez konieczności demontażu silnika. [7, 9, 11, 32, 36, 48]

3.3. Uszkodzenia łożysk

Uszkodzenia łożysk objawiają się ubytkiem lub zniekształceniem ich masy, co prowadzi do całkowitego zniszczenia łożyska. W normalnych warunkach pracy przy zrównoważonym obciążeniu pojawiają się uszkodzenia wskutek zmęczenia materiału. Defekty te na ogół mają postać pęknięć zlokalizowanych pod powierzchnią bieżni oraz elementów tocznych, które stopniowo powiększają się przyczyniając się do generowania dodatkowych wibracji oraz wzrostu poziomu hałasu podczas pracy łożyska. Dalsze narażenia łożysk prowadzą do pojawienia się pęknięć powodujących wyluszczenie obszaru bieżni i elementów tocznych. Rozrastające się wyluszczenie prowadzi do zanieczyszczenia smaru i powoduje lokalne przeciążenia na całym obwodzie bieżni, co skutkuje nierównomierną pracą łożyska [30, 48, 68].

Na rozwój uszkodzeń i przyspieszenie tego procesu wpływ ma szereg różnych czynników. Generalnie źródła powstawania uszkodzeń łożysk można podzielić na dwie grupy [30, 68, 69]:

- a) uszkodzenia naturalne,
- b) uszkodzenia przedwczesne.

Uszkodzenia naturalne powstają w wyniku zużycia i przekroczenia nominalnej trwałości.

Natomiast przyczyn powstawania uszkodzeń przedwczesnych jest wiele i można tutaj wyróżnić:

- niewłaściwie przeprowadzony proces montażowy (jest to najczęstsza przyczyna przedwczesnych uszkodzeń łożysk). Najczęściej jest to uszkodzenie uszczelnień, złe przykręcenie kołnierza czy niedokładne oczyszczenie oprawy,
- niewłaściwie przeprowadzony proces produkcyjny – niedostateczne wykończenie elementów podczas szlifowania bądź nieodpowiednia obróbka cieplna,
- błędy w skonstruowanym węźle łożyskowym - np. znaczne luzy w obudowie i nieudanym pasowaniu, nieodpowiednie dobranie łożyska do warunków pracy (przeciążenie łożyska), niewłaściwy przekrój obudowy lub zła geometria,
- warunki zewnętrzne wpływające bezpośrednio na pracę łożyska – np. korozja, drgania zewnętrzne, przepływ prądu elektrycznego,
- nieodpowiednią obsługę węzła konstrukcyjnego.

W celu zdefiniowania kryteriów jakości łożysk wprowadzono następujący zestaw cech [9, 10, 11, 68]:

- trwałość (T) – czas pracy w danych warunkach pracy,
- dokładność – rozumiana jako wielkość chwilowego odchylenia środka łożyska od pozycji (D) roboczej,
- opory ruchu (R) – wielkość momentu napędowego wymaganego do utrzymania zadanych obrotów,
- poziom drgań (V),
- poziom hałasu generowanego przez łożysko (H).

Na podstawie przedstawionego powyżej zestawu cech sformułowano następujące ogólne kryterium jakości łożysk Q [10, 63]:

$$Q = a \cdot T + b \cdot D + c \cdot R^{-1} + d \cdot H^{-1} + e \cdot V^{-1} \quad (3.1)$$

gdzie: a, b, c, d, e – współczynniki wagowe.

Ze względu na wzajemną zależność poziomu drgań i pozostałych cech opisujących jakość łożyska można zapisać równanie (3.1) postaci:

$$Q \approx V^{-1} \quad (3.2)$$

Z zależności (3.2) wynika, że jakość łożyska jest odwrotnie proporcjonalna do poziomu drgań. Oznacza to, iż minimalne drgania łożyska świadczą o jego dobrej jakości, natomiast większe wartości poziomu drgań oznaczają obniżenie jakości Q łożyska [10, 63].

Proces zużycia łożyska od pojawienia się pierwszego objawu do całkowitego zniszczenia przebiega w następujących trzech etapach [48, 63]:

1. faza szumowa,
2. faza drganiowa,
3. faza termiczna.

Pierwszy etap – faza szumowa – trwa od momentu rozpoczęcia pracy łożyska do pojawienia się pierwszych makro uszkodzeń. Objawia się ona szerokopasmowym

szumem, którego wartość szczytowa o amplitudzie przyspieszenia drgań jest na poziomie $0,1 \div 0,2$ g.

Etap drugi – faza drganiowa – pojawia się po fazie szumowej i jest skutkiem coraz większych ubytków masowych. Powoduje to obniżenie wartości przyspieszenia i średniej częstotliwości drgań.

W ostatnim etapie - fazie termicznej – pojawiają się coraz większe ubytki oraz zniekształcenia powodujące wzrost oporów ruchu. Powstaje silne tarcie, powodujące wzrost temperatury łożyska [48].

Niezależnie od mechanizmu powstania uszkodzenia, łożyska toczne z defektem generują mechaniczne wibracje o częstotliwościach związanych z prędkościami obrotowymi jego elementów. Te częstotliwości, które związane są z bieżniami i elementami tocznymi mogą zostać wyznaczone na podstawie wymiarów łożyska i prędkości obrotowej silnika. Technika analizy mechanicznych wibracji sprowadza się przeważnie do obserwacji tych częstotliwości celem określenia stanu łożyska. Do częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzonego łożyska, które mogą pojawić się w widmie wibracji należą [5, 6, 8, 20, 23, 24, 25, 31, 35, 60, 68, 71, 72, 75]:

- a) częstotliwość koszyka,
- b) częstotliwość przetaczania po zewnętrznym pierścieniu,
- c) częstotliwość przetaczania po wewnętrznym pierścieniu,
- d) częstotliwość kulek.

Częstotliwość koszyka

Ten element wibracji pojawia się w sytuacji, gdy jeden z elementów tocznych ma mniejszą lub większą średnicę niż pozostałe. Pojawiają się wtedy oscylacje wału z częstotliwością:

$$f_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \approx 0,4 \cdot \frac{n}{60} \quad (3.3)$$

gdzie: f_c – częstotliwość koszyka.

Częstotliwość przetaczania po zewnętrznym pierścieniu

Obecność tej składowej wynika z faktu przetaczania się pierścienia po kulkach, a nie po gładkiej powierzchni. Kontakt pierścienia z każdą kolejną kulką powoduje przemieszczenie wału, co w konsekwencji skutkuje powstaniem wibracji o częstotliwości:

$$f_{out} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot N_b \approx 0,4 \cdot \frac{n}{60} \cdot N_b \quad (3.4)$$

- gdzie: f_{out} – częstotliwość przetaczania elementów tocznych po zewnętrznym pierścieniu,
 n – prędkość obrotowa [obr/min],
 N_b – liczba kulek lub rolek,
 B_d – średnica kulki lub rolki [mm],
 P_d – średnica podziałowa łożyska [mm],
 θ – kąt naporu [°].

Częstotliwość przetaczania po wewnętrznym pierścieniu

Ta składowa pojawia się w przypadku, gdy wewnętrzna bieżnia łożyska nie jest dokładnie okrągła, lecz ma ubytek. W chwilach kontaktu elementów tocznych z ubytkiem bieżni następuje przemieszczenie wału, co w konsekwencji powoduje powstanie wibracji o częstotliwości:

$$f_{in} = \left(\frac{n}{60} - f_c \right) \cdot N_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot N_b \approx 0,6 \cdot \frac{n}{60} \cdot N_b \quad (3.5)$$

- gdzie: f_{in} – częstotliwość przetaczania po wewnętrznym pierścieniu.

Częstotliwość kulek

Ta składowa wibracji pojawia się, gdy kształt kulki nie jest idealnie okrągły. W chwilach kontaktu bieżni łożyska z nieregularną kulką następuje przemieszczenie wału, co powoduje w konsekwencji pojawienie się wibracji o częstotliwości:

$$f_{rol} = \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{P_d}{B_d} \cdot \left(1 - \frac{B_d^2}{P_d^2} \cdot \cos^2 \theta \right) \quad (3.6)$$

gdzie: f_{rol} – częstotliwość kulek.

Ze wzorów (3.4) i (3.5) na częstotliwość przetaczania się elementów tocznych po zewnętrznym f_{out} i wewnętrznym pierścieniu f_{in} wynika, iż do wyznaczenia częstotliwości charakterystycznych konieczna jest znajomość konstrukcji łożyska. Jednak częstotliwości charakterystyczne bieżni dla większości łożysk o liczbie kulek między 6 a 12 można wyznaczyć na podstawie przybliżonych zależności:

$$f_{out} = 0,4 \cdot n \cdot f_r \quad (3.7)$$

$$f_{in} = 0,6 \cdot n \cdot f_r \quad (3.8)$$

gdzie: f_{out} – częstotliwość przetaczania się kulek po bieżni zewnętrznej,
 f_{in} – częstotliwość przetaczania po wewnętrznym pierścieniu,
 n – liczba kulek w łożysku,
 f_r – częstotliwość obrotowa wirnika silnika.

Powyższe zależności pozwalają zdefiniować zakresy częstotliwości, w których należy poszukiwać składowych o częstotliwościach przetaczania się elementów tocznych po bieżni wewnętrznej lub zewnętrznej, bez potrzeby dokładnej znajomości budowy łożyska [8, 20, 24, 60, 74, 75]. Nie umożliwiają one jednak dokładnego określenia częstotliwości składowych charakterystycznych dla określonych typów uszkodzeń łożysk, co w przypadku metod wykorzystujących do analizy sygnału widmo o dużej rozdzielczości może spowodować błędną detekcję składowych.

3.4. Wybrane metody diagnostyki łożysk

Metody diagnostyki łożysk polegają na pomiarze i analizie sygnałów diagnostycznych wytwarzanych wskutek powstawania uszkodzeń lub nieprawidłowego montażu łożysk. W diagnostyce łożysk tocznych silników indukcyjnych stosowane są metody oparte na różnych podstawach fizycznych. Najczęściej są to pomiary wibracji,

temperatury, zjawisk akustycznych i prądu [15, 31, 68, 69]. Dostępne na rynku urządzenia do diagnostyki łożysk przeważnie wykorzystują metody wibracyjne.

3.4.1. Metody wibroakustyczne diagnostyki łożysk

Wśród metod wibroakustycznych diagnostyki łożysk tocznych można wyróżnić metody oparte na pomiarach emitowanych drgań, pomiarach emitowanego hałasu, pomiarach impulsów udarowych oraz metodę obwiedni wysokoczęstotliwościowej [4, 9, 10, 11, 48, 68].

3.4.1.1. Pomiar emitowanych drgań

Metody opierające się na pomiarze emitowanych drgań, opierają się na śledzeniu tendencji zmian poziomu drgań w szerokich pasmach częstotliwości (10 Hz ÷ 10 kHz) w czasie. Wartości graniczne drgań łożysk określone są w odpowiednich normach międzynarodowych i krajowych publikacjach [41, 42, 48]. Zaletami tego typu metod są: wnioskowanie o stanie technicznym maszyny na podstawie jednego pomiaru, prosta obsługa oraz niska cena oprzyrządowania. Metody te nie pozwalają jednak na precyzyjne określenie rodzaju uszkodzenia, nie umożliwiają także opracowania prognozy dalszego rozwoju uszkodzenia. Dane uzyskane z pomiarów na ogół charakteryzują się dużą niejednoznacznością. Jest to wynikiem zarówno podatności na zakłócenia z innych źródeł drgań, jak również dużych trudności w ocenie symptomów przy niskim poziomie amplitud badanych sygnałów. Trudności w lokalizacji przyczyn nadmiernego poziomu drgań sprawiają, że metody te stosowane są we wstępnych diagnozach stanu łożysk tocznych.

3.4.1.2. Pomiar impulsów udarowych

Jeżeli w łożysku występuje metaliczny kontakt współpracujących powierzchni, to w rezultacie powstają siły dyskretne, odzwierciedlające się w przebiegu czasowym drgań łożysk w postaci charakterystycznych „impulsów udarowych”. Szerokość tych impulsów, zależna jest od charakteru uszkodzenia oraz warunków pracy łożyska. Impulsy te na ogół są zbyt małe, aby wzbudzić obszary drgań własnych maszyny w zakresie kilkudziesięciu kHz. Obserwacja obszarów drgań własnych pozwala na wyizolowanie impulsów z ogólnego sygnału drganiowego, co umożliwia

diagnozowanie stanu łożysk na podstawie uzyskanych impulsów udarowych [9, 11, 48, 68, 69].

Metoda ta pozwala na uzyskanie dobrych rezultatów w dziedzinie oceny stanu technicznego łożysk, posiada jednak dwie wady. Pierwszą wadą jest konieczność odseparowania sygnałów diagnostycznych od zakłóceń pochodzących z innych źródeł niż łożyska. Drugą wadą tej metody jest brak powtarzalności charakterystyk mobilności węzłów łożyskowych, co powoduje konieczność indywidualnego poszukiwania obszarów drgań własnych, nawet dla węzłów o identycznej konstrukcji.

Wśród metod diagnostyki łożysk, opartych na pomiarze impulsów udarowych można wyróżnić:

- a) SPM,
- b) pomiaru współczynnika szczytu,
- c) pomiaru kurtozy.

a) Metoda SPM (ang. Shock Pulse Method)

Metoda SPM jest jedną z najbardziej znanych i najlepiej rozpowszechnionych metod w dziedzinie diagnostyki wibracyjnej [4, 28, 48, 68]. Problem braku powtarzalności charakterystyk mobilności węzłów łożyskowych w tej metodzie rozwiązany został poprzez detekcję i pomiar impulsów udarowych w obszarze rezonansowym przetwornika drgań. Podejście to pozwoliło na doświadczalne ustalenie skali oceny jakości łożysk, przy uwzględnieniu wielkości łożyska i jego prędkości obrotowej. Empirycznie określono prędkość uderzeń v_n łożyska pracującego poprawnie [48]:

$$v_n = \beta \cdot n \cdot d \cdot \gamma \quad (3.9)$$

- gdzie: n – prędkość obrotowa łożyska [obr/min],
 d – średnica wewnętrzna łożyska [mm],
 β, γ – współczynniki ustalone doświadczalnie.

Ocena stanu łożyska polega na porównaniu aktualnie zmierzonego poziomu prędkości uderzeń z poziomem określonym dla łożyska pracującego poprawnie. Metodę tą cechuje możliwość analizy trendu, oraz możliwość wczesnego wykrywania uszkodzeń. Wadą jest natomiast duża zależność wyników pomiarów od sposobu zamocowania przetwornika oraz brak możliwości identyfikacji rodzaju

uszkodzenia łożyska. W konsekwencji na podstawie wyników pomiarów metodą SPM nie można utworzyć prognozy czasu pracy maszyny do wystąpienia awarii. Kolejną wadą tej metody jest fakt, iż w maszynach wolnoobrotowych (prędkości obrotowe rzędu 50 – 100 obr/min) w łożyskach nieuszkodzonych również występują impulsy udarowe. Diagnozowanie tego typu maszyn metodą SPM daje mało wiarygodne wyniki.

b) Pomiar współczynnika szczytu

Metoda ta opiera się na sprawdzeniu stosunku wartości szczytowej sygnału do jego wartości skutecznej w danym zakresie częstotliwości [48]. Najczęściej mierzone jest przyspieszenie drgań:

$$C = \frac{\hat{a}}{\tilde{a}} \quad (3.10)$$

gdzie: \hat{a} – wartość szczytowa amplitudy przyspieszeń drgań,
 \tilde{a} – wartość skuteczna amplitudy przyspieszeń drgań.

W metodzie tej istotna jest obserwacja zmiany stosunku w czasie – wzrost stosunku wartości wskazuje na pogorszenie stanu łożyska. Wadą tej metody jest konieczność wykonywania pomiarów wraz z początkiem użytkowania łożyska w celu określenia trendu rozwoju uszkodzeń i prognozy czasu pracy urządzenia do awarii. Prognoza ta jest jednak mało precyzyjna.

c) Pomiar kurtozy

Jest to statystyczna metoda oparta o pomiar współczynnika kurtozy („impulsywności”) K sygnału przyspieszenia drgań. Praktyczny estymator procesu opisany jest zależnością [5, 71, 77, 78]:

$$K = \frac{E(x-u)^4}{\sigma^2} \quad (3.11)$$

gdzie: E – estymator wartości oczekiwanej,
 x – zmienna losowa,
 u – wartość średnia,
 σ – odchylenie standardowe.

Dla sygnału o gaussowskim rozkładzie amplitud, bezwymiarowy współczynnik K jest równy 3. Jeśli kurtoza przyjmuje wartość większą niż 3 może to świadczyć o spłaszczeniu rozkładu, który prawdopodobnie związany jest z występowaniem impulsów w sygnale czasowym. Wielkość współczynnika K zależna jest od zakresu częstotliwości, w którym dokonywany jest pomiar. Nie zależy jednak od prędkości i obciążenia łożyska. Metoda umożliwia ocenę uszkodzenia łożyska bez znajomości historii pracy urządzenia. Do oceny stanu łożyska na ogół wystarczający jest pojedynczy pomiar. Wadą tej metody jest fakt, iż w przypadku pojawienia się sygnałów impulsowych innych niż pochodzące od łożyska, zwykle nie jest możliwe osiągnięcie dobrych rezultatów diagnostycznych [77].

3.4.1.3. Pomiar emitowanego hałasu

Metoda częściej stosowana do określenia źródeł hałasu niż do diagnostyki eksploatacyjnej. Powodem tego jest fakt, iż badania najczęściej przeprowadzane są w warunkach przemysłowych, gdzie pomiar hałasu emitowanego przez konkretny węzeł łożyskowy jest bardzo trudny. Mikrofon pomiarowy odbiera hałas, który jest wypadkową fal akustycznych pochodzących z różnych źródeł. Metoda rzadko stosowana, ze względu na słabe możliwości diagnozy i konieczność przeprowadzania pomiarów w warunkach laboratoryjnych w celu uzyskania miarodajnych wyników.

3.4.1.4. Metoda obwiedni wysokoczęstotliwościowych

Jest to najbardziej rozpowszechniona metoda diagnostyki wibroakustycznej łożysk. Na ogół uważana jest za najpewniejszą dla zastosowania w diagnostyce wibroakustycznej łożysk. Metoda pozwala na dokładne określenie rodzaju uszkodzenia, stopnia jego zaawansowania a także umożliwia wykrycie uszkodzeń we wczesnej fazie rozwoju [4, 48, 68].

Sposób polega na specyficznej analizie drgań rezonansowych maszyny. Krótkotrwałe impulsy widoczne w przebiegach czasowych sygnału drganiowego maszyny mogą być spowodowane uszkodzeniami elementu tocznego, koszyka lub przejściem elementu tocznego przez punktowe uszkodzenie bieżni łożyskowej. Defekty łożyska powodują generację ciągów udarowych z częstotliwościami charakterystycznymi (zależności od 3.3 do 3.6) dla poszczególnych elementów łożyska, które nakładają się na całkowity sygnał drganiowy w punkcie pomiaru. Udary te

wzbudzają do drgań rezonansowych konstrukcję maszyny w tym obudowę łożyska, powodując wzrost poziomu składowych wokół częstotliwości rezonansowych.

Istota metody obwiedni sprowadza się do wydzielenia przebiegu niskoczęstotliwościowego $A(t)$ z mierzonego sygnału $s(t)$ i dokonania analizy spektralnej z przebiegu $A(t)$:

$$s(t) = A(t) * f(t) \quad (3.12)$$

gdzie: $A(t)$ – przebieg okresowy niskoczęstotliwościowy,
 $f(t)$ – modulujący przebieg wysokoczęstotliwościowy.

W rezultacie analizy w widmie drgań pojawiają się składowe harmoniczne, których częstotliwości określają rodzaj uszkodzenia, a ich amplituda związana jest z głębokością uszkodzenia. W tabeli 3.1 zestawiono częstotliwości składowych widma wibracji charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń łożysk tocznych.

Wykorzystanie analizy widmowej w połączeniu z analizą obwiedni pozwala na precyzyjne oddzielenie informacji o uszkodzonym łożysku tocznym od zakłóceń zewnętrznych i umożliwia śledzenie rozwoju uszkodzenia łożysk [68].

Do zalet metody obwiedni należą:

- częstotliwości mierzonych wibracji, przy tej metodzie mieszczą się zwykle w przedziale 10-15 kHz,
- możliwość odseparowania użytecznych informacji diagnostycznych od wpływu zakłóceń zewnętrznych,
- możliwość diagnozy na podstawie pojedynczego pomiaru, bez znajomości historii pracy maszyny,
- możliwość dokładnego określenia rodzaju uszkodzenia,
- możliwość określenia stopnia zaawansowania uszkodzenia,
- możliwość opracowania prognozy czasu pracy maszyny do awarii.

Wadą metody obwiedni jest konieczność dokładnej znajomości konstrukcji i geometrii łożyska, prędkości obrotowej wału oraz występowania obszarów rezonansowych.

Tabela 3.1. Częstotliwości składowych widma wibracji charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń łożysk tocznych [10, 30, 68]

Typ uszkodzenia	Główne częstotliwości modulujące	Uwagi
Obrót wirnika dookoła zewnętrznego pierścienia	f_r	
Niejednorodne promieniowe naprężenia w łożysku	$2f_r$	
Nieosiowe ustawienie zewnętrznego pierścienia	$2f_{out}$	
Zużycie zewnętrznego pierścienia	f_{out}	
Ubytki na zewnętrznym pierścieniu	$k f_{out}; k = 1, 2, 3, \dots$	
Zużycie wewnętrznego pierścienia	$k f_r; k = 1, 2, 3, \dots$	Zanik amplitud ze wzrostem k
Wgłębienia na wewnętrznym pierścieniu	f_{in}	
Zużycie koszyka i elementów tocznych	f_c lub $(f_r - f_c)$	
Wgłębienia i odpryski na elementach tocznych łożyska	$k f_{rol}; k = 1, 2, 3, \dots$	
Uszkodzenia kilku powierzchni łożyska	$f_{out} + f_{in} = n f_r$ lub $(f_r - f_c)(n + 1)$	Brak $f_{out} - f_r$ lub $(f_r - f_c)(n + 1)$
Obrót pierścienia w gnieździe łożyska	$k f_r; k = 1, 2, 3, \dots$	
Wady smarowania		Wzrost poziomu drgań

3.4.2. Metody prądowe diagnostyki łożysk

Zdarzają się sytuacje, w których bezpośredni dostęp do maszyny, w której należy przeprowadzić czynności diagnostyczne nie jest możliwy lub też zbliżenie się do niej może być niebezpieczne dla obsługującego ją personelu. Alternatywą dla metod wibracyjnych jest wykorzystanie do diagnostyki łożysk wielkości elektrycznych zasilających silnik. Najczęściej stosowana jest metoda analizy widma prądu zasilającego maszynę [30, 67, 68]. Metoda ta polega na monitorowaniu prądu stojana i wykorzystuje fakt, że składowe harmoniczne tego prądu zależą bezpośrednio od rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej pomiędzy wirnikiem i stojanem. Ponieważ wirnik obraca się przy udziale łożysk, każde ich uszkodzenie powoduje promieniowy ruch wirnika i odchylenie od normalnego położenia. Konsekwencją tego zjawiska jest zmiana wzajemnego położenia wirnika względem stojana, co skutkuje

zmianą wielkości szczeliny powietrznej pomiędzy nimi. Zmiany te powodują nierównomierność rozkładu indukcji magnetycznej. Nierównomierność ta opisywana jest jako kombinacja odchylenia w kierunku zgodnym i przeciwnym do wirowania wirnika. Następstwem tej nierównomierności jest zmiana indukcyjności uzwojeń silnika, co skutkuje pojawieniem się dodatkowych składowych harmoniczných prądu stojana. Częstotliwości f_e tych składowych opisane są zależnością [6, 24, 25, 35, 52, 67, 68, 72, 74]:

$$f_e = f \left[1 + k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] = |f \pm k \cdot f_r| \quad (3.13)$$

gdzie: f – częstotliwość napięcia sieci zasilającej [Hz],
 f_r – częstotliwość rotacji wirnika [Hz],
 s – poślizg wirnika,
 p – liczba par biegunów silnika,
 k – współczynnik równy 1, 2, 3...

Ponieważ łożyska kulkowe wspierają wirnik, wszelkie defekty łożyska wywołują ruch promieniowy między wirnikiem a stojanem silnika. Mechaniczne przemieszczenia, które wynikają z uszkodzeń łożysk, powodują zmiany szczeliny powietrznej silnika w sposób, który można opisać jako kombinację ekscentryczności wirujących w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wirnika i przeciwnym do ruchu wirnika. Zmiany te odpowiedzialne są za powstanie harmoniczných prądu stojana o możliwych do określenia częstotliwościach f_g , związanych z częstotliwościami wibracji silnika i częstotliwością zasilania w następujący sposób:

$$f_g = |f \pm k \cdot f_H| \quad (3.14)$$

gdzie: f_g – częstotliwość harmoniczných prądu stojana [Hz],
 f_H – jedna z charakterystycznych częstotliwości wibracji [Hz],

Częstotliwości charakterystyczne wibracji łożysk można określić na podstawie znanych zależności, opisanych w rozdziale 3.3.

W publikacji [68] przedstawiono metodę pomiarową, polegającą na analizie widmowej sygnału prądu stojana i detekcji składowych o częstotliwościach związanych z uszkodzeniami łożysk, opisaną w rozdziale 3.4.2.1.

3.4.2.1. Metoda analizy widma prądu stojana w stanie pracy ustalonej

Diagnostyka łożysk w silniku indukcyjnym oparta o analizę widma prądu stojana w stanie pracy ustalonej polega na obserwacji częstotliwości charakterystycznych związanych z konstrukcją łożyska (rozdział 3.3). Obecność składowych harmonicznych o częstotliwościach charakterystycznych w widmie prądu zasilającego świadczy o obecności defektu. Natomiast amplitudy tych składowych zależą zarówno od momentu obciążenia silnika jak i od rozmiaru uszkodzenia.

W promieniowo obciążonych łożyskach miejsca styku bieżni i kulek podlegają największym obciążeniom. Fakt ten powoduje powstanie uszkodzeń na skutek zmęczenia materiału przede wszystkim tych elementów łożyska. Częstotliwość obrotu kulki jest wywołana ruchem obrotowym wokół własnej osi każdej kulki. Ponieważ uszkodzenie na powierzchni kulki będzie stykało się zarówno z wewnętrzną jak i z zewnętrzną bieżnią podczas każdego obrotu, częstotliwość uszkodzenia kulki będzie równa dwukrotnej częstotliwości wibracji, wyznaczonej ze wzoru (3.6).

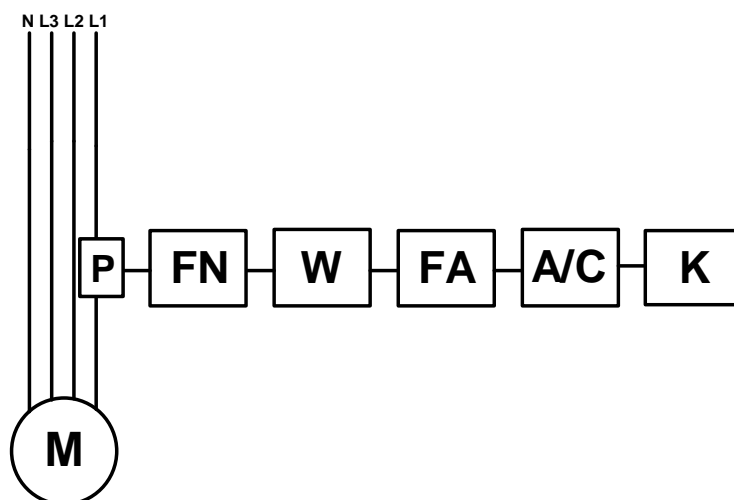
Natomiast uszkodzenia koszyka skutkują zazwyczaj unieruchomieniem kulek, co prowadzi do ślizgania się kulek po bieżni. Wskutek tego zjawiska generowane są wibracje wysokiej częstotliwości.

Składową o największej amplitudzie, obecną w widmie częstotliwościowym prądu stojana jest składowa podstawowa napięcia zasilającego. Amplituda tej składowej jest znacznie większa od amplitud składowych o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk. Fakt ten w dużym stopniu utrudnia detekcję składowych charakterystycznych dla uszkodzeń.

Dlatego w celu zmniejszenia amplitudy składowej podstawowej napięcia zasilającego i podniesienia dokładności pomiaru składowych o częstotliwościach związanych z uszkodzeniami łożysk zastosowano układy kondycjonowania sygnałów. Autor publikacji [68] wykorzystał adaptacyjny filtr środkowo – zaporowy, eliminujący składową podstawową napięcia zasilającego i nadążający za zmianami częstotliwości składowej podstawowej sieci zasilającej. Następnie sygnał pomiarowy jest wzmacniany oraz poddawany filtracji przez filtr antyaliasingowy. W tej metodzie analizy widma prądu stojana otrzymane przebiegi prądu transformowane są na postać cyfrową. Sygnały dalej poddawane są analizie widmowej poprzez zastosowanie szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Analizę wykonuje się przy wykorzystaniu widma sygnału

prądu o rozdzielczości 1/8 Hz. Dalej dokonuje się wyodrębnienia z widma poszukiwanych składowych o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk. Autor publikacji [68] dokonuje oceny stanu technicznego łożysk na podstawie analizy 63 składowych widma prądu, powstałych w wyniku zmodulowania częstotliwością charakterystyczną dla uszkodzenia składowych prądu silnika wynikających z napięcia zasilającego i/lub prędkości obrotowej. Obecność powyższych składowych świadczy o pojawieniu się uszkodzenia w łożysku natomiast amplitudy tych składowych powiązane są ze stopniem zaawansowania uszkodzenia.

Przykładowy schemat blokowy układu pomiarowego do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych metodą analizy widma prądu stojana przedstawiony został na rysunku 3.3 [68].



Rys.3.3. Schemat blokowy układu pomiarowego do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych poprzez pomiar i analizę widmową prądu zasilającego: M – maszyna badana, P – przetwornik prądowy, FN – filtr środkowo-zaporowy, W – wzmacniacz sygnału, FA – filtr antyaliasingowy, A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy, K – komputer klasy PC

Do zalet tej metody należy zaliczyć dużą liczbę rodzajów uszkodzeń przez nią wykrywanych oraz możliwość stosowania w miejscach niedostępnych dla personelu.

Wadą metody analizy widma prądu stojana jest dosyć trudne wyszukiwanie harmonicznym w widmie prądu stojana, ponieważ amplitudy składowych, związanych z uszkodzeniami łożysk, są niewielkie w porównaniu z innymi składowymi widma prądu, a zatem metoda nie nadaje się do wykrywania uszkodzeń w ich wczesnej fazie.

W celu ułatwienia detekcji składowych charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk opracowano szereg metod MCSA (ang. *Motor Current Signature Analysis*). Metody te opierają się na analizie widma prądu stojana i wykorzystują zaawansowane metody przetwarzania sygnałów, takie jak: analiza falkowa, sieci neuronowe oraz logikę rozmytą [6, 12, 21, 25, 40, 44, 51, 62, 67, 70, 76]. Metody te wymagają jednak zaawansowanych algorytmów obliczeniowych i nie zawsze pozwalają na podniesienie trafności diagnoz.

Stąd też wynika konieczność opracowania metod, które pozwalają wyeliminować problemy wynikające z analizy widmowej oraz poprawiają stosunek sygnału użytecznego do szumu. Do metod tych należą np. metoda adaptacyjna czasowo-częstotliwościowa oraz metoda detekcji uszkodzeń łożysk z wykorzystaniem wektora Parka.

3.4.2.2. Statystyczna metoda adaptacyjna czasowo-częstotliwościowa

Statystyczna metoda adaptacyjna czasowo-częstotliwościowa [28] polega na tworzeniu widm czasowo-częstotliwościowych, które pozwalają na obserwację zmian składowych widma w czasie. Cechą tej metody jest również możliwość wykonania analizy statystycznej widma, celem określenia stanu technicznego łożyska.

Zaletą przekształcenia czasowo-częstotliwościowego, w porównaniu z przekształceniem Fouriera jest możliwość analizy sygnałów niestacjonarnych. W efekcie metoda ta umożliwia detekcję uszkodzeń silników indukcyjnych, w tym defektów łożysk, przy zmieniających się warunkach pracy maszyn, np. przy zmieniającym się obciążeniu w trakcie pomiaru.

Istotą opisywanej metody jest analiza czasowo – częstotliwościowa widm (spektrogramów) prądu stojana silnika indukcyjnego, celem detekcji zmian poszczególnych składowych widma w czasie. Do celów analizy czasowo – częstotliwościowej najczęściej wykorzystywany jest algorytm krótkoczasowej transformaty Fouriera STFT (ang. *Short-Time Fourier Transform*).

Wyniki przekształcenia czasowo – częstotliwościowego poddawane są analizie statystycznej, celem określenia parametrów pracy silników indukcyjnych różniących się od normalnego stanu.

Metoda ta składa się z czterech następujących etapów [68]:

1. etapu wstępnego,

2. etapu nauki,
3. etapu testu,
4. etapu końcowego.

Podczas etapu wstępnego sygnał proporcjonalny do prądu silnika przekształcany jest na postać cyfrową i dalej obliczany jest spektrogram.

W etapie nauki obliczane są przybliżone wartości częstotliwości związanych z uszkodzeniami łożysk oraz określone są wektory z przedziałów możliwych wartości wokół oszacowanych częstotliwości. Dalej następuje analiza statystyczna danych uczących, należących do normalnego trybu pracy, na podstawie których następuje określenie składowych reprezentatywnych oraz ich wartości progowych dla uszkodzeń łożysk,

Trzecim etapem jest etap testu, w którym pobierane są czasowo – częstotliwościowe widma prądu badanych maszyn. Dalej następuje detekcja i pomiar parametrów charakterystycznych dla uszkodzeń, na podstawie których następuje określenie różnic pomiędzy pomierzonymi wartościami cech a parametrami odniesienia. Na podstawie tych różnic następuje określenie stanu technicznego badanych silników.

Ostatnim etapem jest etap końcowy, w którym w celu zwiększenia precyzji detekcji uszkodzeń następuje wielokrotne powtarzanie procesu testowania.

Zaletą statystycznej metody adaptacyjnej czasowo – częstotliwościowej jest duża dokładność i trafność diagnoz. Wadą tej metody jest konieczność znajomości historii pracy każdej z badanych maszyn. Wymagane jest zatem tworzenie baz danych, zawierających zgromadzone wcześniej informacje związane z parametrami pracy dla każdego z silników. Brak takiej bazy ogranicza możliwości diagnostyczne opisywanej metody. Wady tej pozbawiona jest metoda detekcji uszkodzeń łożysk z wykorzystaniem wektora Parka, opisana w rozdziale 3.4.2.3.

3.4.2.3. Metoda detekcji uszkodzeń łożysk z wykorzystaniem wektora Parka

Metoda ta wykorzystuje fakt, iż w silniku trójfazowym suma prądów stojana jest równa zero. Zatem do analizy wystarczy znajomość dwóch prądów, gdyż trzeci może zostać wyznaczony na ich podstawie [30, 35, 40, 44, 75].

Prądy silnika mogą być reprezentowane przez wektor Parka, który składa się z dwóch składowych i_d oraz i_q . Składowe te są funkcją trzech prądów fazowych (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}) silnika i opisane są zależnościami:

$$\begin{aligned}i_d &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{L1} - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot i_{L2} - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot i_{L3} \\i_q &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{L2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{L3}\end{aligned}\tag{3.15}$$

W przypadku, gdy występują tylko podstawowe harmoniczne prądów, zależności (3.14) można uprościć do postaci:

$$\begin{aligned}i_d &= \frac{\sqrt{6}}{2} I_m \sin(\omega t) \\i_q &= \frac{\sqrt{6}}{2} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})\end{aligned}\tag{3.16}$$

gdzie: I_m – amplituda prądu fazowego,
 ω – pulsacja napięcia zasilającego,
 t – czas.

Przy powyższych założeniach wektor Parka ma stałą wartość modułu. Oznacza to, iż wykres funkcji $i_q = f(i_d)$ ma postać okręgu. W sytuacji, gdy pojawią się uszkodzenia łożysk w silniku prądy ulegają odkształceniom a to oznacza iż, wzory (3.16) przestają być słuszne. Ponadto wykres funkcji $i_q = f(i_d)$ przestaje mieć kształt okręgu. Zmiany kształtu tych krzywych mogą zostać wykorzystane do diagnostyki uszkodzeń łożysk, jednak przypisanie określonych zmian wykresu funkcji poszczególnym typom uszkodzeń nie jest jednoznaczne. Ponadto pojawienie się harmonicznych napięcia zasilającego, asymetrii amplitud napięcia w poszczególnych fazach lub szumu innego rodzaju, również wpływa na postać funkcji $i_q = f(i_d)$. Dlatego też do diagnostyki łożysk wykorzystana została analiza widma modułu wektora Parka [30].

Jeżeli przyjąć, że napięcie zasilające jest sinusoidalnie zmienne to prądy stojana mogą być opisane zależnościami:

$$\begin{aligned}i_{L1}(t) &= i_f \cos(\omega t - \alpha_0) \\i_{L2}(t) &= i_f \cos(\omega t - \alpha_0 - \frac{2}{3}\pi)\end{aligned}\tag{3.17}$$

$$i_{L3}(t) = i_f \cos(\omega t - \alpha_0 + \frac{2}{3}\pi)$$

gdzie: i_f – moduł prądu fazowego,
 α_0 – kąt fazowy składowej prądu zasilającego.

Pojawienie się defektu w silniku powoduje powstanie wibracji o częstotliwości f_H związanej z danym rodzajem uszkodzenia. Obecność składowej wibracji powoduje modulację składowych prądu, występujących w silniku nieuszkodzonym składową o częstotliwości f_H . Częstotliwości zmodulowanych składowych prądu wynoszą: $f + f_H$ oraz $f - f_H$ a moduły tych składowych wynoszą odpowiednio: i_{dl} , i_{dr} . Zależności określające przebiegi prądów w poszczególnych fazach można zatem zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} i_{L1}(t) &= i_f \cos(\omega t - \alpha_0) + i_{dl} \cos((\omega - \omega_H)t - \beta_l) + \\ &\quad + i_{dr} \cos((\omega + \omega_H)t - \beta_r) \\ i_{L2}(t) &= i_f \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \alpha_0) + i_{dl} \cos((\omega - \omega_H)t - \frac{2}{3}\pi - \beta_l) + \\ &\quad + i_{dr} \cos((\omega + \omega_H)t - \frac{2}{3}\pi - \beta_r) \\ i_{L3}(t) &= i_f \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \alpha_0) + i_{dl} \cos((\omega - \omega_H)t + \frac{2}{3}\pi - \beta_l) + \\ &\quad + i_{dr} \cos((\omega + \omega_H)t + \frac{2}{3}\pi - \beta_r) \end{aligned} \quad (3.18)$$

gdzie: β_l – kąt przesunięcia fazowego składowej prądu i_{dl} .
 β_r – kąt przesunięcia fazowego składowej prądu i_{dr} .

Wyrażenie określające moduł wektora Parka dla powyżej przedstawionych przebiegów prądów zależy od pulsacji ω_H . Zatem, dla przypadku $\omega_H < \omega$ moduł Parka przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} |i_d + j\dot{i}_q|^2 &= \frac{2}{3}(i_f^2 + i_{dl}^2 + i_{dr}^2) + 3i_f i_{dl} \cos(\omega_H t - \alpha + \beta_l) + \\ &\quad + 3i_f i_{dr} \cos(\omega_H t + \alpha - \beta_r) + 3i_{dr} i_{dl} \cos(2\omega_H t + \beta_l + \beta_r) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Natomiast w przypadku, gdy $\omega_H < \omega$ moduł Parka określony jest zależnością:

$$\begin{aligned} |i_d + j\dot{i}_q|^2 = & \frac{2}{3}(i_f^2 + i_{d1}^2 + i_{dr}^2) + 3i_f i_{d1} \cos(2\omega - \omega_H | t - \alpha + \beta_l) + \\ & + 3i_f i_{dr} \cos(\omega_H t + \alpha - \beta_r) + 3i_{dr} i_{d1} \cos(2\omega_H t + \beta_l + \beta_r) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Z powyższych rozważań wynika, iż w widmie modułu wektora Parka nie występuje składowa o częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego [30, 35, 40, 44, 75]. Ponadto amplitudy składowych diagnostycznych są większe $3i_r$ razy. Teoretycznie oznacza to, iż metody analizy oparte na module wektora Parka mają lepsze możliwości identyfikacji składowych diagnostycznych na tle szumu w odniesieniu do analizy widma prądu silnika. Fakt ten może umożliwiać wykrywanie uszkodzeń we wstępnej fazie rozwoju.

Wadą metody wykorzystującej wektora Parka jest zwiększenie liczby obliczeń pośrednich [30]. Wprowadza to dodatkowe błędy, szczególnie, że w metodzie założono, iż w silniku prądy w poszczególnych fazach są identyczne, co w rzeczywistej maszynie, na skutek nieidealnych parametrów sieci zasilającej i silnika, najczęściej nie występuje. Obecnie metoda ta nie jest wykorzystywana w zastosowaniach praktycznych.

3.5. Podsumowanie

W rozdziale 3 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące diagnostyki łożysk, ich budowy oraz przyczyn powodujących uszkodzenia. Zaprezentowano również przykładowe metody diagnostyki łożysk tocznych silników indukcyjnych. Na podstawie przeprowadzonych rozważań można stwierdzić, iż metody diagnostyki łożysk oparte na pomiarach i analizie drgań emitowanych przez uszkodzone łożyska oraz prądu zasilającego maszyny należą do najczęściej wykorzystywanych sposobów diagnozowania stanu technicznego łożysk.

Omówione w niniejszym rozdziale metody diagnostyki łożysk nie wyczerpują wszystkich możliwych sposobów diagnozowania występujących w praktyce. Są jednak reprezentatywne dla obecnego stanu wiedzy w zakresie diagnostyki łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych. Spośród pominiętych w rozdziale sposobów diagnozowania stanu technicznego łożysk można wymienić metody, w których wykorzystuje się algorytmy sztucznej inteligencji, takie jak logika rozmyta i sieci neuronowe oraz transformatę falkową [1, 2, 4, 12, 21, 25, 30, 31, 40, 44, 51, 59, 70, 76]. Należy nadmienić, że metody te wykorzystują opisane w niniejszym rozdziale sposoby pomiaru

wielkości reprezentatywnych dla uszkodzeń łożysk. Różnią się jedynie algorytmami przetwarzania i analizy danych, które autorzy wykorzystali celem podniesienia trafności diagnoz.

Sygnał wibracji zawiera szereg ważnych informacji o stanie technicznym silnika i jest obecnie najczęściej wykorzystywany w systemach diagnostyki łożysk. Dlatego też metody oparte na pomiarach wibracji są najlepiej dopracowane i umożliwiają uzyskanie wiarygodnych wyników. W pewnych przypadkach, np. przy braku bezpośredniego dostępu do silnika metody te nie mogą być stosowane. Należy również nadmienić, iż wadą niektórych metod wibracyjnych jest konieczność stosowania zaawansowanych sposobów odseparowania sygnałów diagnostycznych od zakłóceń pochodzących z innych źródeł niż łożyska oraz skomplikowanych algorytmów analizy sygnału drganiowego lub konieczność wykonywania pomiarów wraz z początkiem użytkowania łożyska.

Alternatywą dla metod wibracyjnych jest wykorzystanie do diagnostyki łożysk wielkości elektrycznych zasilających silnik.

Do najczęściej spotykanych metod diagnostyki łożysk, wykorzystujących wielkości zasilające maszynę, należą metody oparte na pomiarze i analizie prądu stojana. W metodach prądowych najczęściej wykorzystywana jest analiza widma prądu stojana w stanie pracy ustalonej. Metody te polegają na monitorowaniu prądu stojana i wykorzystują fakt, że w przypadku uszkodzeń łożysk w widmie prądu pojawiają się dodatkowe składowe harmoniczne prądu stojana związane z częstotliwościami charakterystycznymi dla uszkodzeń łożysk. Podstawową wadą metod prądowych jest fakt, iż największą składową obecną w widmie częstotliwościowym prądu stojana jest składowa podstawowa napięcia zasilającego. Amplituda tej składowej jest znacznie większa od amplitud składowych o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk. Fakt ten w dużym stopniu utrudnia detekcję składowych charakterystycznych dla uszkodzeń. Dlatego też, w celu wyznaczenia składowych harmonicznych, związanych z uszkodzeniem łożyska, konieczne jest tu stosowanie zaawansowanych układów pomiarowych oraz skomplikowanych algorytmów przetwarzania i analizy sygnału prądowego. Rozwiązanie takie zostało opisane w publikacji [68].

W przypadku innych metod prądowych, takich jak statystyczna metoda adaptacyjna czasowo-częstotliwościowa, czy metoda detekcji uszkodzeń łożysk z wykorzystaniem wektora Parka konieczne jest wykorzystanie skomplikowanych algorytmów analizy sygnału prądowego. Dodatkowo w metodzie czasowo – częstotliwościowej konieczna

jest znajomość historii pracy każdej z badanych maszyn. Wymagane jest zatem tworzenie baz danych, zawierających zgromadzone wcześniej informacje związane z parametrami pracy dla każdego z silników. Brak takiej bazy ogranicza możliwości diagnostyczne opisywanej metody. Natomiast wadą metody wykorzystującej wektora Parka jest zwiększenie liczby obliczeń pośrednich co wprowadza dodatkowe błędy. Tym bardziej, że w metodzie tej założono, iż w silniku prądy w poszczególnych fazach są identyczne, co w rzeczywistej maszynie, na skutek nieidealnych parametrów sieci zasilającej i silnika, najczęściej nie ma miejsca. Założenie to ogranicza możliwość wykorzystania tej metody w zastosowaniach praktycznych.

Ponieważ tematyka diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych, wykonywanej metodami nieniszczącymi, jest ważna i aktualna autor rozprawy zaproponował inną koncepcję wykonywania pomiarów i analizy sygnału. Sposób diagnostyki łożysk, zaproponowany przez autora niniejszej rozprawy, oparty jest na pomiarze i analizie widma iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia. Zasada pomiaru i analizy sygnału tej metody pozwala przypuszczać, że uzyskane wyniki pomiarów umożliwią poprawną ocenę stanu technicznego łożyska, przy mniejszej liczbie obliczeń pośrednich, w stosunku do opisanych w rozdziale 3 metod prądowych. W celu potwierdzenia możliwości wykorzystania proponowanej metody konieczne było dokonanie analizy teoretycznej, przeprowadzenie badań diagnostycznych łożysk oraz analizy metrologicznej metody opartej na pomiarze i analizie iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia. Zagadnienia te autor rozprawy przedstawił w kolejnych rozdziałach niniejszej pracy.

4. Nowa metoda diagnostyki łożysk silników indukcyjnych

W rozdziale tym została przedstawiona proponowana metoda diagnostyki łożysk oparta na analizie przebiegów prądu i napięcia zasilającego silniki indukcyjne. Omówiono podstawy matematyczne nowej metody diagnostyki łożysk silników indukcyjnych, podając wyniki obliczeń teoretycznych iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia wraz ze wskazaniem składowych, możliwych do wykorzystania w diagnostyce łożysk. Przedstawiono również zalety nowej metody w porównaniu z obecnie stosowanymi metodami prądowej diagnostyki łożysk silników indukcyjnych.

4.1. Proponowana metoda

W literaturze [34, 68,73] przedstawiane są dwa modele zjawisk występujących w silniku, które odwzorowują wpływ uszkodzeń łożysk na zaburzenia przebiegów prądu.

Pierwszy model oparty jest na założeniu, iż za modulację prądu odpowiedzialne są oscylacje szerokości szczeliny powietrznej, które skutkują zmieniającą się w czasie reaktancją indukcyjną uzwojeń silnika.

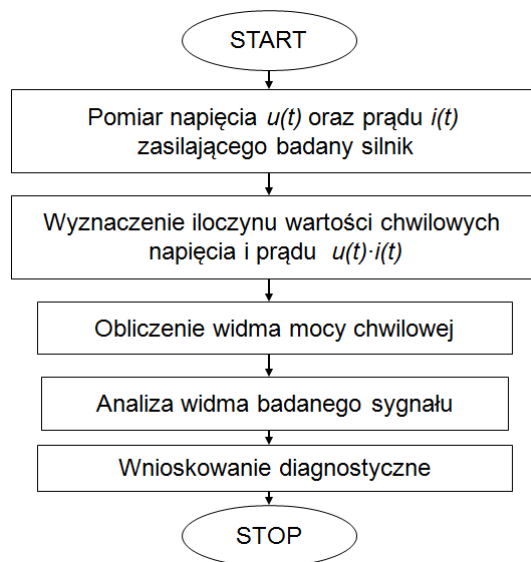
Drugi oparty jest na założeniu, iż odkształcenie prądu jest skutkiem zaburzeń momentu obciążenia silnika, spowodowanych zmiennym momentem oporowym od uszkodzonego łożyska, wskutek czego powstają zaburzenia mocy czynnej pobieranej przez silnik a w konsekwencji zaburzenia prądu zasilającego.

W widmie prądu uszkodzonego silnika pojawiają się nowe składowe harmoniczne, które są skutkiem modulacji przebiegu prądu przez drgania w uszkodzonym łożysku o częstotliwościach charakterystycznych (rozumianych jako częstotliwości drgań mechanicznych, wywołane przez uszkodzone łożyska, które zależą od konstrukcji łożyska oraz prędkości obrotowej i wskazują na uszkodzenia poszczególnych elementów łożyska). Zjawisko modulacji zachodzi niezależnie od przyjętego modelu zaburzenia prądu stojana silnika indukcyjnego.

Do badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy przyjęto pierwszy z wyżej opisanych modeli zjawisk zachodzących w silniku, odwzorowujących wpływ uszkodzeń łożysk na zaburzenia przebiegów prądów i napięć. Model ten oparty jest na założeniu, że każdy kontakt uszkodzonego fragmentu łożyska z innym elementem

łożyska powoduje chwilowy wzrost momentu oporowego, a tym samym mocy chwilowej (rozumianej jako iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego), pobieranej przez silnik. Pojawiające się odkształcenia mają postać dodatkowych harmonicznym widma, powstających na skutek modulacji przebiegów sygnałami o częstotliwościach charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia. W literaturze znane są zależności, dzięki którym można wyznaczyć wspomniane częstotliwości charakterystyczne [5, 6, 8, 20, 23, 24, 25, 31, 35, 60, 68, 72, 75].

Proponowana przez autora rozprawy metoda opiera się na analizie widma, uzyskanego z iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny. W widmie tym występują składowe diagnostyczne, na podstawie których możliwe jest określenie stanu technicznego łożyska. Algorytm proponowanej metody został przedstawiony na rysunku 4.1.



Rys.4.1. Algorytm proponowanej metody diagnostyki łożysk, opartej na pomiarach wartości chwilowych prądu i napięcia zasilających silnik indukcyjny

W pierwszym etapie omawianego algorytmu wykonywane są pomiary wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego badany silnik. Następnym krokiem jest wyznaczenie iloczynu wartości chwilowych napięcia i prądu $u(t) \cdot i(t)$. W kolejnym etapie dokonywane jest wyznaczenie widma z iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia. Dalej przeprowadzana jest analiza widma pod kątem obecności składowych harmonicznym pojawiających się na skutek modulacji przebiegów sygnałami o częstotliwościach charakterystycznych dla danych typów uszkodzeń łożysk.

W ostatnim etapie algorytmu dokonywana jest ocena stanu technicznego łożyska. Wnioskowanie diagnostyczne odbywa się na podstawie detekcji składowych harmonicznym widma badanego sygnału, charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk oraz ich amplitud. Pojawienie się składowej charakterystycznej dla określonego typu uszkodzenia świadczy o uszkodzeniu danego elementu łożyska. Natomiast na podstawie amplitudy tej składowej możliwe jest dokonanie oceny stopnia zaawansowania uszkodzenia.

4.2. Podstawy matematyczne proponowanej metody

Na podstawie przyjętych założeń w modelu, przedstawionych w rozdziale 4.1 autor pracy przeprowadził obliczenia matematyczne, których celem było teoretyczne potwierdzenie wpływu uszkodzeń łożysk na pojawienie się dodatkowych składowych harmonicznym w widmie mocy chwilowej, związanych z częstotliwościami charakterystycznymi dla uszkodzeń łożysk.

Jeżeli przyjąć, że napięcie zasilające jest sinusoidalnie zmienne to można je opisać zależnością:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

gdzie: U_m – amplituda napięcia,
 ω – pulsacja napięcia,

a wartość chwilową prądu z uwzględnieniem składowej modulującej można przedstawić następująco:

$$i_H(t) = I_m \sin(\omega t - \alpha) \cdot [1 + H \cos(\omega_H t)] \quad (4.2)$$

gdzie: I_m – amplituda prądu,
 ω_H – pulsacja składowej modulującej,
 H – współczynnik udziału składowej o częstotliwości ω_H w przebiegu prądu,
 α – kąt przesunięcia fazowego między prądem i napięciem.

Podstawiając do wzoru na moc czynną zależności (4.1) i (4.2) oraz korzystając z podstawowych funkcji trygonometrycznych po przekształceniach otrzymuje się wyrażenie na chwilową moc czynną $p(t)$, zmodulowaną przez sygnał o częstotliwości charakterystycznej ω_H .

$$\begin{aligned}
 p(t) &= u(t) \cdot i_H(t) = \\
 &= U_m \sin(\omega t) \cdot I_m \sin(\omega t - \alpha) \cdot [1 + H \cos(\omega_H t)] = \\
 &= U_m \cdot I_m \cdot [\sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \alpha) + H \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \alpha) \cdot \cos(\omega_H t)] = \\
 &= U_m \cdot I_m \cdot \left[\cos(\omega t - \omega t + \alpha) - \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \alpha) + \right. \\
 &\quad \left. + H \cdot (\cos(\omega t - \omega t + \alpha) - \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \alpha)) \cdot \cos(\omega_H t) \right] = \\
 &= U_m \cdot I_m \cdot \left[\cos \alpha - (\cos(\omega t + \omega t - \alpha) + \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \alpha)) + \right. \\
 &\quad \left. + H \cdot (\cos \alpha - (\cos(\omega t + \omega t - \alpha) + \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \alpha))) \cdot \cos(\omega_H t) \right] = \\
 &= U_m \cdot I_m \cdot \left[\frac{1}{2} (\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha)) + \frac{1}{2} H \cdot (\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha)) \cdot \cos(\omega_H t) \right] = \\
 &= \sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha) + \right. \\
 &\quad \left. + H \cdot (\cos \alpha \cdot \cos(\omega_H t) - \cos(2\omega t - \alpha) \cdot \cos(\omega_H t)) \right] = \tag{4.3} \\
 &= U \cdot I \cdot \left[\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha) + \right. \\
 &\quad \left. + H \cdot \left(\cos \alpha \cdot \cos(\omega_H t) - \cos(2\omega t + \omega_H t - \alpha) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \cos(2\omega t - \omega_H t - \alpha) - \sin(2\omega t - \alpha) \cdot \sin(\omega_H t) \right) \right] = \\
 &= U \cdot I \cdot \left[\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha) + \right. \\
 &\quad \left. + H \cdot \left(\cos \alpha \cdot \cos(\omega_H t) - \frac{1}{2} \cos(2\omega t - \omega_H t - \alpha) - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \omega_H t - \alpha) \right) \right] = \\
 &= U \cdot I \cdot [\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha)] + \\
 &+ U \cdot I \cdot H \cdot \left[\cos(\omega_H t) \cdot \cos \alpha - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \omega_H t - \alpha) - \frac{1}{2} \cos(2\omega t - \omega_H t - \alpha) \right]
 \end{aligned}$$

Na podstawie zależności (4.3) można określić składowe mocy chwilowej, występujące w przypadku zmodulowania przebiegu prądu sygnałem o częstotliwości charakterystycznej ω_H . Składowe $\cos \alpha$ i $\cos(2\omega t - \alpha)$ występują w mocy chwilowej niezależnie od obecności dodatkowej składowej modulującej przebieg prądu. Składowe $\cos(2\omega t + \omega_H t - \alpha)$ oraz $\cos(2\omega t - \omega_H t - \alpha)$ są rezultatem modulacji składowych harmonicznym przebiegu mocy sygnałem o częstotliwości ω_H . Kolejną składową, występującą we wzorze (4.3) jest składowa $\cos \omega_H t \cdot \cos \alpha$. Jej częstotliwość ω_H jest częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia. Amplituda tej

składowej zależy od przesunięcia fazowego pomiędzy prądem a napięciem zasilającym silnik.

Na podstawie wyprowadzonej zależności (4.3) można rozpatrzyć ogólny przypadek, w którym napięcie zasilające $u(t)$ jest wyrażone zależnością:

$$u(t) = \sum_{k=1}^n a_k U_m \sin(k\omega t - \alpha_k) \quad (4.4)$$

- gdzie: a_k – współczynnik udziału k -tej składowej harmonicznego napięcia w przebiegu napięcia,
 α_k – kąt przesunięcia fazowego k -tej składowej harmonicznego napięcia w stosunku do składowej podstawowej,

a przebieg prądu z uwzględnieniem składowej modulującej:

$$i_H(t) = \sum_{j=1}^l b_j I_m \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \cdot [1 + H \cos(\omega_H t)] \quad (4.5)$$

- gdzie: b_j – współczynnik udziału j -tej składowej harmonicznego prądu w przebiegu prądu,
 α_j – kąt przesunięcia fazowego j -tej składowej harmonicznego prądu, w stosunku do składowej podstawowej,
 β_j – kąt przesunięcia fazowego prądu względem napięcia dla j -tej harmonicznego

Wówczas, wykorzystując wzory (4.4) i (4.5), można wyznaczyć moc chwilową:

$$\begin{aligned} p(t) &= \sum_{k=1}^n a_k U_m \sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sum_{j=1}^m b_j I_m \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \cdot [1 + H \cos(\omega_H t)] = \\ &= \sum_{k=1}^n a_k U_m \sum_{j=1}^m b_j I_m \cdot [\sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \cdot [1 + H \cos(\omega_H t)]] = \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j U_m I_m \cdot \left[\sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) + \right. \\ &\quad \left. + H \sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \cdot \cos(\omega_H t) \right] = \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j U_m I_m \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(k\omega t - \alpha_k - j\omega t + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos(k\omega t - \alpha_k) \cdot \cos(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) + \\ + H \cdot \left(\begin{array}{l} \cos(k\omega t - \alpha_k - j\omega t + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos(k\omega t - \alpha_k) \cdot \cos(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right) \end{array} \right] \cdot \cos(\omega_H t) = \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j U_m I_m \cdot \left[\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ - \left(\begin{array}{l} \cos(k\omega t - \alpha_k + j\omega t - \alpha_j - \beta_j) + \\ + \sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right) + \\ + H \cdot \left(\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ - \left(\begin{array}{l} \cos(k\omega t - \alpha_k + j\omega t - \alpha_j - \beta_j) + \\ + \sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right] \cdot \cos(\omega_H t) = \\
 &= \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j U_m I_m \cdot \left[\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ + \sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) + \\ + H \cdot \left(\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ + \sin(k\omega t - \alpha_k) \cdot \sin(j\omega t - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right) \end{array} \right] \cdot \cos(\omega_H t) = \quad (4.6) \\
 &= \sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j \left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\frac{1}{2} \cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ + H \cdot \left(\begin{array}{l} \frac{1}{2} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\frac{1}{2} \cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right) \end{array} \right] \cdot \cos(\omega_H t) = \\
 &= UI \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j \left[\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ + H \cdot \left(\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) \cdot \cos(\omega_H t) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) \cdot \cos(\omega_H t) \end{array} \right) \end{array} \right] =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= UI \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j \left[\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ \left(\begin{array}{l} \cos(\omega_H t + (k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ + \sin(\omega_H t) \cdot \sin((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos(\omega_H t + (k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ -\sin(\omega_H t) \cdot \sin((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right) \end{array} \right] = \\
 &= UI \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j \left[\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ \left(\begin{array}{l} \cos(\omega_H t + (k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos(\omega_H t + (k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ + \cos(\omega_H t - (k-j)\omega t + \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ -\cos(\omega_H t - (k+j)\omega t + \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos(\omega_H t) \cdot \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ + \cos(\omega_H t) \cdot \cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right) \end{array} \right] = \quad (4.6) \\
 &= U \cdot I \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j \left[\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ \left(\begin{array}{l} \frac{1}{2} \cos(\omega_H t + (k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\frac{1}{2} \cos(\omega_H t + (k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ + \frac{1}{2} \cos(\omega_H t - (k-j)\omega t + \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ -\frac{1}{2} \cos(\omega_H t - ((k+j)\omega t + \alpha_k + \alpha_j + \beta_j)) \end{array} \right) \end{array} \right] = \\
 &= U \cdot I \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j \left[\begin{array}{l} \cos((k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos((k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) \end{array} \right] + \\
 &+ \frac{1}{2} U \cdot I \cdot H \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m a_k b_j \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(\omega_H t + (k-j)\omega t - \alpha_k + \alpha_j + \beta_j) + \\ -\cos(\omega_H t + (k+j)\omega t - \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ + \cos(\omega_H t - (k-j)\omega t + \alpha_k - \alpha_j - \beta_j) + \\ -\cos(\omega_H t - ((k+j)\omega t + \alpha_k + \alpha_j + \beta_j)) \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Na podstawie wyprowadzonych zależności można rozpatryć szczególny przypadek dla $k = j = 1$. Wówczas wyrażenie (4.6) uprości się do postaci:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= U \cdot I \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot [\cos \beta_1 - \cos(2\omega t - 2\alpha_1 - \beta_1)] + \\
 &+ \frac{1}{2} U \cdot I \cdot H \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(\omega_H t + \beta_1) + \\ -\cos(\omega_H t - 2\omega t + 2\alpha_1 + \beta_1) + \\ -\cos(\omega_H t + 2\omega t - \beta_1) + \\ +\cos(\omega_H t - 2\alpha_1 - \beta_1) \end{array} \right] = \\
 &= U \cdot I \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot [\cos \beta_1 - \cos(2\omega t - 2\alpha_1 - \beta_1)] + \\
 &+ \frac{1}{2} U \cdot I \cdot H \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \left[\begin{array}{l} 2 \cdot \cos(\omega_H t - \alpha_1) \cdot \cos(\alpha_1 + \beta_1) + \\ -\cos(\omega_H t - 2\omega t + 2\alpha_1 + \beta_1) + \\ -\cos(\omega_H t + 2\omega t - \beta_1) \end{array} \right] = \\
 &= U \cdot I \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot [\cos \beta_1 - \cos(2\omega t - 2\alpha_1 - \beta_1)] + \\
 &+ U \cdot I \cdot H \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot \left[\begin{array}{l} \cos(\omega_H t - \alpha_1) \cdot \cos(\alpha_1 + \beta_1) + \\ -\frac{1}{2} \cos(\omega_H t - 2\omega t + 2\alpha_1 + \beta_1) + \\ -\frac{1}{2} \cos(\omega_H t + 2\omega t - \beta_1) \end{array} \right]
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Na podstawie zależności (4.7) można określić składowe mocy chwilowej, występujące w przypadku zmodulowania przebiegu prądu sygnałem o częstotliwości charakterystycznej ω_H . Składowe $\cos\beta_1$ i $\cos(2\omega t - 2\alpha_1 - \beta_1)$ występują w mocy chwilowej niezależnie od obecności dodatkowej składowej modulującej przebieg prądu. Składowe $\cos(\omega_H t - 2\omega t + 2\alpha_1 + \beta_1)$ oraz $\cos(\omega_H t + 2\omega t - \beta_1)$ są rezultatem modulacji składowych harmonicznych przebiegu mocy sygnałem o częstotliwości ω_H . Kolejną składową, występującym we wzorze (4.7) jest składowa $\cos(\omega_H t - \alpha_1) \cdot \cos(\alpha_1 + \beta_1)$. Jej częstotliwość ω_H jest częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia. Amplituda tej składowej zależy od przesunięcia fazowego pomiędzy prądem a napięciem zasilającym silnik.

Obecność w widmie mocy chwilowej prądką o częstotliwości charakterystycznej dla określonego typu uszkodzenia w znaczący sposób ułatwi dokonanie oceny stanu technicznego badanych maszyn. Częstotliwość uszkodzenia jest łatwiejsza do obliczenia, aniżeli identyfikacja składowych, zmodulowanych sygnałem o częstotliwości charakterystycznej, jak ma to miejsce w metodach opartych na analizie widma prądu zasilającego silnik [6, 24, 25, 30, 35, 52, 67, 68, 72, 74]. Również zmniejszenie liczby obliczeń pośrednich, potrzebnych do określenia częstotliwości charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia, pozwoli na zwiększenie trafności diagnoz.

4.3. Podsumowanie

W rozdziale 4 została przedstawiona proponowana przez autora pracy metoda diagnostyki łożysk oparta na analizie przebiegów prądu i napięcia zasilającego silniki indukcyjne. Metoda ta opiera się na analizie widma, uzyskanego z iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny. W widmie tym występują składowe diagnostyczne, na podstawie których możliwe jest określenie stanu technicznego łożyska.

W rozdziale tym umieszczono wyniki obliczeń matematycznych, wykonanych przez autora pracy, których celem było teoretyczne potwierdzenie wpływu uszkodzeń łożysk na pojawienie się dodatkowych składowych harmonicznych w widmie mocy chwilowej, związanych z częstotliwościami charakterystycznymi dla uszkodzeń łożysk.

Obliczenia przeprowadzone zostały zarówno dla przypadku, w którym w przebiegach prądu i napięcia występuje tylko składowa podstawowa, jak również dla ogólnego przypadku, w którym przebiegi napięcia i prądu opisane są zależnościami, uwzględniającymi obecność składowej podstawowej i jej harmonicznych.

Do obliczeń przyjęto model zjawisk, odwzorowujący wpływ uszkodzeń łożysk na pojawienie się dodatkowych składowych harmonicznych w widmie mocy chwilowej, związanych z częstotliwościami charakterystycznymi dla uszkodzeń łożysk. Uszkodzenia łożysk symulowane były przez wprowadzenie dodatkowej składowej modulującej przebieg prądu, o częstotliwości charakterystycznej ω_H .

Przeprowadzone obliczenia matematyczne potwierdziły założenia przyjętego modelu zjawisk zachodzących w silniku indukcyjnym – w widmie iloczynu napięcia zasilania i prądu stojana pojawiają się składowe harmoniczne o częstotliwościach związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Wyniki przeprowadzonych obliczeń potwierdziły również fakt, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości wprowadzonego zaburzenia.

Przedstawiono również zalety nowej metody w porównaniu z obecnie stosowanymi metodami prądowej diagnostyki łożysk silników indukcyjnych. Występująca w widmie mocy chwilowej w sposób jawny składowa o częstotliwości uszkodzenia jest łatwiejsza do obliczenia, aniżeli identyfikacja składowych, zmodulowanych sygnałem o częstotliwości charakterystycznej, jak ma to miejsce w metodach opartych na analizie widma prądu zasilającego silnik.

5. Badania symulacyjne

W rozdziale tym zostały przedstawione wyniki przeprowadzonych przez autora rozprawy badań uproszczonego modelu matematycznego jednej fazy silnika indukcyjnego opracowanego w programie PSpice. Omówiono uzyskane wyniki badań wpływu uszkodzeń łożysk na iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny.

Opisano również obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego, wykorzystany do dalszych badań symulacyjnych, związanych z wykorzystaniem nowej metody analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych.

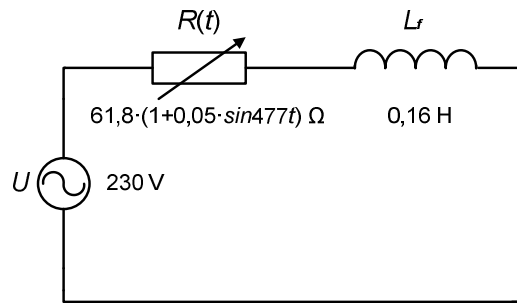
Przedstawiono również wyniki przeprowadzonych przez autora rozprawy badań obwodowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego dla różnych typów uszkodzeń łożysk silników indukcyjnych przy różnych wartościach momentu obciążenia maszyn.

Dokonano również analizy uzyskanych wyników badań symulacyjnych wraz ze wskazaniem składowych możliwych do wykorzystania w diagnostyce łożysk.

5.1. Wprowadzenie

W badaniach symulacyjnych [16, 19], przyjęto model zjawisk zachodzących w silniku polegający na tym, iż odkształcenia prądu i napięcia są skutkiem nieregularności momentu obciążenia silnika, które powodowane są zmiennym momentem oporowym od uszkodzonego łożyska. Pojawiające się odkształcenia mają postać dodatkowych harmonicznym widma, pojawiających się wskutek modulacji przebiegów sygnałami o częstotliwościach charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia. W rozdziale 4.2 rozprawy autor przedstawił wyniki przeprowadzonych obliczeń matematycznych, które potwierdziły założenia przyjętego modelu.

Do wstępnych badań symulacyjnych wybrano uproszczony model uzwojenia jednej fazy stojana silnika indukcyjnego. Wartości rezystancji R_f i indukcyjności L_f jednej fazy silnika wyznaczono na podstawie następujących danych znamionowych silnika indukcyjnego STg80X-4C: $P_n = 1,1$ kW, $U_n = 400/230$ V, $n_n = 1400$ obr/min, $I_n = 2,9/5$ A [80]. Schemat uproszczonego modelu jednej fazy silnika indukcyjnego przedstawiony jest na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Uproszczony schemat zastępczy jednej fazy silnika indukcyjnego, składający się z zmiennej czynie rezystancji $R(t)$ oraz stałej indukcyjności L_f

Do obliczeń wykorzystano uproszczone zależności na impedancję, rezystancję oraz reaktancję jednej fazy silnika indukcyjnego klatkowego (wzory 5.1 do 5.4).

Impedancja Z_f jednej fazy silnika indukcyjnego wynosi:

$$Z_f = \frac{U_f}{I_f} = \frac{230}{2,9} = 79,3 \Omega \quad (5.1)$$

gdzie: U_f – napięcie fazowe silnika indukcyjnego,
 I_f – prąd fazowy silnika indukcyjnego

Rezystancja R_f jednej fazy silnika została obliczona jako:

$$R_f = Z_f \cdot \cos \varphi = 79,3 \cdot 0,78 \cong 61,9 \Omega \quad (5.2)$$

Wówczas reaktancja X_f wynosi:

$$X_f = \sqrt{Z_f^2 - R_f^2} = \sqrt{(79,3)^2 - (61,9)^2} \cong 49,6 \Omega \quad (5.3)$$

Zatem indukcyjność L_f jest w przybliżeniu równa:

$$L_f = \frac{X_f}{\omega} = \frac{49,6}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,16 \text{ H} \quad (5.4)$$

Model ten składa się z rezystancji R_f zmiennej w czasie, zgodnie z zależnością:

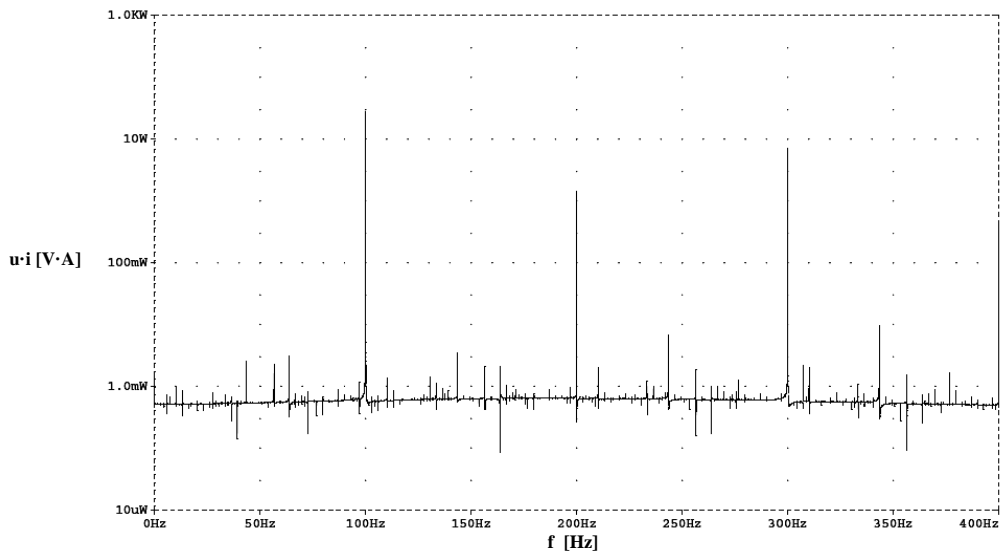
$$R(t) = R_f \cdot (1 + H \cdot \cos(\omega t)) \quad (5.5)$$

gdzie: H – współczynnik, określający udział składowej zmiennej rezystancji $R(t)$.

Uzasadnieniem takiego wyboru modelu jest fakt, iż zmiana momentu oporowego od uszkodzonego łożyska, wpływa na nieregularność momentu obciążenia, co w konsekwencji przekłada się na chwilowe wahania mocy czynnej, pobieranej przez silnik a z mocą czynną powiązana jest rezystancja.

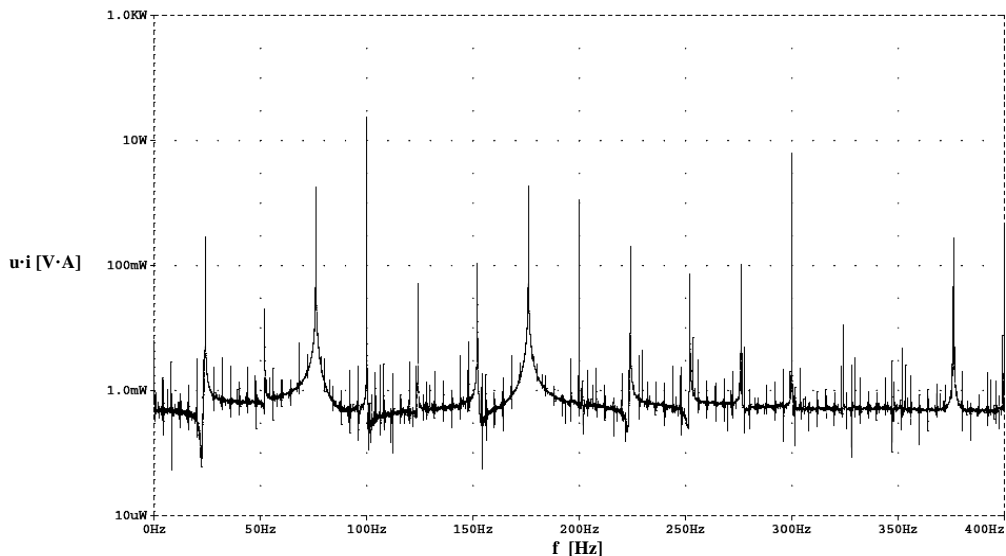
W przeprowadzonych przez autora pracy badaniach symulacyjnych, których wyniki przedstawiono poniżej założono obecność pierwszej, trzeciej i piątej harmonicznej w napięciu zasilającym. Wartości amplitud harmoniczných napięcia zasilającego zostały dobrane na podstawie wyników pomiarów THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) przeprowadzonych w budynku Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Zawartość harmoniczných: trzeciej i piątej w napięciu sieci zasilającej wynosiła odpowiednio: 4,5% i 6%.

Dla przyjętych wyżej danych przeprowadzono badania symulacyjne uproszczonego modelu matematycznego silnika indukcyjnego. W tym celu wykorzystany został program symulacyjny PSpice. Autor rozprawy przeprowadził badania symulacje dla przypadku prostego obwodu RL z rezystancją stałą w czasie oraz z rezystancją zmienną w czasie, zgodnie z zależnością (5.5). Na rysunku 5.2 podano wyniki obliczeń iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego silnik, uzyskane w procesie symulacji, ze stałą w czasie wartością rezystancji.



Rys. 5.2. Widmo mocy chwilowej, uzyskane w programie PSpice dla przypadku prostego obwodu RL z rezystancją stałą w czasie

W widmie mocy chwilowej dla silnika bez uszkodzeń widoczne są prążki o częstotliwościach: 100 Hz, 200 Hz i 300 Hz (odpowiednio: $2f$, $4f$, $6f$). Składowe te wynikają z harmonicznego napięcia zasilania. Pozostałe prążki wynikają z ograniczeń obliczeń numerycznych i stanowią tzw. „szum obliczeniowy”. Na rysunku 5.3 podano wyniki obliczeń iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego silnik, uzyskane w procesie symulacji, ze zmienną w czasie wartością rezystancji $R(t)$.



Rys. 5.3. Widmo mocy chwilowej, uzyskane w programie PSpice dla przypadku prostego obwodu RL z rezystancją zmienną w czasie

Uszkodzenie stojana zasymulowano wprowadzając rezystancję składającą się z dwóch składowych: stałej i zmiennej o częstotliwości $f_H = 76$ Hz .

W przypadku symulacji pracy silnika uszkodzonego, w widmie mocy chwilowej, oprócz składowych, wynikających z obecności harmonicznego napięcia, pojawiają się prążki o częstotliwościach 24 Hz, 76 Hz, 124 Hz, 152 Hz, 176 Hz, 224 Hz i 276 Hz, przy czym 76 Hz i 152 Hz to pierwsza i druga harmoniczna częstotliwości symulowanych zmian zmiennej w czasie rezystancji.

Natomiast składowe 24 Hz i 176 Hz stanowią kombinację częstotliwości: $2f - f_H$ i $2f + f_H$, składowe: 124 Hz i 276 Hz to kombinacja częstotliwości $4f - f_H$ i $4f + f_H$, a prążek o częstotliwości 224 Hz jest kombinacją częstotliwości $6f - f_H$.

Wstępne badania uproszczonego modelu matematycznego silnika potwierdziły słuszność obliczeń i wniosków, opracowanych w rozdziale 4.

Po wykonaniu badań symulacyjnych uproszczonego modelu matematycznego silnika składającego się z zmiennej w czasie rezystancji oraz indukcyjności autor pracy przeprowadził badania obwodowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego. Opis wykorzystanego do badań modelu silnika oraz wyniki badań symulacyjnych zamieszczono w kolejnych podrozdziałach pracy.

5.2. Obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego

Wykorzystany do badań obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego klatkowego został opracowany przez prof. J. Ruska z Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie i w ramach współpracy z Katedrą Metrologii i Systemów Informacyjnych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej został adoptowany do potrzeb badań w dziedzinie diagnostyki łożysk [18, 54]. Poniżej przedstawiono opis modelu matematycznego silnika indukcyjnego na podstawie źródeł przekazanych przez autora modelu [55, 56, 57, 58].

Model bazuje na założeniu, które polega na tym, iż maszyna dzielona jest na szereg elementów skupionych, dla których wyznaczane są funkcje stanu. W większości przypadków, dla ułatwienia obliczeń, pojedyncza cewka w uzwojeniu fazowym stojana traktowana jest jako podstawowy element skupiony. Takie podejście umożliwia wyznaczenie zarówno indukcyjności własnych i wzajemnych w obwodzie stojana jak również indukcyjności wzajemnych pomiędzy cewkami stojana i oczkami klatki wirnika. W modelu silnika pasmo fazowe stanowią połączone ze sobą, w odpowiedniej konfiguracji, cewki. Natomiast klatka wirnika reprezentowana jest przez szereg oczek, które są zwarte poprzez sąsiadujące pręty i fragmenty pierścieni.

Początkowo model matematyczny został opracowany przy założeniu, że uszkodzenia łożysk powodują mechaniczne przemieszczenia pomiędzy stojanem i wirnikiem, co skutkuje pojawieniem się oscylacji szczeliny powietrznej. Wobec powyższego indukcyjności własne i wzajemne uzwojeń silnika zostają zmodulowane zgodnie z częstotliwością tych przemieszczeń. Tym samym modulacji ulega prąd w uzwojeniu stojana silnika [18, 54, 56, 57, 68].

Uproszczeniem w modelu jest przybliżenie ruchu wibracjami wirnika zależnymi od pełnych wielokrotności kąta obrotu wirnika. Założenie to pozwoliło na adaptację modelu matematycznego, który pierwotnie pozwalał na obliczenia diagnostyczne

silnika indukcyjnego klatkowego z uwzględnieniem ekscentryczności statycznej i dynamicznej oraz ułobkowania do diagnostyki łożysk [18, 54, 56, 57].

W modelu przyjęto, że osie stojana i wirnika pozostają do siebie równoległe, również w przypadku pojawienia się wibracji wirnika, pochodzących od uszkodzonego łożyska. Takie przybliżenie powoduje, iż ruch wirnika będzie podobny do ruchu wirnika z ekscentrycznością statyczną, zmieniającą się wraz z wielokrotnością kąta obrotu wirnika. Z powyższego wynika, iż nierównomierność szczeliny powietrznej jest funkcją aktualnego położenia kąтового wirnika.

Model uwzględnia ułobkowanie wirnika oraz nasycenie magnetyczne w zębach i jarzmach stojana i wirnika, które uzyskano poprzez powiększenie obliczeniowej grubości szczeliny powietrznej. Natomiast pomijane są prądy skrośne płynące od pręta do pręta, poprzez żelazo [18, 54, 55, 56, 57].

Modelem matematycznym jest układ równań różniczkowych dla liniowo niezależnych obwodów, obejmujących gałęzie równoległe pasm stojana i oczka zewnętrzne klatki wirnika. Uwzględniane jest również równanie jednego pierścienia zwierającego klatki. Ze względu na liniową zależność równania drugiego pierścienia od poprzednich, równanie to zostało pominięte [58].

W zaimplementowanym modelu macierz współczynników indukcyjności własnych stojana i wirnika oraz indukcyjności wzajemnych stojan – wirnik obliczana jest numerycznie dla kilkuset położenia kątowych wirnika.

Indukcyjność wzajemną pomiędzy dwoma dowolnymi elementarnymi obwodami jednozwojnymi, np. obwodem 1 i 3 obliczana jest na podstawie zależności (5.6).

$$L_{13} = \Lambda_{13} - \frac{\Lambda_1 \cdot \Lambda_3}{\Lambda_u} \quad (5.6)$$

gdzie:

- Λ_{13} jest permeancją odcinka szczeliny powietrznej, dla strumienia głównego, czyli sprzęgającego uzwojenia stojana i wirnika, na długości na której obwody elementarne 1 i 3 zachodzą na siebie, wyznaczona jako:

$$\Lambda_{13} = \mu_0 r l \int_{\text{"1" \cap "3"}} \lambda(x) dx \quad (5.7)$$

- Λ_1 jest permeancją odcinka szczeliny powietrznej, dla strumienia głównego, na długości obwodu elementarnego 1, obliczono ze wzoru:

$$\Lambda_1 = \mu_0 r l \int_{"1"} \lambda(x) dx \quad (5.8)$$

- Λ_3 to permeancja odcinka szczeliny powietrznej, dla strumienia głównego, na długości obwodu elementarnego 3, wyznaczona jako:

$$\Lambda_3 = \mu_0 r l \int_{"3"} \lambda(x) dx \quad (5.9)$$

- Λ_u jest permeancją całej szczeliny powietrznej, dla strumienia głównego, tzn. na długości od 0 do 2π , plus permeancja dla strumienia unipolarnego (przyjęta jako zerowa), obliczoną ze wzoru:

$$\Lambda_u = \mu_0 r l \int_{"0-2\pi"} \lambda(x) dx \quad (5.10)$$

Elementarne obwody jednozwojne są tu rozumiane jako obwody umieszczone w szczelinie powietrznej, reprezentujące obwody rzeczywiste zanurzone w żłobkach. Obwody te sprzęgać się muszą z takimi samymi częściami strumienia głównego jak obwody rzeczywiste. W implementacji przyjęto, że położenia boków obwodów elementarnych pokrywają się z osiami żłobków, odpowiednio stojana lub wirnika. Wzór (5.6) jest słuszny tylko przy założeniu nieskończenie wielkiej przenikalności żelaza, tak stojana jak i wirnika. Występujące w równaniu (5.6) permeancje Λ_1 , Λ_3 , Λ_{13} , Λ_u oblicza się numerycznie przy założeniu radialności linii pola magnetycznego głównego w szczelinie powietrznej, z uwzględnieniem lokalnej grubości szczeliny, zależnej od kąta obrotu wirnika φ , użłobkowania stojana i wirnika, ekscentryczności statycznej i dynamicznej, oraz w zależności od bicia osi obrotu wirnika od uszkodzonego łożyska.

Oprócz indukcyjności głównych, obliczanych w podany wyżej sposób, w modelu maszyny uwzględnia się także indukcyjności od strumienia rozproszenia. Oblicza się je klasycznie, z uwzględnieniem stopnia nasycenia uzależnionego od amplitudy wektora przestrzennego prądów stojana. Indukcyjności te są niezależne od kąta obrotu wirnika.

Następnie obliczane są pochodne indukcyjności względem kąta obrotu wirnika, wykorzystywane do obliczenia momentu elektromagnetycznego, występującego w równaniu mechanicznym. W równaniach różniczkowych uwzględniane są także współczynniki indukcyjności rozproszenia, niezależne do kąta położenia wirnika.

Niecentryczność jak i użłobkowanie odwzorowywane są poprzez wydłużenie linii pola magnetycznego. Zatem użłobkowanie skutkuje obniżką permeancji pod szczerbami stojana i wirnika. Nasylenie żłobków zostało zrealizowane poprzez sztuczne powiększenie szerokości szczeliny. W celu uwzględnienia aktualnej konfiguracji uzwojenia, założono, że stojan zawiera cewki *NZ*, umieszczone w żłobkach *NS*. Zakłada się również, że te cewki początkowo pozostają oddzielone od siebie. Każda z tych cewek może posiadać indywidualną długość i liczbę zwojów. Zakłada się również, że wirnik posiada jedną klatkę, która zostanie opisana przez szereg oczek zwartych poprzez sąsiadujące pręty i fragmenty pierścieni. Każde oczko tworzą dwa sąsiednie pręty, połączone przez dwa końcowe odcinki pierścieni. Dodatkowo zostało uwzględnione również równanie jednego pierścienia zwierającego klatki.

W przypadku wyżej opisanej struktury, można napisać standardowe równania Kirchhoffa.

$$V_S = R_S i_S + \frac{d}{dt} L_S i_S + \frac{d}{dt} L_{SR} i_R \quad (5.11)$$

$$0 = R_R i_R + \frac{d}{dt} L_R i_R + \frac{d}{dt} L_{RS} i_S \quad (5.12)$$

$$0 = N_R R_{seg} i_{seg} - R_{seg} i_R^T + \frac{d}{dt} (N_R L_{seg} + L_{unip}) i_{seg} - \frac{d}{dt} L_{seg} i_R^T \quad (5.13)$$

Równanie (5.11), w formie macierzy lub wektora, odnosi się do podstawowych cewek stojana. Natomiast równanie (5.12), również w formie macierzy lub wektora, odnosi się do oczek klatki wirnika. Równanie (5.13) dotyczy pierścienia zwierającego klatki.

Obliczenia polegają na numerycznym całkowaniu równań różniczkowych zwyczajnych opisujących liniowo niezależne obwody stojana, oczka klatki wirnika, oczko jednego pierścienia zwierającego oraz dwu-bezwładnościowy układ mechaniczny (wirnik, nieliniowe elastyczne sprzęgło i bezwładność obciążenia).

Część elektryczną modelu matematycznego maszyny indukcyjnej stanowią równania różniczkowe (5.14).

$$\frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi} = \mathbf{V} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{I} \quad (5.14)$$

- gdzie: $\boldsymbol{\psi}$ – wektor strumieni sprzężonych ze wszystkimi liniowo niezależnymi obwodami stojana i z oczkami klatki wirnika i oczkiem jednego pierścienia zwierającego,
- \mathbf{V} – wektor napięć na niezależnych obwodach uzwojeń stojana i zerowych napięć oczek klatki wirnika,
- \mathbf{R} – macierz rezystancji własnych i wzajemnych liniowo niezależnych obwodów stojana i oczek klatki wirnika i oczka jednego pierścienia zwierającego,
- \mathbf{I} – wektor liniowo niezależnych prądów stojana i prądów oczkowych oczek klatki wirnika oraz prądu oczkowego jednego pierścienia zwierającego.

W każdym kroku całkowania, obliczenie nowych wartości strumienia sprzężonego $\boldsymbol{\psi}$ wymaga znajomości wektora prądu \mathbf{I} odpowiadającego aktualnej wartości strumienia $\boldsymbol{\psi}$. Prądy te oblicza się z zależności (5.15).

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{I} \quad (5.15)$$

- gdzie: \mathbf{L} – macierz indukcyjności własnych liniowo niezależnych obwodów stojana i oczek klatki wirnika oraz oczka jednego pierścienia zwierającego.

Poszczególne indukcyjności zawarte w macierzy \mathbf{L} zależą od kąta położenia wirnika φ . Kąt ten wynika z całkowania równania mechanicznego (5.16).

$$\mathbf{J} \frac{d\omega}{dt} = \mathbf{T}_{em} + \mathbf{T}_{ex} \quad (5.16)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega \quad (5.17)$$

- gdzie: \mathbf{J} – moment bezwładności wirnika silnika,
 \mathbf{T}_{em} – moment elektromagnetyczny generowanym przez silnik,
 \mathbf{T}_{ex} – moment zewnętrzny, przenoszony przez sprzęgło.

Równanie (5.16) musi być uzupełnione o równanie bezwładności maszyny obciążającej, z uwzględnieniem charakterystyki sprzęgła.

Występujący w zależności (5.16) moment elektromagnetyczny wynika z wyrażenia (5.18).

$$T_{em} = \frac{1}{2} i_s^T \frac{\partial}{\partial \varphi} L_S i_s + i_s^T \frac{\partial}{\partial \varphi} L_{SR} i_R + \frac{1}{2} i_R^T \frac{\partial}{\partial \varphi} L_R i_R \quad (5.18)$$

Ogólnie równanie momentu elektromagnetycznego można zapisać w postaci:

$$T_{em} = \mathbf{I}^T \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} \mathbf{L} \right) \cdot \mathbf{I} \quad (5.19)$$

Jak wynika z równań (5.13) i (5.19), ważne jest określenie macierzy indukcyjności \mathbf{L} oraz macierzy ich pochodnych, dla każdej aktualnej wartości kąta φ .

Równanie (5.11), po uwzględnieniu zależności (5.20):

$$i_s = \mathbf{C} \mathbf{I}_s \quad (5.20)$$

można zapisać w postaci:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{V}_s = \mathbf{C}^T \mathbf{R}_s \mathbf{C} \mathbf{I}_s + \frac{d}{dt} \mathbf{C}^T \mathbf{L}_s \mathbf{C} \mathbf{I}_s + \frac{d}{dt} \mathbf{C}^T \mathbf{L}_{SR} i_R \quad (5.21)$$

lub

$$\mathbf{V}_s^{\sim} = \mathbf{R}_s^{\sim} \mathbf{I}_s + \frac{d}{dt} \mathbf{L}_s^{\sim} \mathbf{I}_s + \frac{d}{dt} \mathbf{L}_{SR}^{\sim} i_R \quad (5.22)$$

gdzie:

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{R}_s i_s + \frac{d}{dt} \mathbf{L}_s i_s + \frac{d}{dt} \mathbf{L}_{SR} i_R \quad (5.23)$$

$$\mathbf{V}_s^{\sim} = \mathbf{C}^T \mathbf{V}_s \quad (5.24)$$

$$\mathbf{R}_s^{\sim} = \mathbf{C}^T \mathbf{R}_s \mathbf{C} \quad (5.25)$$

$$\mathbf{L}_s^{\sim} = \mathbf{C}^T \mathbf{L}_s \mathbf{C} \quad (5.26)$$

$$\tilde{L}_{SR} = C^T L_{SR} \quad (5.27)$$

Podstawiając wyrażenie (5.20) do równania (5.12), po przekształceniach otrzymuje się zależność (5.28):

$$0 = R_R i_R + \frac{d}{dt} L_R i_R + \frac{d}{dt} \tilde{L}_{SR}^T I_S \quad (5.28)$$

Wykorzystując powyższe zależności można napisać wyrażenie opisujące moment elektromagnetyczny:

$$T_{em} = \frac{1}{2} I_S^T \frac{\partial}{\partial \varphi} \tilde{L}_S I_S + I_S^T \frac{\partial}{\partial \varphi} \tilde{L}_{SR} i_R + \frac{1}{2} i_R^T \frac{\partial}{\partial \varphi} L_R i_R \quad (5.29)$$

Podsumowując, pełny układ równań stanowiących model matematyczny składa się z równań (5.24), (5.28), (5.13), (5.16), (5.17) i wzoru (5.29). [54, 58].

Implementacja komputerowa składa się z pakietu czterech programów: dpa1, dinl6, dde18 i ddy20. W plikach sterujących pakietem programów można wprowadzić wartości następujących wielkości:

- harmonicznym sieci zasilającej: 1, 3, 5, 7, 9, przy czym harmoniczna pierwsza ma częstotliwość 50 Hz,
- momentu obciążenia maszyny jako procent obciążenia znamionowego,
- zmiennego momentu oporowego o częstotliwości równej wielokrotności prędkości obrotowej,
- bicia sprzęgła jako procent momentu znamionowego sprzęgła,
- ekscentryczności statycznej jako procent grubości geometrycznej szczeliny,
- ekscentryczności dynamicznej jako procent grubości geometrycznej szczeliny,
- momentu obciążenia maszyny jako procent obciążenia znamionowego,
- wibracji wirnika o częstotliwości równej całkowitej krotności częstotliwości wirowania wirnika,
- amplitudy tych wibracji jako procent grubości szczeliny powietrznej.

Obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego prof. J. Ruska przedstawiony powyżej, dla celów niniejszych badań został rozbudowany o możliwość symulowania uszkodzeń łożysk, przy założeniu, że za modulację prądu odpowiedzialne są wahania momentu oporowego, pochodzącego od uszkodzonego łożyska. Ponieważ

każdy kontakt uszkodzonego fragmentu łożyska z innym elementem łożyska powoduje chwilowy wzrost momentu oporowego co prowadzi do chwilowego wzrostu mocy czynnej pobieranej przez silnik to w sytuacji, gdy maszyna zasilana jest napięciem wymuszonym przez źródło, pojawiają się zaburzenia prądu stojana.

Symulowanie uszkodzeń łożysk odbywa się poprzez wprowadzenie zmiennego w czasie momentu oporowego, zależnego od wielokrotności kąta obrotu wirnika.

Wykonanie obliczeń dla odpowiednio długiego czasu prowadzi do uzyskania przebiegów ustalonych, w tym również przebiegów ustalonych prądów stojana oraz napięcia zasilającego silnik, które następnie poddawane są analizie Fouriera. Uzyskane wyniki obliczeń pozwalają na odwzorowanie składowych widma, pojawiających się na skutek uszkodzeń łożysk [18, 54, 56, 57, 58].

5.3. Wyniki badań obwodowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego

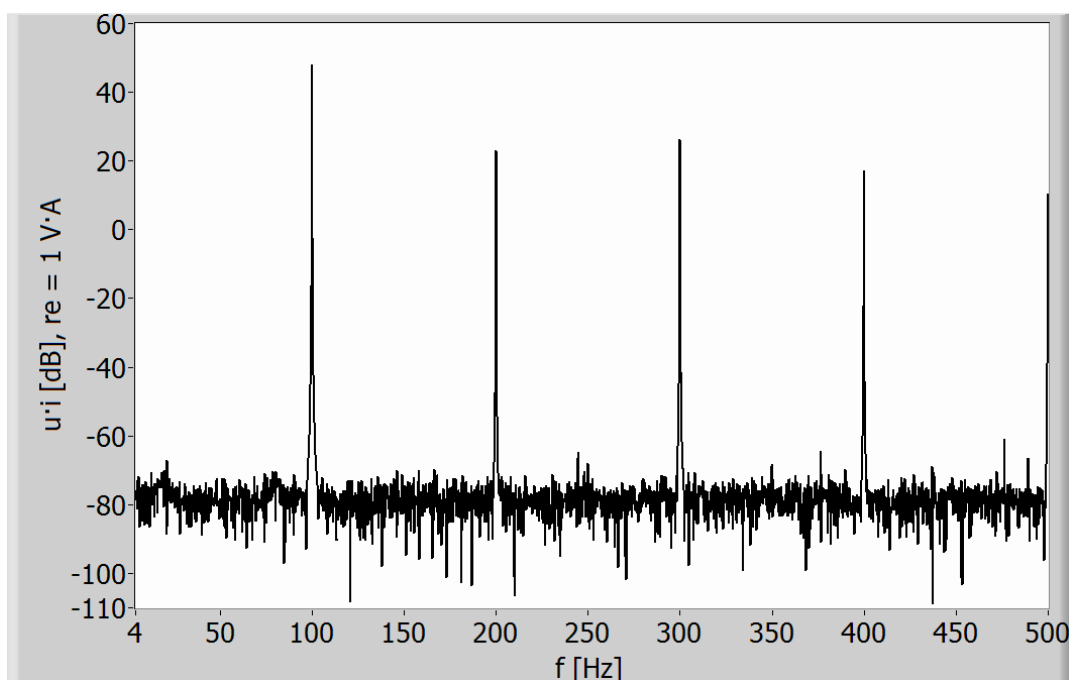
Autor pracy do badań symulacyjnych przyjął model zjawisk zachodzących w silniku przy założeniu, że odkształcenia prądu i napięcia są skutkiem nieregularności momentu obciążenia silnika, które powodowane są zmiennym momentem oporowym od uszkodzonego łożyska. Przejawem tych odkształceń są dodatkowe harmoniczne widma prądu, będące rezultatem modulacji przebiegów prądu sygnałami o częstotliwościach charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia. W literaturze znane są zależności [5, 6, 8, 20, 23, 24, 25, 31, 35, 60, 68, 71, 72, 75], dzięki którym, na podstawie parametrów budowy łożyska oraz prędkości obrotowej maszyny, można wyznaczyć częstotliwości wibracji, charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń.

Badania symulacyjne przeprowadzane zostały dla silników indukcyjnych typu STg80X-4C o parametrach: $P_n = 1,1$ kW, $U_n = 400/230$ V, $n_n = 1400$ obr/min, $I_n = 2,9/5$ A, liczba żłobków stojana – 24, liczba żłobków wirnika – 22 [79].

Autor rozprawy przeprowadził badania symulacje wykorzystując obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego dla silników bez uszkodzeń oraz dla silników z uszkodzonymi łożyskami [16, 18, 19].

5.3.1. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego

Na podstawie symulacji uzyskano widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego. Wynik symulacji przedstawiony jest na rysunku 5.4.



Rys.5.4. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego przy obciążeniu równym 100% momentu znamionowego

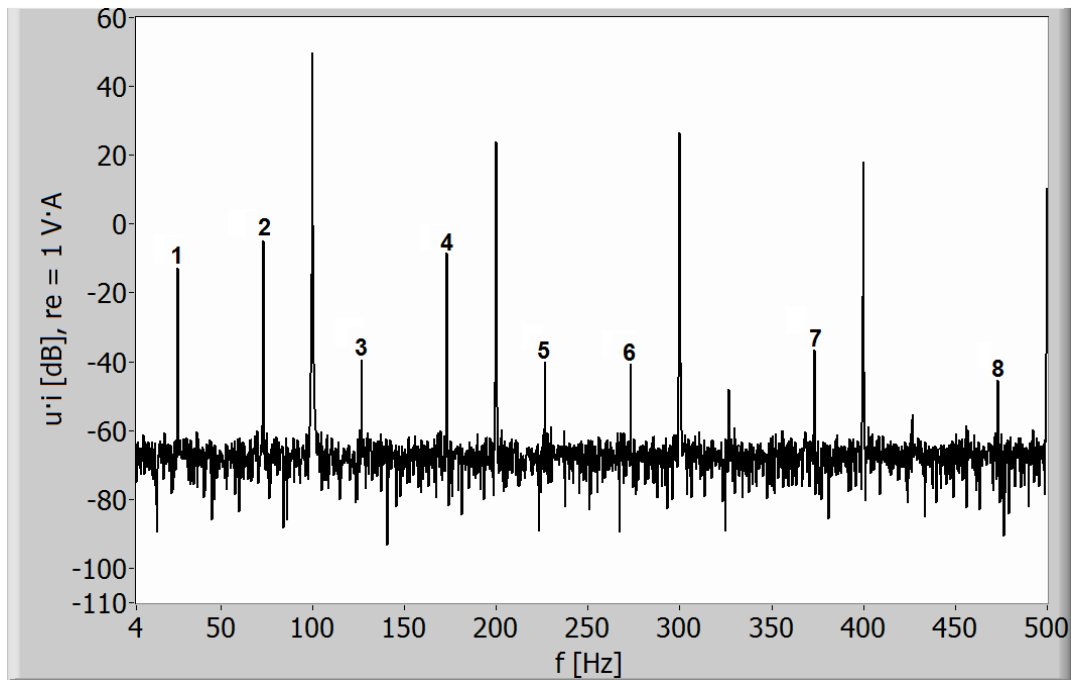
W widmie mocy chwilowej dla silnika bez uszkodzeń widoczne są prążki o częstotliwościach: 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz i 500 Hz (odpowiednio: $2f$, $4f$, $6f$, $8f$ i $10f$). Wszystkie składowe w widmie przedstawionym na rysunku wynikają z normalnej pracy maszyny i są zgodne z oczekiwaniami. Składowe te wynikają z obecności harmonicznych napięcia zasilającego silnik.

5.3.2. Widmo mocy chwilowej dla silnika uszkodzonego

Uszkodzenia zasymulowano wprowadzając oscylacje momentu obciążenia z częstotliwościami charakterystycznymi dla określonych typów uszkodzeń. Badania wykonano dla różnych momentów obciążenia badanych silników przy pięciu harmonicznych napięcia zasilającego. Zawartość harmonicznych: trzeciej, piątej, siódmej i dziewiątej w napięciu sieci zasilającej została określona na podstawie pomiarów THD i wynosiła odpowiednio: 4,5%, 6%, 3,5%, 1,5%. Założono iż kąty przesunięcia pomiędzy poszczególnymi harmonicznymi napięcia wynoszą 0° .

5.3.2.1. Silnik z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska

Uszkodzenie łożyska zasymulowano wprowadzając oscylację momentu obciążenia z częstotliwością $f_H = 73,1$ Hz. Jest to częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia bieżni zewnętrznej łożyska typu 6204 przy obciążeniu silnika momentem znamionowym. Na rysunku 5.5 przedstawiono wynik symulacji dla silnika z uszkodzeniem pierścienia zewnętrznego łożyska.

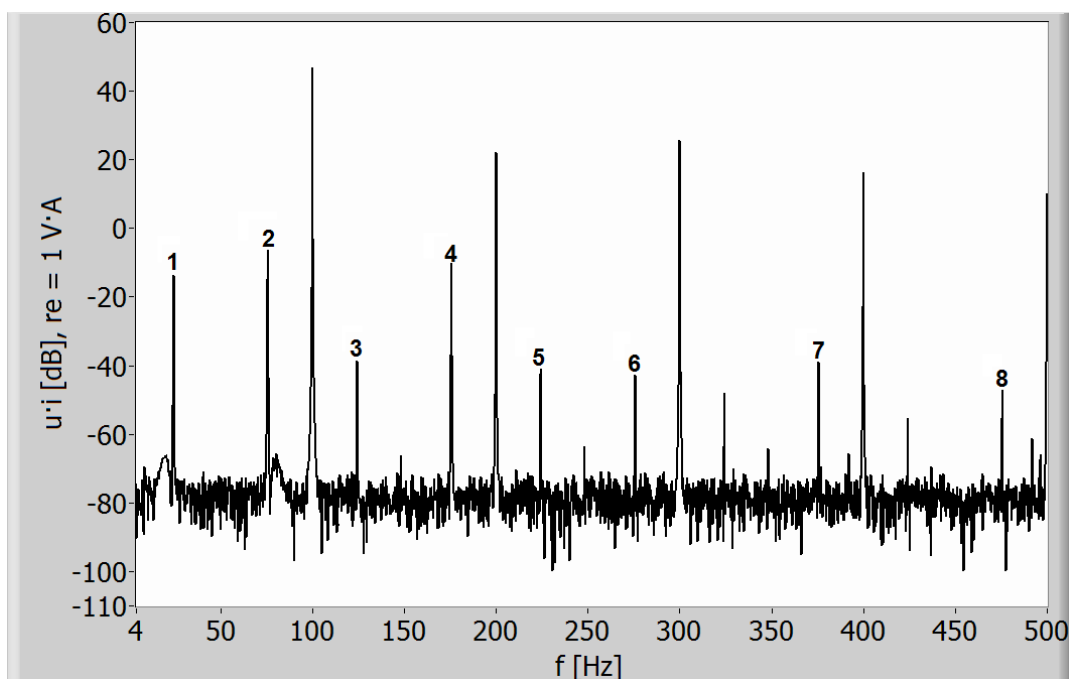


Rys.5.5. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym łożyska przy obciążeniu równym 100% momentu znamionowego

W otrzymanych wynikach występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 73,1$ Hz (prążek numer 2). Ponadto w widmie obecne są częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną. Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 26,9 Hz, 126,9 Hz, 173,1 Hz, 226,9 Hz, 273,1 Hz, 373,1 Hz i 473,1 Hz (odpowiednio prążki numer 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Składowe 26,9 Hz oraz 173,1 Hz są kombinacją częstotliwości: $2 \cdot f - f_H$ i $2 \cdot f + f_H$ przy czym f jest częstotliwością napięcia zasilającego a f_H jest częstotliwością wprowadzonej oscylacji zmiennego momentu oporowego. Prążki o częstotliwościach 126,9 Hz i 273,1 Hz to kombinacja częstotliwości $2 \cdot f - f_H$ i $2 \cdot f + f_H$. Prążki o częstotliwościach 226,9 Hz

i 373,1 Hz to kombinacja częstotliwości $6 \cdot f - f_H$ i $6 \cdot f + f_H$. Natomiast składowa o częstotliwości 473,1 Hz to kombinacja częstotliwości $8 \cdot f + f_H$.

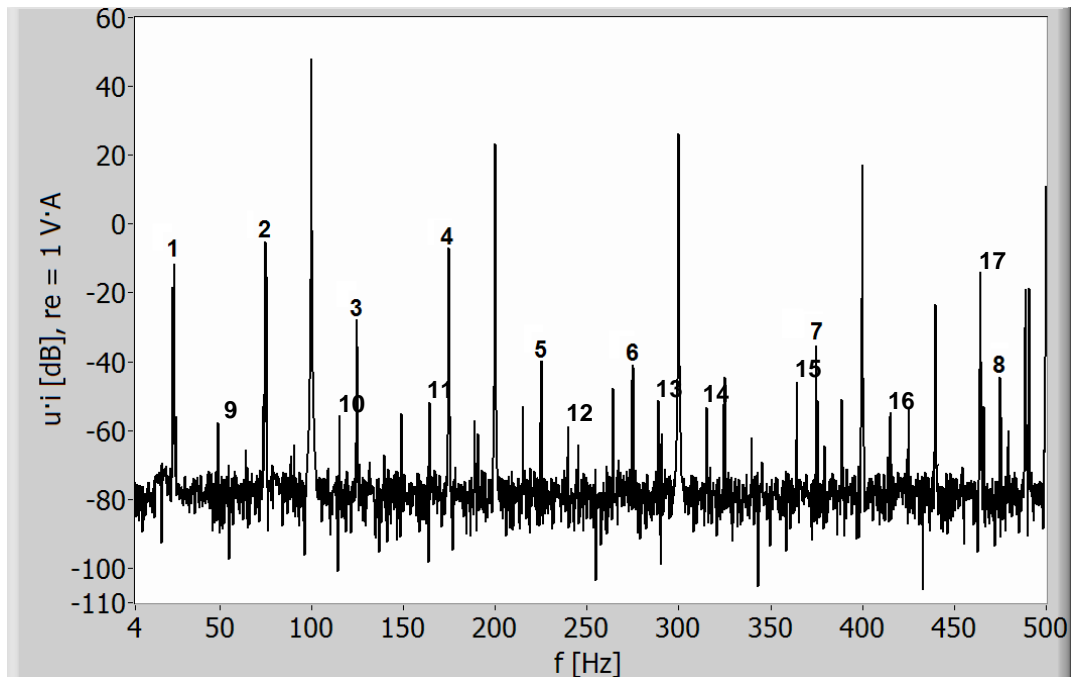
Celem sprawdzenia wpływu obciążenia oraz ekscentryczności statycznej i dynamicznej na składowe, występujące w widmie mocy chwilowej, przeprowadzono badania symulacyjne dla innych wartości momentu obciążenia przy wprowadzeniu dodatkowych zakłóceń w postaci ekscentryczności statycznej i dynamicznej. Na rysunku 5.6 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, będące rezultatem symulacji dla silnika z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym łożyska, przy obciążeniu równym 20% momentu znamionowego.



Rys.5.6. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym łożyska przy obciążeniu równym 20% momentu znamionowego

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że w widmie mocy chwilowej występuje zarówno składowa charakterystyczna dla uszkodzenia f_H (prążek numer 2) jak również składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Przy zmianie obciążenia zmieniają się jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmoniczných. Na rysunku 5.7 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, będące rezultatem symulacji dla silnika z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym łożyska, przy obciążeniu równym 50% momentu znamionowego i obecności ekscentryczności statycznej oraz ekscentryczności dynamicznej. Ekscentryczność statyczna

i ekscentryczność dynamiczna została wprowadzona na poziomie 20% grubości geometrycznej szczeliny powietrznej.



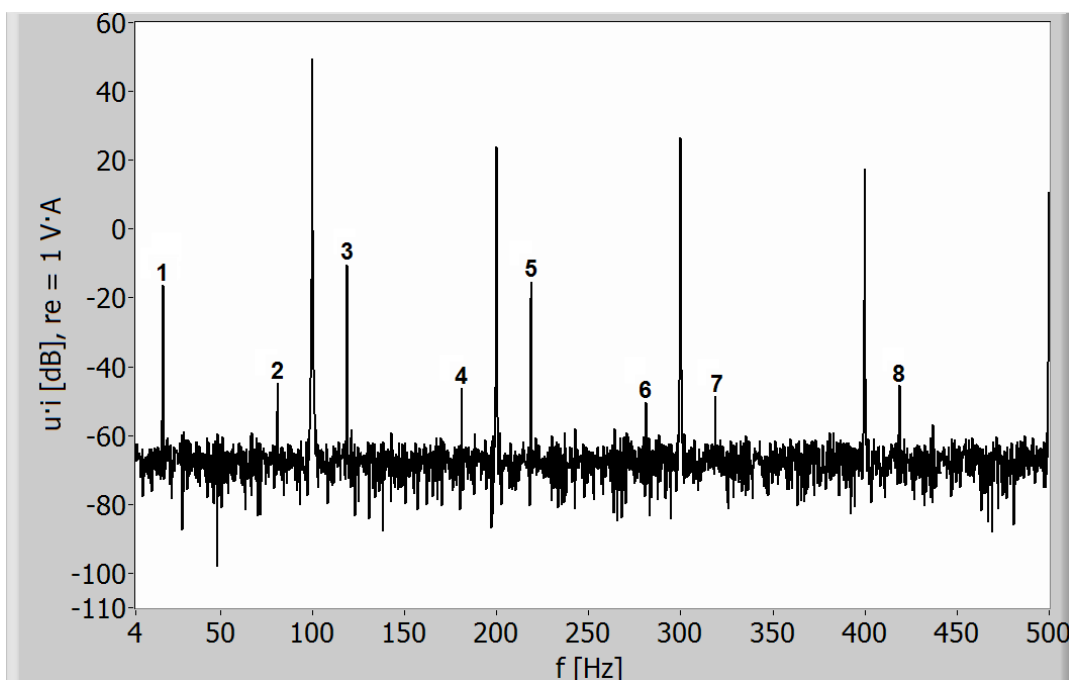
Rys.5.7. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym łożyska przy obciążeniu równym 50% momentu znamionowego i obecności ekscentryczności statycznej i dynamicznej

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, iż niezależnie od wartości momentu obciążenia w widmie mocy chwilowej występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej f_H (prążek numer 2) oraz składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Zmianie ulegają jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmonicznym. Ponadto w widmie mocy chwilowej, w przypadku obecności ekscentryczności statycznej i dynamicznej, pojawiają się dodatkowe składowe harmoniczne, charakterystyczne dla tego typu zaburzeń (prążki numer 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17).

5.3.2.2. Silnik z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska

Uszkodzenie łożyska zasymulowano wprowadzając oscylację momentu obciążenia z częstotliwością $f_H = 118,9$ Hz. Jest to częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia bieżni wewnętrznej łożyska typu 6204 przy obciążeniu silnika momentem

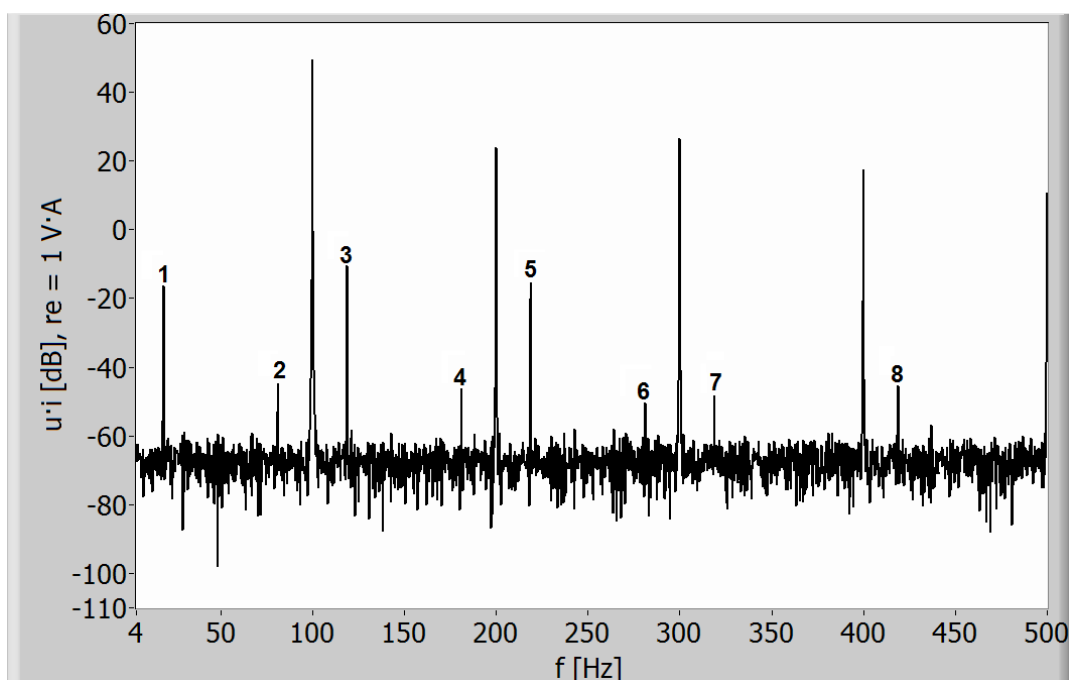
znamionowym. Rysunek 5.8 przedstawia wynik symulacji dla silnika z uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego łożyska.



Rys.5.8. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym łożyska przy obciążeniu równym 100% momentu znamionowego

Podobnie jak w przypadku uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska w widmie mocy chwilowej występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 118,9 \text{ Hz}$ (prążek numer 3). W widmie obecne są również częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową o częstotliwości charakterystycznej dla uszkodzenia pierścienia wewnętrznego. Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 18,9 Hz, 81,1 Hz, 181,1 Hz, 218,9 Hz, 281,1 Hz, 318,9 Hz i 418,1 Hz (odpowiednio prążki numer 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8).

W celu sprawdzenia wpływu obciążenia oraz ekscentryczności statycznej i dynamicznej na składowe, występujące w widmie mocy chwilowej, przeprowadzono badania symulacyjne dla innych wartości momentu obciążenia przy wprowadzeniu dodatkowych zakłóceń w postaci ekscentryczności statycznej i dynamicznej. Na rysunku 5.9 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, będące rezultatem symulacji dla silnika z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym łożyska, przy obciążeniu równym 20% momentu znamionowego.

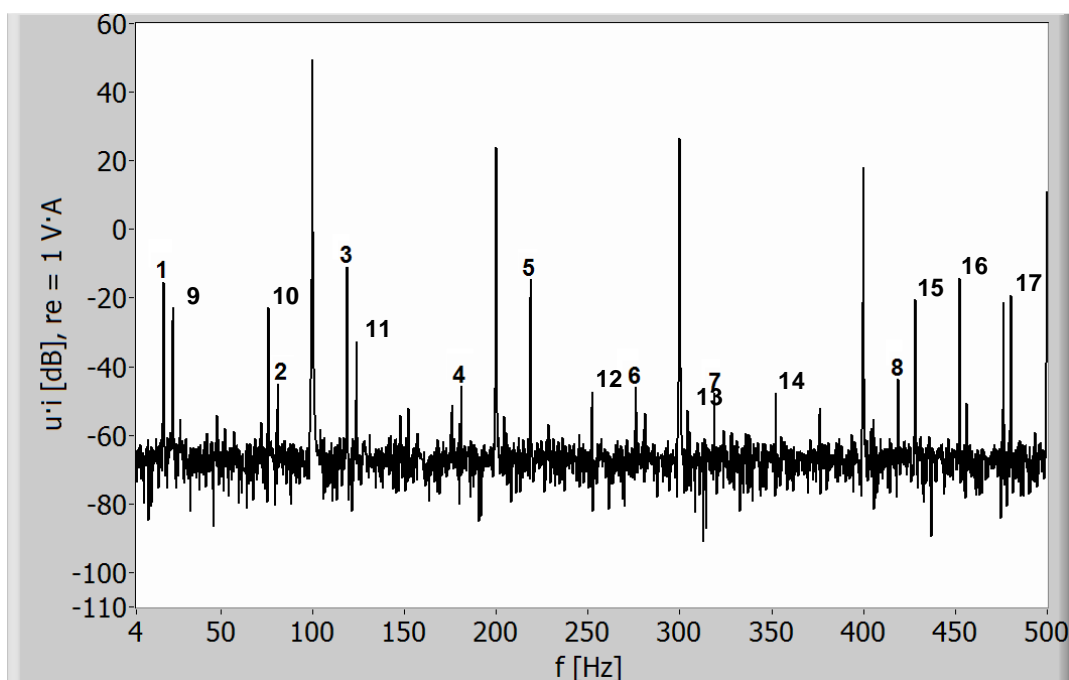


Rys.5.9. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym łożyska przy obciążeniu równym 20% momentu znamionowego

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że w widmie mocy chwilowej występuje zarówno składowa charakterystyczna dla uszkodzenia f_H (prążek numer 3) jak również składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8). Przy zmianie obciążenia zmieniają się jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmonicznnych.

Na rysunku 5.10 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, będące rezultatem symulacji dla silnika z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym łożyska, przy obciążeniu równym 50% momentu znamionowego i obecności ekscentryczności statycznej oraz ekscentryczności dynamicznej. Ekscentryczność statyczna i ekscentryczność dynamiczna została wprowadzona na poziomie 20% grubości geometrycznej szczeliny powietrznej.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, iż niezależnie od wartości momentu obciążenia w widmie mocy chwilowej występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej f_H (prążek numer 3) oraz składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8). Zmianie ulegają jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmonicznnych.



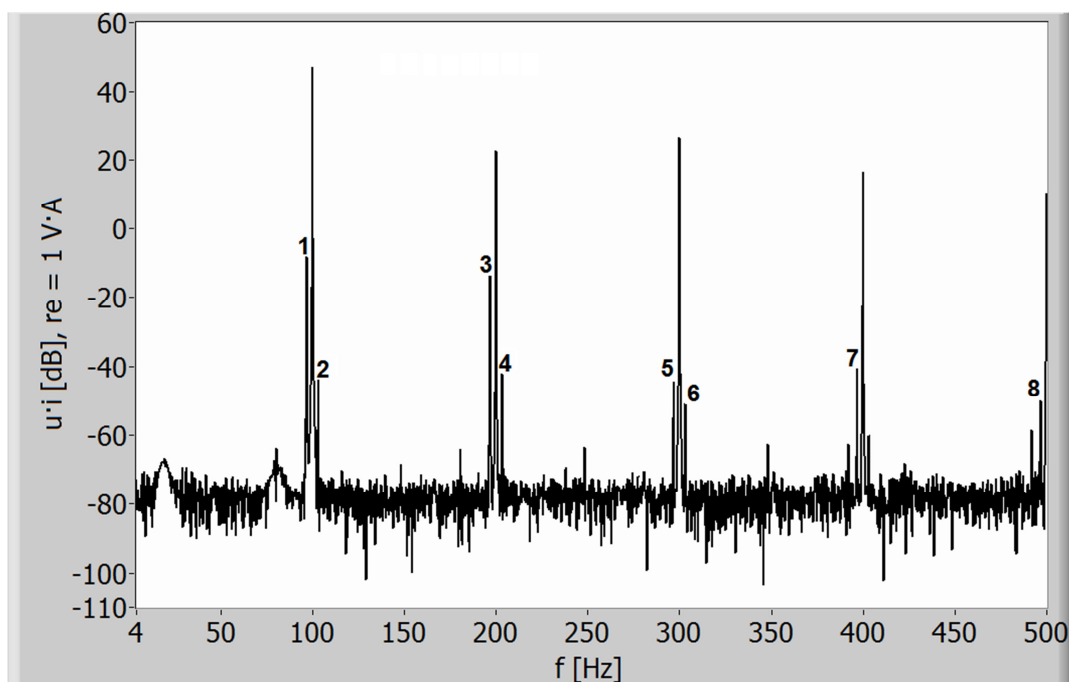
Rys.5.10. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym łożyska przy obciążeniu równym 50% momentu znamionowego i obecności ekscentryczności statycznej i dynamicznej

Ponadto w widmie mocy chwilowej, w przypadku obecności ekscentryczności statycznej i dynamicznej, pojawiają się dodatkowe składowe harmoniczne, charakterystyczne dla tego typu zaburzeń (prążki numer 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17).

5.3.2.3. Silnik z uszkodzeniem elementu tocznego łożyska

Uszkodzenie łożyska zasymulowano wprowadzając oscylację momentu obciążenia z częstotliwością $f_H = 95,6$ Hz. Jest to częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia elementu tocznego łożyska 6204 przy obciążeniu znamionowym silnika. Na rysunku 5.11 przedstawiono wynik symulacji dla silnika z uszkodzeniem elementów tocznych łożyska.

Analizując uzyskane widmo widać, iż również w przypadku uszkodzenia elementów tocznych łożyska występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej (prążek numer 1) a także jej harmoniczne.



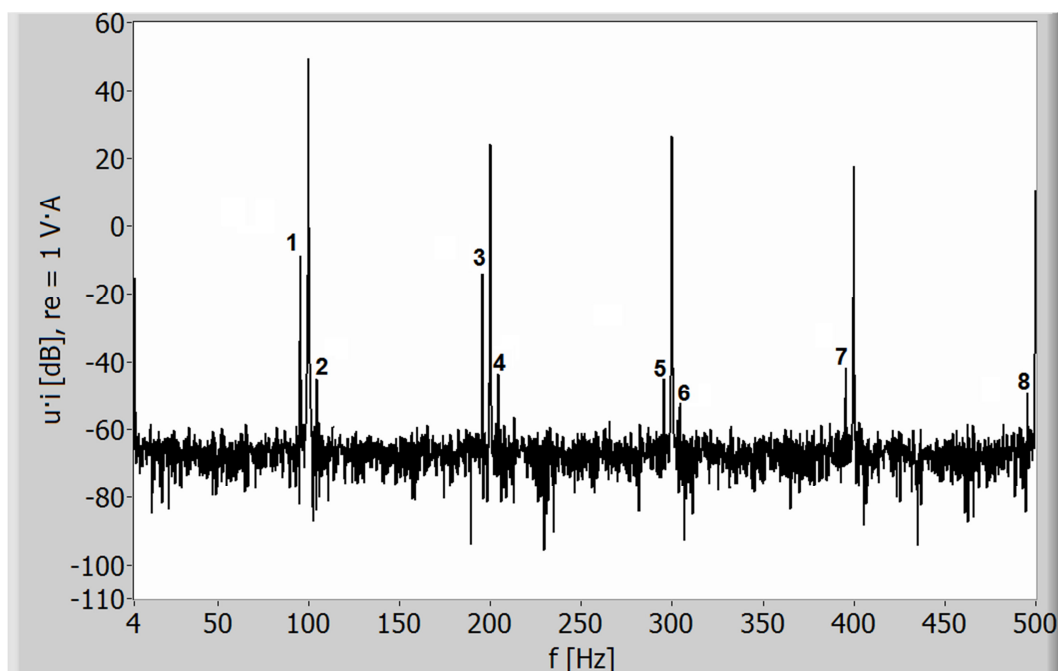
Rys.5.11. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym elementem tocznym łożyska przy obciążeniu równym 100% momentu znamionowego

Pozostałe prążki, występujące w widmie (o numerach 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), to częstotliwości odpowiednio 104,4 Hz, 195,6 Hz, 204,4 Hz, 295,6 Hz, 304,4 Hz, 395,6 Hz, 495,6 Hz. Składowe te powstają na skutek modulacji częstotliwości, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną.

Dla sprawdzenia wpływu obciążenia na składowe, występujące w widmie mocy chwilowej, przeprowadzono badania symulacyjne dla innych wartości momentu obciążenia i przy obecności ekscentryczności statycznej i dynamicznej.

Na rysunku 5.12 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, będące rezultatem symulacji dla silnika z uszkodzonym elementem tocznym łożyska, przy obciążeniu równym 20% momentu znamionowego.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że w widmie mocy chwilowej występuje składowa charakterystyczna dla uszkodzenia f_H (prążek numer 1) jak również składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).



Rys.5.12. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym elementem tocznym łożyska przy obciążeniu równym 20% momentu znamionowego

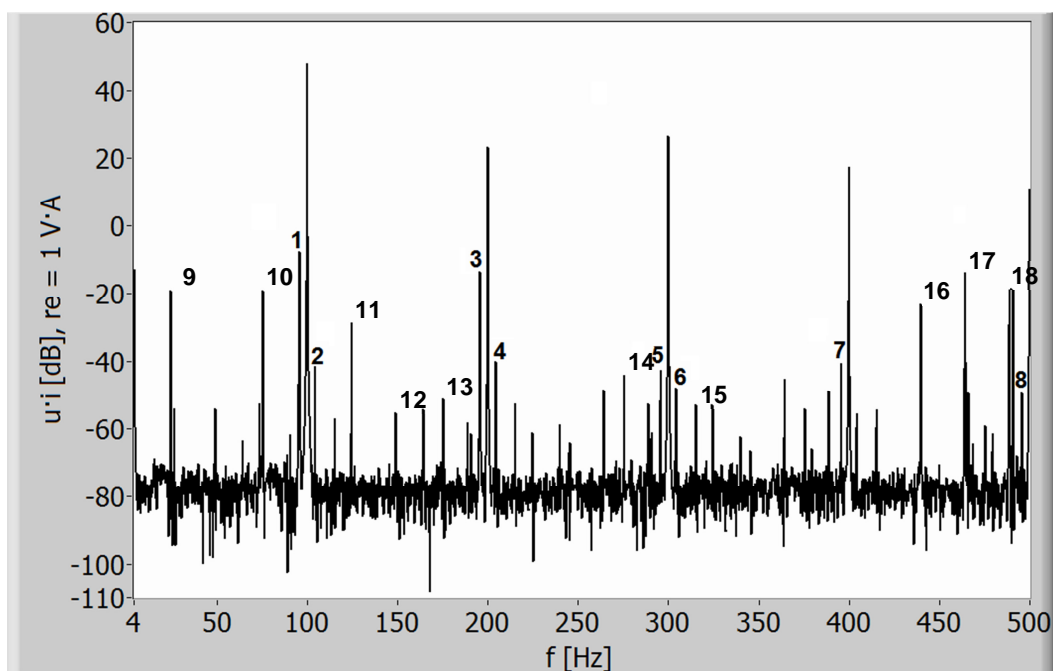
Przy zmianie obciążenia zmieniają się jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmoniczných.

Na rysunku 5.13 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, będące rezultatem symulacji dla silnika z uszkodzonym elementem tocznym łożyska, przy obciążeniu równym 50% momentu znamionowego i obecności ekscentryczności statycznej oraz ekscentryczności dynamicznej.

Ekscentryczność statyczna i ekscentryczność dynamiczna została wprowadzona na poziomie 20% grubości geometrycznej szczeliny powietrznej.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, iż niezależnie od wartości momentu obciążenia w widmie mocy chwilowej występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej f_H oraz składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Zmianie ulegają jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmoniczných.

Ponadto w widmie mocy chwilowej, w przypadku obecności ekscentryczności statycznej i dynamicznej, pojawiają się dodatkowe składowe harmoniczne, charakterystyczne dla tego typu zaburzeń (prążki numer 9, 10, 11, 12, 12, 14, 15, 16, 17, 18).



Rys.5.13. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzonym elementem tocznym łożyska przy obciążeniu równym 50% momentu znamionowego i obecności ekscentryczności statycznej i dynamicznej

5.4. Podsumowanie

W rozdziale 5 umieszczono jedynie przykładowe wyniki badań modelu matematycznego silnika indukcyjnego wybrane z szeregu przeprowadzonych badań. Badania przeprowadzone zostały zarówno dla silników nieuszkodzonych oraz dla silników, w których symulowano uszkodzenia łożysk. Uszkodzenia łożysk symulowane były przez wprowadzenie dodatkowego momentu oporowego zmieniającego się z częstotliwością charakterystyczną dla określonych typów uszkodzeń łożysk. Badania wykonane zostały przy pięciu harmonicznym napięcia zasilającego oraz przy różnych wartościach momentu obciążenia. Wykonano szereg symulacji dla różnych typów uszkodzeń łożysk i kilku wartości momentu obciążenia silników. W trakcie badań uwzględniano również ekscentryczność statyczną, dynamiczną oraz bicie sprzęgła.

Przeprowadzone badania modelu matematycznego silnika indukcyjnego, w którym symulowano uszkodzenia łożysk, wprowadzając dodatkowy moment oporowy o częstotliwości charakterystycznej dla określonego typu uszkodzenia, potwierdziły założenia przyjętego modelu zjawisk zachodzących w silniku indukcyjnym – w widmie iloczynu napięcia zasilania i prądu stojana pojawiają się składowe harmoniczne

o częstotliwościach związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Analiza otrzymanych wyników badań modelu matematycznego potwierdziła, iż zjawisko to występuje dla wszystkich rodzajów uszkodzeń łożysk, niezależnie od wartości momentu obciążenia silnika. Wyniki przykładowych badań, wraz z analizą występujących w widmie mocy chwilowej prądków o częstotliwościach, związanych z uszkodzeniami łożysk zestawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Zestawienie składowych związanych z uszkodzeniami łożysk, zidentyfikowanych w widmie mocy chwilowej uzyskanych z przykładowych badań modelu matematycznego silnika indukcyjnego

Typ uszkodzenia	Bieżnia zewnętrzna	Bieżnia wewnętrzna	Element toczny
Częstotliwość wprowadzonego zaburzenia	$f_H = 73,1 \text{ Hz}$	$f_H = 118,9 \text{ Hz}$	$f_H = 95,6 \text{ Hz}$
Składowe związane z uszkodzeniem łożyska zidentyfikowane w widmie mocy chwilowej	$f_H = 73,1 \text{ Hz}$ $2 \cdot f - f_H = 26,9 \text{ Hz}$ $2 \cdot f + f_H = 173,1 \text{ Hz}$ $4 \cdot f - f_H = 126,9 \text{ Hz}$ $4 \cdot f + f_H = 273,1 \text{ Hz}$ $6 \cdot f - f_H = 226,9 \text{ Hz}$ $6 \cdot f + f_H = 373,1 \text{ Hz}$ $8 \cdot f + f_H = 473,1 \text{ Hz}$	$f_H = 118,9 \text{ Hz}$ $ 2 \cdot f - f_H = 18,9 \text{ Hz}$ $2 \cdot f + f_H = 218,9 \text{ Hz}$ $4 \cdot f - f_H = 81,1 \text{ Hz}$ $4 \cdot f + f_H = 318,9 \text{ Hz}$ $6 \cdot f - f_H = 181,1 \text{ Hz}$ $6 \cdot f + f_H = 418,1 \text{ Hz}$ $8 \cdot f - f_H = 281,1 \text{ Hz}$	$f_H = 95,6 \text{ Hz}$ $2 \cdot f + f_H = 195,6 \text{ Hz}$ $4 \cdot f - f_H = 104,4 \text{ Hz}$ $4 \cdot f + f_H = 295,6 \text{ Hz}$ $6 \cdot f - f_H = 204,4 \text{ Hz}$ $6 \cdot f + f_H = 395,6 \text{ Hz}$ $8 \cdot f - f_H = 304,4 \text{ Hz}$ $8 \cdot f + f_H = 495,6 \text{ Hz}$

Wyniki przeprowadzonych badań modelu matematycznego silnika indukcyjnego potwierdziły również fakt, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości wprowadzonego zaburzenia.

6. Badania eksperymentalne uszkodzeń łożysk z wykorzystaniem nowej metody diagnostycznej

W celu praktycznego potwierdzenia wyników badań symulacyjnych (rozdział 5) przeprowadzono badania silników indukcyjnych z symulowanymi uszkodzeniami łożysk oraz badania silników indukcyjnych z różnymi typami rzeczywistych uszkodzeń łożysk.

W rozdziale tym na wstępie opisane zostało stanowisko badawcze, wykorzystane do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych opartej na analizie przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny. Analiza metrologiczna wykorzystanego do badań układu pomiarowego zamieszczona została w rozdziale 7 rozprawy.

Dalej w niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki wstępnych badań testowych, wykonanych na stanowisku badawczym, z wykorzystaniem wibrometru laserowego, systemu diagnostyki wibracyjnej DREAM oraz kamery termowizyjnej. Na ich podstawie wybrano metodę odniesienia do dalszych badań.

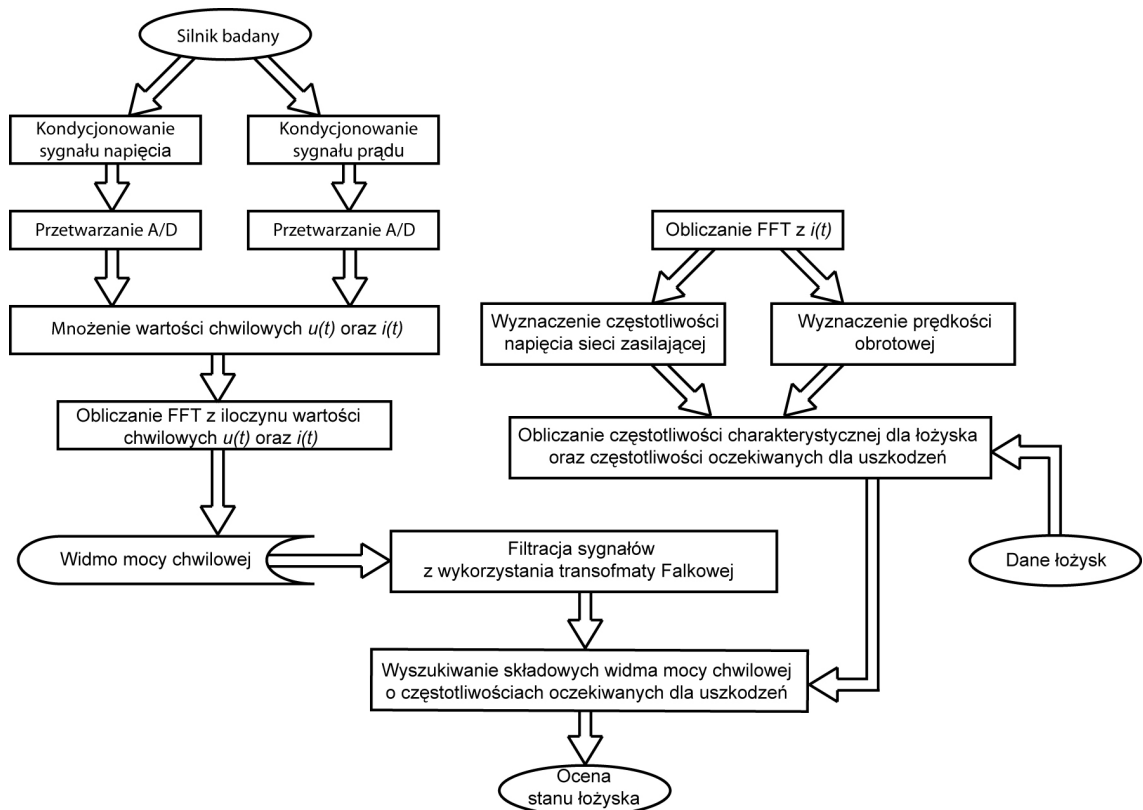
Główną częścią rozdziału jest opis badań diagnostycznych uszkodzeń łożysk silnika metodą analizy mocy chwilowej oraz prezentacja wyników tych badań. Wykonywano badania silników indukcyjnych z symulowanymi oraz rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk.

6.1. Sposób przeprowadzania badań nową metodą

Sposób przeprowadzania badań diagnostycznych uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego nową metodą polega na wykorzystaniu iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia oraz analizie widmowej i falkowej mocy chwilowej, a także określeniu częstotliwości charakterystycznych dla różnych rodzajów uszkodzeń. Algorytm nowej metody analizy mocy chwilowej przedstawiono na rysunku 6.1. W metodzie tej parametry niezbędne do obliczeń częstotliwości harmonicznych charakterystycznych dla konkretnych typów uszkodzeń łożysk w silniku, określa się na podstawie tego samego widma, które wykorzystuje się do obliczenia częstotliwości sieci i prędkości obrotowej wirnika. Widmo prądu otrzymuje się poprzez pobranie prądu z jednej fazy prądu zasilającego silnik indukcyjny i kondycjonowanie sygnału prądu. Widmo mocy chwilowej uzyskuje się pobierając dodatkowo napięcie z jednej fazy napięcia

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

zasilającego silnik indukcyjny i kondycjonowanie sygnału napięcia. Proces kondycjonowania sygnału prądu realizowany jest przy wykorzystaniu bocznika, zamieniając sygnał prądowy na napięcie. Natomiast proces kondycjonowania napięcia prowadzi się poprzez obniżenie napięcia za pomocą rezystancyjnego dzielnika napięcia.



Rys.6.1. Sposób przeprowadzania badań diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych metodą analizy mocy chwilowej

Następnie eliminowane są składowe o częstotliwościach zbyt wysokich w stosunku do częstotliwości próbkowania wykorzystywanego w układzie przetwornika analogowo - cyfrowego za pomocą filtru antyaliasingowego.

Po zakończeniu kondycjonowania sygnału przetwarzana jest postać sygnałów prądu i napięcia z analogowej na cyfrową przy użyciu przetwornika analogowo – cyfrowego. Dalej poprzez obliczenie transformaty Fouriera z sygnału prądu oraz z iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego maszynę indukcyjną otrzymuje się widmo prądu oraz widmo mocy chwilowej. Następnie przeprowadza się filtrację otrzymanego sygnału mocy chwilowej wykorzystując transformatę falkową. Celem filtracji jest oddzielenie składowych użytecznych od szumów i redukcja amplitud składowych zakłócających. W przeciwieństwie do tradycyjnych metod filtracji

wykorzystanie procedury opartej na transformacji falkowej nie wymaga ograniczania widma przetwarzanego sygnału i pozwala skutecznie oddzielić użyteczny sygnał od nakładających się na niego zakłóceń.

Częstotliwości harmoniczne związane z uszkodzeniami łożysk tocznych w silniku indukcyjnym obliczane są na podstawie informacji pobranych z bazy danych łożysk tocznych oraz na podstawie obliczeń częstotliwości napięcia sieci zasilającej i prędkości kątowej wirnika silnika indukcyjnego, wyznaczonych na podstawie składowych widma prądu zasilającego maszynę.

6.2. Stanowisko badawcze

Do badań eksperymentalnych wykorzystano stanowisko badawcze, znajdujące się w Katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Na stanowisku możliwe jest wykonywanie pomiarów diagnostycznych łożysk silników o mocach do 5,0 kW. Konstrukcja wszystkich elementów tego stanowiska została podporządkowana głównemu celowi, jakim jest izolacja badanego silnika od drgań otoczenia [20].

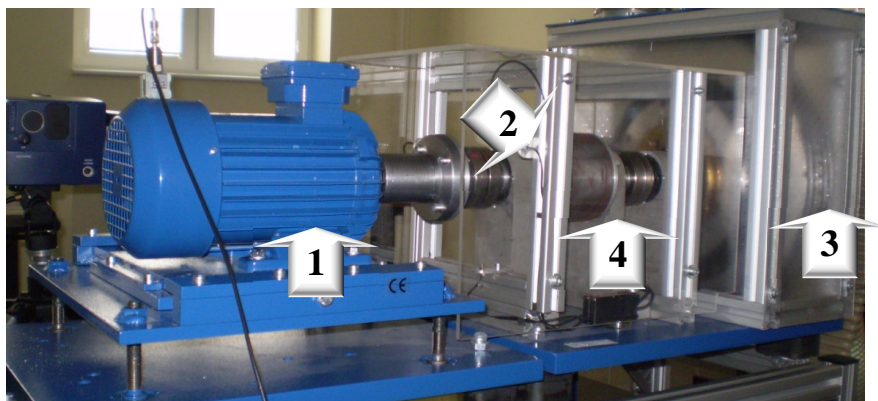
Głównym celem budowy stanowiska była weryfikacja nowej metody diagnostyki łożysk, opartej na analizie mocy chwilowej pobieranej przez silnik oraz sprawdzenie słuszności tezy postawionej w rozdziale 2.3 niniejszej rozprawy: „Diagnostyka silników indukcyjnych oparta na analizie iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego maszynę umożliwi poprawne wykrywanie i rozróżnianie uszkodzeń łożysk”.

6.2.1. Część sprzętowa stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze składa się z silnika badanego, tłumików wibroakustycznych, umożliwiających odizolowanie badanych maszyn od podstawy, na której zamontowane jest obciążenie, sprzęgła magnetycznego oraz laserowego układu do dokładnego osiowania wałów. Widok stanowiska przedstawiony jest na rysunku 6.2.

Tłumiki wibroakustyczne zapobiegają przenoszeniu drgań z otoczenia na podstawę, na której umieszczony jest silnik. Podobne tłumiki umieszczone są pod podstawą, na której zamontowane jest obciążenie.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



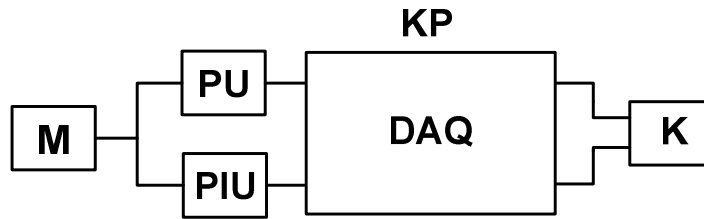
Rys.6.2. Widok stanowiska laboratoryjnego do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych, 1 – silnik badany, 2 – laserowy układ do osiowania wałów, 3 – hamulec elektromagnetyczny, 4 – sprzęgło magnetyczne

Obciążeniem dla badanych silników jest hamulec elektromagnetyczny. Rozwiązanie takie podyktowane jest faktem, iż hamulec ten generuje drgania o częstotliwościach innych niż częstotliwości generowane przez uszkodzone łożyska. Kolejnym elementem, który służy do ograniczenia wpływu drgań zewnętrznych na badaną maszynę jest sprzęgło magnetyczne. Konstrukcja sprzęgła oparta jest na magnesach trwałych. Rozwiązanie takie umożliwia bezstykowe przeniesienie momentu obrotowego dzięki siłom magnetycznym pomiędzy piastą zewnętrzną i wewnętrzną.

Aby w znacznym stopniu wyeliminować drgania, wynikające ze złego wyosiowania wałów, na stanowisku zamontowano system laserowego osiowania wałów.

Badane maszyny mogą być zasilane bezpośrednio z sieci trójfazowej lub z falownika.

Do pomiarów prądów i napięć w pierwszym etapie badań wykorzystano przetworniki: prądowo-napięciowy CT-5T oraz napięciowy CV 3-500 [13]. Przetwornik prądowo-napięciowy tego typu umożliwia pomiar prądów: stałego, zmiennego i impulsowego z wysoką dokładnością, zapewniając izolację galwaniczną pomiędzy obwodem pierwotnym i wtórnym. Zakres częstotliwości przetwarzania wynosi 0 – 500 kHz a przekładnia 5A/5V. Błąd przetwornika nie przekracza $\pm 0,1\%$ wartości skutecznej prądu znamionowego. Przetwornik napięciowy przeznaczony jest do pomiarów napięć stałych i zmiennych o wartości skutecznej napięcia do 350 V. Zapewnia izolację galwaniczną pomiędzy obwodem badanym i pomiarowym. Przekładnia przetwornika wynosi 500V/10V a maksymalny błąd nie przekracza $\pm 0,2\%$ wartości skutecznej napięcia znamionowego. Schemat blokowy stanowiska badawczego z przetwornikami prądu i napięcia przedstawiono na rysunku 6.3.

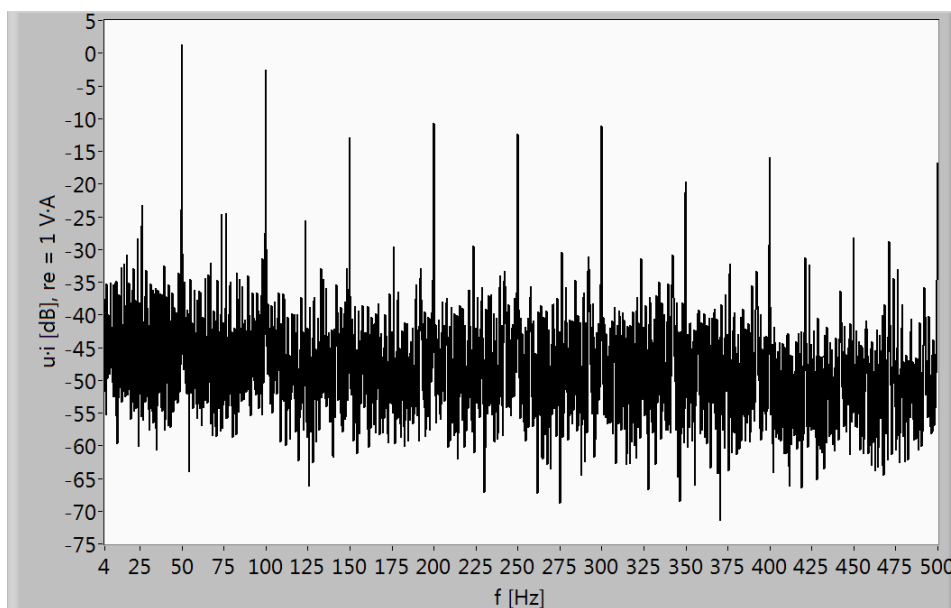


Rys.6.3. Schemat blokowy stanowiska badawczego z przetwornikami prądu i napięcia:
M – maszyna badana, PU – przetwornik napięcia, PIU – przetwornik prądowo-napięciowy, KP – kasetka pomiarowa, DAQ – karta akwizycji danych NI PXI 4462, K – komputer klasy PC wraz z oprogramowaniem

Po wykonaniu kilku serii badań wstępnych okazało się, iż przetworniki pomiarowe charakteryzowały się dużym poziomem szumów własnych. Ponadto z badań [46, 47] wynika, iż przetworniki hallotronowe prądu wykazują duże błędy przy niesinusoidalnych sygnałach wejściowych.

Dlatego też konieczne stało się opracowanie nowego układu pomiarowego, który charakteryzowałby się niższym poziomem szumów własnych niż układ oparty na wyżej przedstawionych przetwornikach prądu i napięcia.

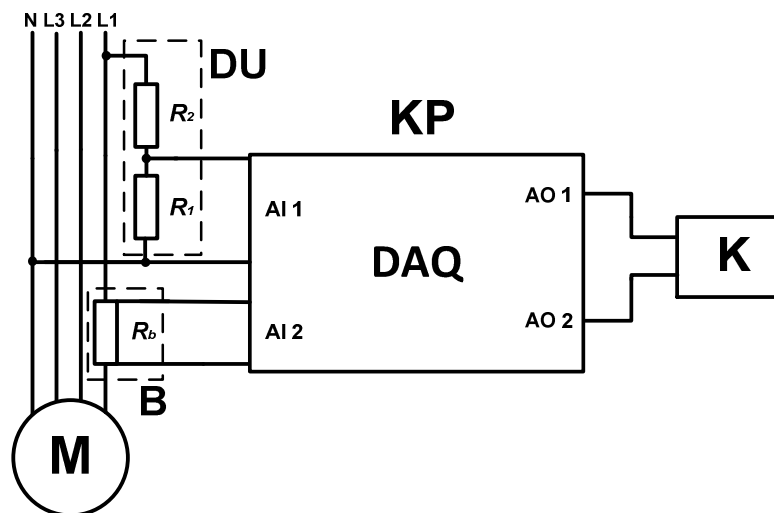
Przykładowe widmo mocy chwilowej, uzyskane z pomiarów wartości chwilowych prądu i napięcia z wykorzystaniem opisanych przetworników, zostało przedstawione na rysunku 6.4.



Rys.6.4. Przykładowe widmo mocy chwilowej uzyskane z pomiarów wartości chwilowych prądu i napięcia przy użyciu przetwornika napięciowego i prądowo-napięciowego

Jako następne rozwiązanie przyjęto układ pomiarowy, w skład którego wchodzi wysokiej klasy bocznik (B) o rezystancji $R_b = 0,1 \Omega$ (opornik wzorcowy RN-1 ORK T201 No 72-1500, producent: INCO Pyskowice) i rezystancyjny dzielnik napięcia (DU). Dzielnik napięcia zbudowany jest z dwóch rezystorów o wartościach rezystancji $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ (opornik dekadowy DC TYP OD-1-D7a, RPT 95202) i $R_2 = 10 \text{ M}\Omega$ (opornik wzorcowy, nr fabryczny 231/2001, producent: ZELAP). Klasa dokładności bocznika wynosi 0,02 a klasy dokładności rezystorów wykorzystanych w dzielniku napięcia wynoszą odpowiednio: 0,05 i 0,02. Rozwiązanie takie pozwoliło uzyskać mniejszy poziom szumów niż w przypadku zastosowania opisanych wyżej przetworników napięciowego i prądowo-napięciowego, przy pomijalnym wpływie indukcyjności wykorzystanych elementów na wynik pomiaru.

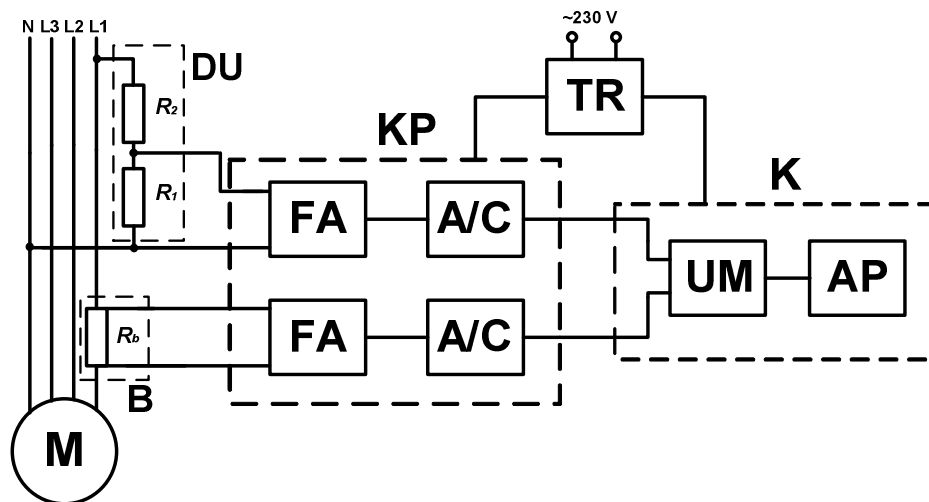
Schemat blokowy stanowiska badawczego z bocznikiem i dzielnikiem napięcia przedstawiono na rysunku 6.5.



Rys.6.5. Schemat połączenia bocznika i dzielnika napięcia z układem pomiarowym:
M – maszyna badana, B – bocznik, DU – dzielnik napięcia,
KP – kasetka pomiarowa, DAQ – karta akwizycji danych,
K – komputer klasy PC wraz z oprogramowaniem

Dodatkowo, w celu uniknięcia dużej różnicy potencjałów pomiędzy obwodem badanych a wejściem karty pomiarowej zapewniono izolację galwaniczną pomiędzy obwodem badanym i siecią zasilającą kartę i komputer. W tym celu w obwodzie zasilającym komputer PC oraz kasetę pomiarową PXI zastosowano transformator separujący.

Ze stanowiskiem laboratoryjnym współpracuje wysokiej klasy system pomiarowy produkcji National Instruments. System ten stanowi kasetę NI PXI 1031, w której zainstalowano dwie karty pomiarowe: PXI 6122 i PXI 4462 (załącznik 2 i 3). Na uwagę zasługuje karta PXI 6122, która umożliwia jednoczesną akwizycję sygnałów pomiarowych w czterech kanałach z rozdzielczością 16 bitów. Maksymalna częstotliwość próbkowania karty wynosi 500 kHz dla każdego z kanałów. Natomiast karta PXI 4462 przeznaczona jest do pomiarów dynamicznych. Charakteryzuje się dużym zakresem dynamiki (118 dB) oraz rozdzielczością wynoszącą 24 bity. System PXI wykorzystany został do pomiarów wartości chwilowych prądów i napięć zasilających badane maszyny. Po przeprowadzeniu wstępnych pomiarów do dalszych badań wykorzystano kartę PXI 4462. Schemat blokowy układu pomiarowego z systemem NI PXI 1031 wykorzystanym do badań diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych został przedstawiony na rysunku 6.6.



Rys.6.6. Schemat blokowy stanowiska komputerowego z systemem pomiarowym NI PXI 1031 wykorzystanego do badań diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych:

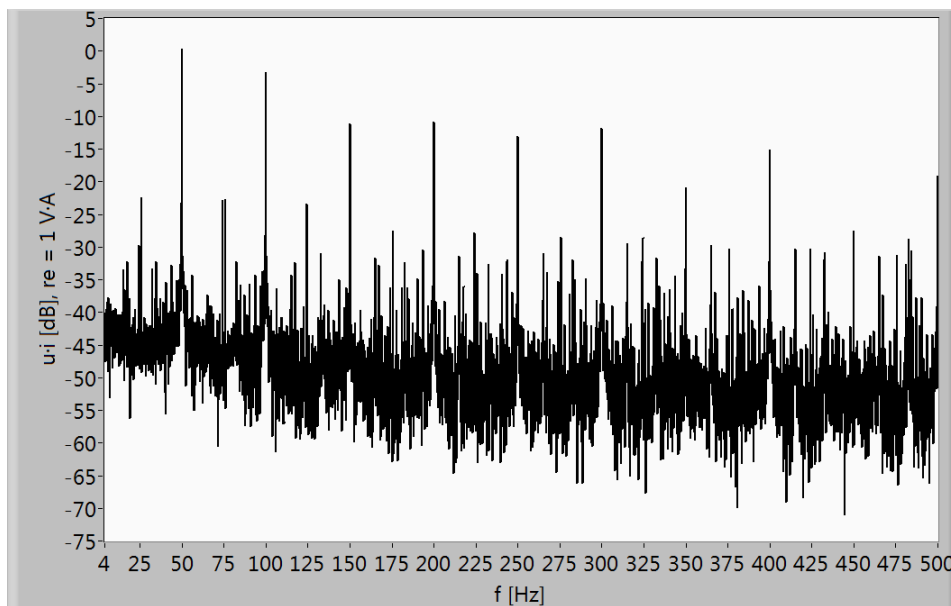
M – maszyna badana, R_1 , R_2 – dzielnik napięcia, R_b – bocznik, FA – filtr antyaliasingowy, A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy, KP – kasetę pomiarową NI PXI 1033 wraz z kartą akwizycji danych PXI 4462, K – komputer klasy PC wraz z oprogramowaniem, UM – blok programu mnożący prąd i napięcie, AP – program do analizy widma mocy chwilowej, TR – transformator separujący

W celu przeprowadzenia badań diagnostycznych łożysk tocznych silnika indukcyjnego autor pracy wykonał badania mocy chwilowej, uzyskanej poprzez

przemnożenie wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny. W wykorzystanym do badań układzie pomiarowym sygnał prądu pobierany jest z jednej z faz zasilających maszynę (M) i następnie doprowadzany do bocznika (B), gdzie zamieniany jest na sygnał napięciowy. Sygnał napięcia pobierany jest z tej samej fazy co sygnał prądu i następnie doprowadzany do dzielnika napięcia (DU). Dalej sygnały proporcjonalne do sygnałów prądu i napięcia zasilającego maszyny doprowadzane są do wejść analogowych karty akwizycji sygnałów pomiarowych. Za pomocą filtru antyaliasingowego (FA) zrealizowanego na karcie akwizycji eliminowane są składowe o częstotliwościach zbyt wysokich w stosunku do częstotliwości próbkowania następującego dalej przetwornika analogowo-cyfrowego.

Przetworniki analogowo-cyfrowe (AC), znajdujące się na karcie akwizycji danych pomiarowych zmieniają postać sygnału z analogowej na cyfrową. Następnie sygnały przesyłane są do komputera gdzie poddawane są analizie.

Przykładowe widmo mocy chwilowej, uzyskane z pomiarów wartości chwilowych prądu i napięcia z wykorzystaniem w układzie pomiarowym dzielnika napięcia i bocznika, zostało przedstawione na rysunku 6.7.



Rys.6.7. Przykładowe widmo mocy chwilowej uzyskane z pomiarów wartości chwilowych prądu i napięcia przy użyciu bocznika i dzielnika napięcia

Porównując widma mocy chwilowej z rysunku 6.4 i 6.7 w układzie pomiarowym wykorzystującym bocznik i dzielnik napięcia (rysunek 6.6) poziom szumów jest

mniejszy niż w układzie pomiarowym, opartym na przetwornikach prądu i napięcia (rysunek 6.3).

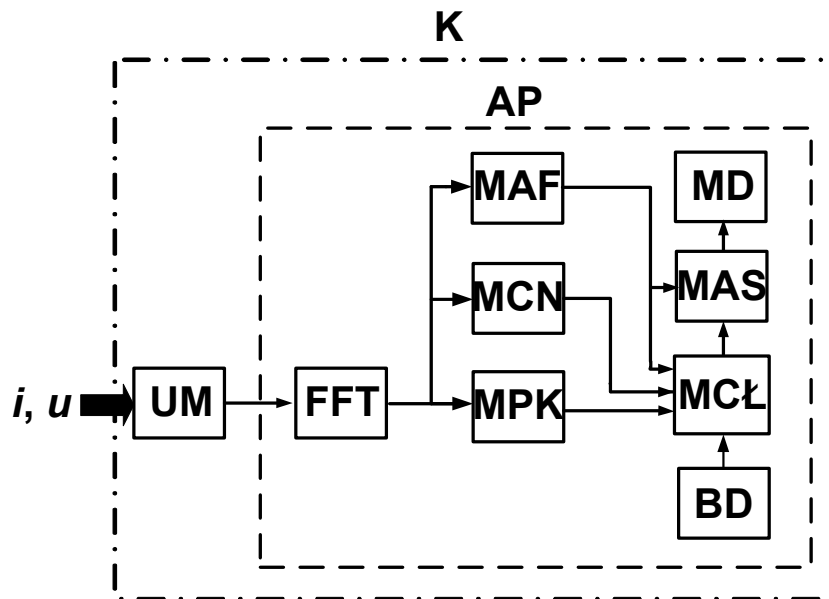
Dokładny opis oprogramowania umieszczony został w rozdziale 6.2.2 rozprawy.

6.2.2. Część programowa stanowiska badawczego

Do realizacji komputerowego systemu pomiarowego wybrano środowisko programowania w języku graficznym LabVIEW firmy National Instruments. Opracowane przez autora pracy oprogramowanie o nazwie „Moc-Łożyska” umożliwia archiwizację, analizę i wizualizację danych uzyskanych z pomiarów, wykonanych z wykorzystaniem kasety NI PXI 6122. Zadaniem opracowanej aplikacji jest również identyfikacja składowych charakterystycznych dla szeregu typów uszkodzeń łożysk. Ponadto oprogramowanie umożliwia odczyt danych pomiarowych

Algorytm oprogramowania komputerowego do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych oparty na pomiarach i analizie wartości chwilowych prądu i napięcia przedstawiono na rysunku 6.8.

Opracowane przez autora rozprawy oprogramowanie „Moc-Łożyska”, znajdujące się na komputerze (K), dokonuje operacji mnożenia pomierzonych na stanowisku laboratoryjnym (rozdział 6.2.1) wartości chwilowych prądu i napięcia. Operacja ta wykonywana jest w bloku programu mnożenia prądu i napięcia (UM). Następnie dane dotyczące sygnałów prądu i mocy chwilowej przekazywane są do bloku programu analizy widma mocy chwilowej (AP). W bloku tym znajduje się moduł obliczenia transformaty Fouriera (FFT), gdzie wykonywane są obliczenia widma sygnału prądu i mocy chwilowej metodą szybkiej transformaty Fouriera. Moduł obliczenia transformaty Fouriera połączony jest z modułem obliczenia częstotliwości napięcia sieci zasilającej (MCN), i z modułem obliczania prędkości kątowej wirnika silnika indukcyjnego (MPK), w których częstotliwość napięcia sieciowego i prędkość obrotowa wirnika silnika obliczane są na podstawie analizy widma prądu zasilającego maszynę. Moduł obliczania transformaty Fouriera połączony jest z modułem analizy falkowej (MAF), w którym następuje filtracja niepożądanych składowych widma prądu i mocy chwilowej. Sygnały z tego modułu przekazywane są do modułu obliczania częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzeń (MCŁ) oraz modułu wyznaczania amplitud składowych widma mocy o częstotliwościach oczekiwanych dla uszkodzeń (MAS).



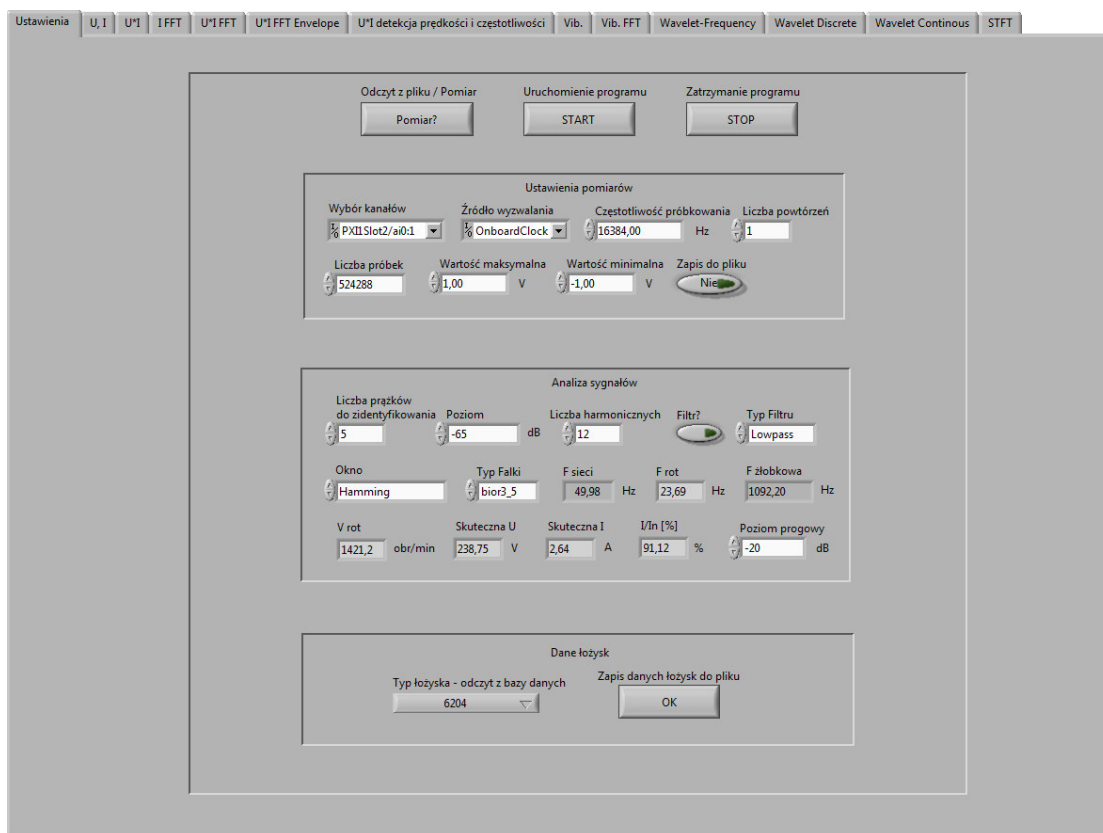
Rys.6.8. Algorytm aplikacji komputerowej do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych w oparciu na pomiarach i analizie wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego maszynę: K – komputer klasy PC wraz z oprogramowaniem, AP – blok programu analizy widma mocy chwilowej, UM – blok programu mnożący prąd i napięcie, FFT – moduł obliczania transformaty Fouriera, MAF - moduł analizy falkowej, MCN – moduł obliczenia częstotliwości napięcia sieci zasilającej, MPK – moduł obliczania prędkości kątowej wirnika silnika indukcyjnego, MD – moduł diagnostyki uszkodzeń, MAS – moduł wyznaczania amplitud składowych widma mocy chwilowej o częstotliwościach oczekiwanych dla uszkodzeń, MCL – moduł obliczenia częstotliwości charakterystycznych dla łożyska oraz częstotliwości oczekiwanych dla uszkodzeń, BD – baza danych łożysk,

Dane z modułu obliczania częstotliwości napięcia sieci zasilającej oraz z modułu obliczenia prędkości kątowej wirnika silnika indukcyjnego przesyłane są do modułu obliczenia częstotliwości charakterystycznych dla łożyska oraz częstotliwości oczekiwanych dla uszkodzeń (MCL). Do modułu obliczenia częstotliwości charakterystycznych dla łożyska oraz częstotliwości oczekiwanych dla uszkodzeń dołączona została baza danych łożysk tocznych (BD). Dalej dane z modułu obliczenia częstotliwości charakterystycznych dla łożyska oraz częstotliwości oczekiwanych dla uszkodzeń przesyłane są do modułu wyznaczania amplitud składowych widma mocy chwilowej o częstotliwościach oczekiwanych dla określonych typów uszkodzeń łożysk (MAS). Dane z tego modułu przekazywane są do modułu diagnostyki uszkodzeń (MD), w którym następuje ocena stanu technicznego badanych łożysk. W tej konfiguracji

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

oprogramowania na podstawie widma prądu określone są w znany sposób częstotliwość napięcia sieci zasilającej i prędkość kątowna wirnika silnika indukcyjnego. Parametry te są wprowadzane do znanych wzorów (3.3), (3.4), (3.5) i (3.6) opisanych w rozdziale 3.3 niniejszej pracy), określających na podstawie wymiarów geometrycznych łożyska tocznego częstotliwości wibracji silnika, pojawiających się przy określonych typach uszkodzeń. Składowych o tych częstotliwościach poszukuje się w widmie mocy chwilowej. Obecność prążków o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzeń w widmie mocy chwilowej świadczy o uszkodzeniu poszczególnych elementów łożyska. Wartość amplitud tych składowych świadczy o stopniu zaawansowania uszkodzenia.

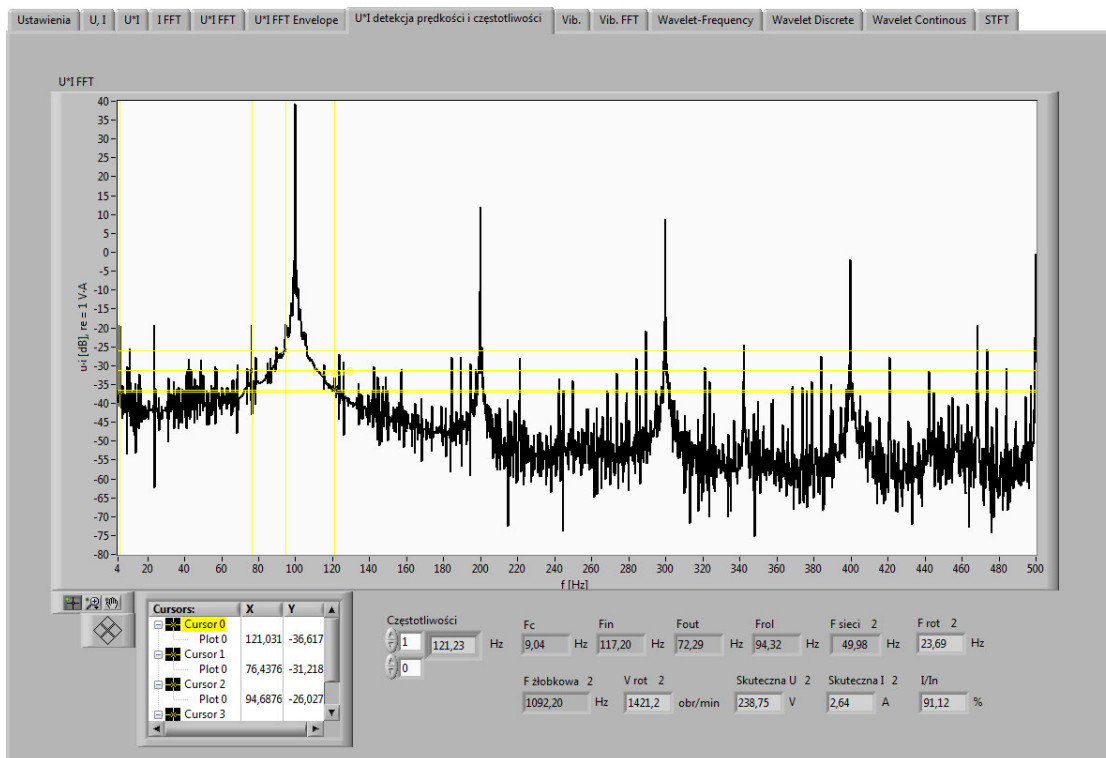
Komunikacja z opracowanym programem możliwa jest za pośrednictwem panelu programu wyświetlanego na ekranie monitora. Nawigację w programie umożliwiają przyciski i zakładki oznaczone odpowiednimi hasłami. Wyboru trybu pracy programu, ustawień oraz preferencji dokonuje się za pośrednictwem menu, umieszczonego w zakładce „Ustawienia”. Na rysunku 6.9 przedstawiono widok zakładki „Ustawienia” aplikacji „Moc – Łożyska”.



Rys.6.9. Widok zakładki „Ustawienia” programu „Moc – Łożyska”

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

Natomiast na rysunku 6.10 zaprezentowano widok zakładki „Detekcja prędkości i częstotliwości” programu „Moc – Łożyska”.



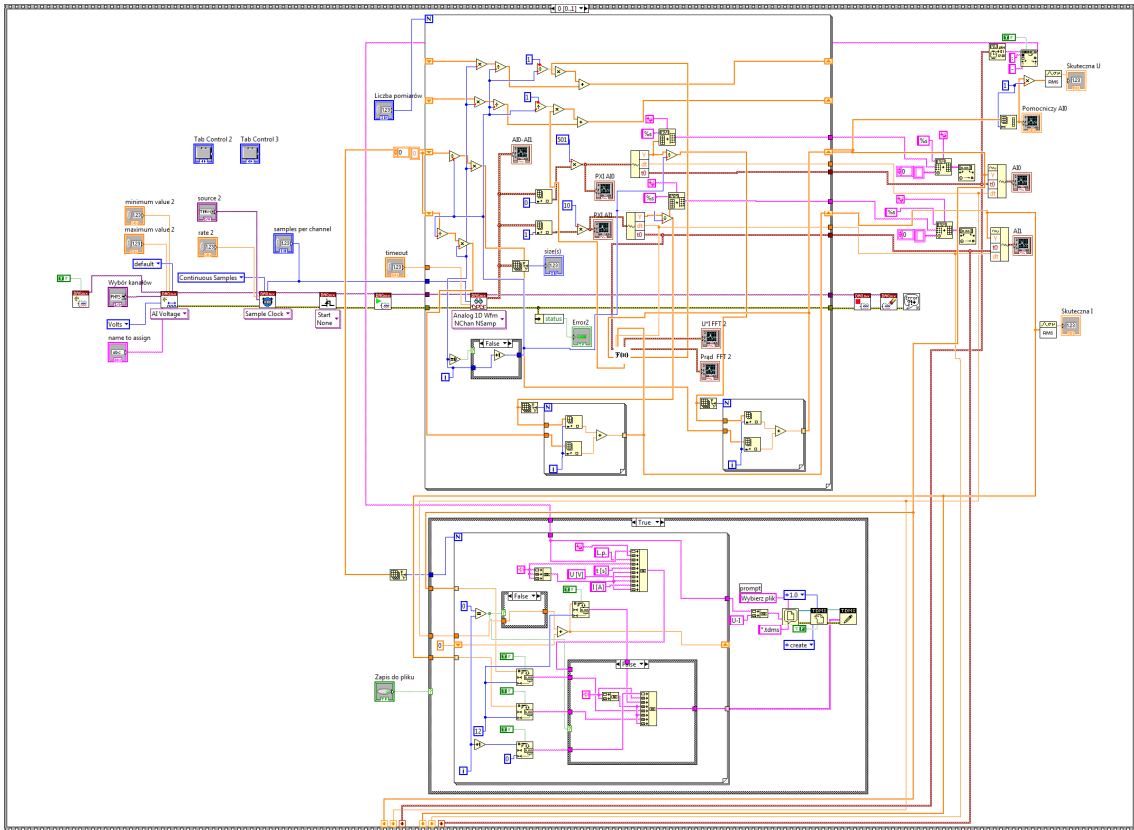
Rys.6.10. Widok zakładki „Detekcja prędkości i częstotliwości” programu „Moc – Łożyska”

Program „Moc- Łożyska” składa się z czterech aplikacji, z których trzy pracują jako podprogramy w stosunku do programu głównego (są to podprogramy: „Analiza – Moc”, „Baza – Łożyska” oraz „Zapis”). Fragment kodu źródłowego opisywanego programu przedstawiono na rysunku 6.11.

Pełny kod źródłowy opracowanej przez autora pracy aplikacji umieszczony został w załączniku nr 1 do niniejszej rozprawy. Program umożliwia, oprócz prezentacji danych pobranych z karty akwizycji, zapis danych do pliku, odczyt uprzednio zapisanych danych z pliku, ustawienie liczby wykonywanych pomiarów oraz zmianę parametrów takich jak częstotliwość próbkowania, liczba próbek i zakresy napięć.

Dane dotyczące wartości chwilowych prądu i napięcia, pobrane z karty akwizycji, mogą być prezentowane zarówno w postaci czasowej jak również – po odpowiednich przekształcenia – w postaci widm sygnałów. Opracowana aplikacja „Moc – Łożyska” umożliwia także prezentację wartości chwilowej mocy, definiowanej jako iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



Rys.6.11. Fragment kodu źródłowego programu „Moc – Łożyska”

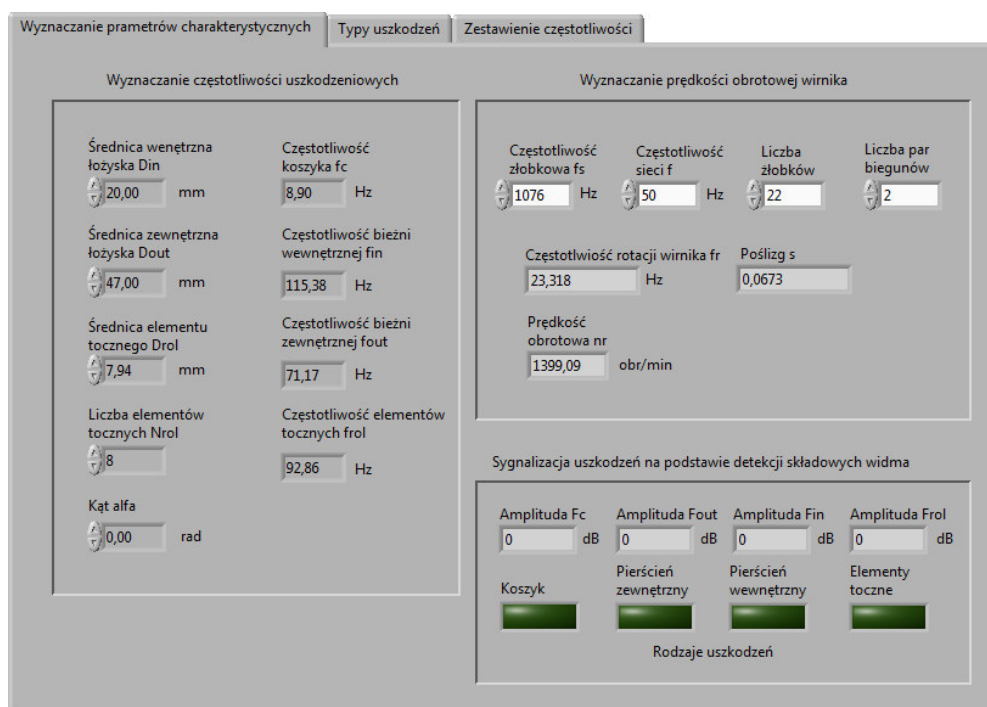
Zadaniem aplikacji „Analiza – Moc”, która pracuje jako podprogram w stosunku do programu głównego jest obliczanie częstotliwości napięcia zasilającego, wyznaczenie prędkości obrotowej wirnika na podstawie analizy widma prądu, uzyskanego z pomiarów oraz obliczenie częstotliwości charakterystycznych dla łożysk i częstotliwości oczekiwanych dla uszkodzeń. Okno główne podprogramu „Analiza – Moc” przedstawione jest na rysunku 6.12.

Prędkość obrotową wirnika wyznaczono na podstawie detekcji składowej żłobkowej f_s prądu stojana według zależności 6.1 [57, 65, 66, 68].

$$f_s = f + \frac{h + NR \cdot (1 - s) \cdot 50}{p} \quad (6.1)$$

- gdzie: f – częstotliwość prądu zasilającego maszynę,
 h – indeks podstawowej strefy żłobkowej,
 s – poślizg silnika indukcyjnego,
 p – liczba par biegunów stojana silnika indukcyjnego,
 NR – liczba żłobków wirnika silnika indukcyjnego.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

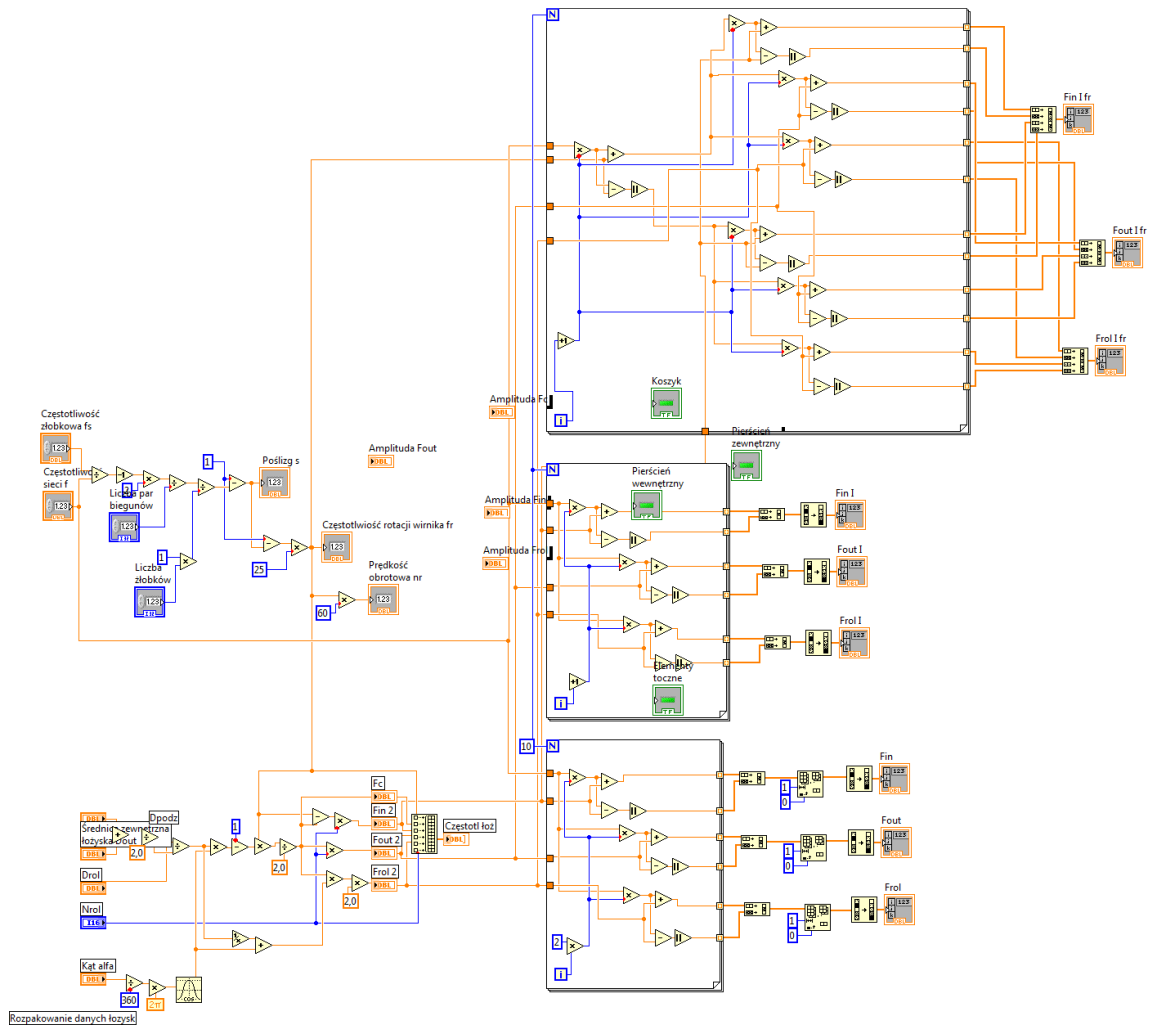


Rys.6.12. Okno podprogramu „ Analiza – Moc”

Następnie na podstawie danych dotyczących budowy i geometrii łożysk, pobranych z bazy danych łożysk i prędkości obrotowej maszyny obliczane są częstotliwości charakterystyczne dla określonych typów uszkodzeń łożysk. Na podstawie tych częstotliwości charakterystycznych oraz częstotliwości napięcia zasilającego wyznaczane są częstotliwości związane z uszkodzeniami łożysk, pojawiające się w widmie mocy chwilowej.

Dalej dane zostają przesłane do programu głównego „Moc-Łożyska”, gdzie opracowany przez autora pracy algorytm dokonuje przeszukiwania widma mocy chwilowej pod kątem występowania częstotliwości składowych harmonicznych, pojawiających się przy określonych typach uszkodzeń łożysk. W celu dokonania diagnozy porównywane są amplitudy tak określonych składowych z wartościami progowymi, określonymi na podstawie pomiarów dla szeregu silników indukcyjnych z uszkodzeniami łożysk o różnych stopniach zaawansowania. Przekroczenie ustalonej wartości progowej świadczy o dużym stopniu zaawansowania uszkodzenia danego elementu łożyska. Fragment kodu źródłowego opracowanego przez autora rozprawy podprogramu „Analiza – Moc” przedstawiony został na rysunku 6.13.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

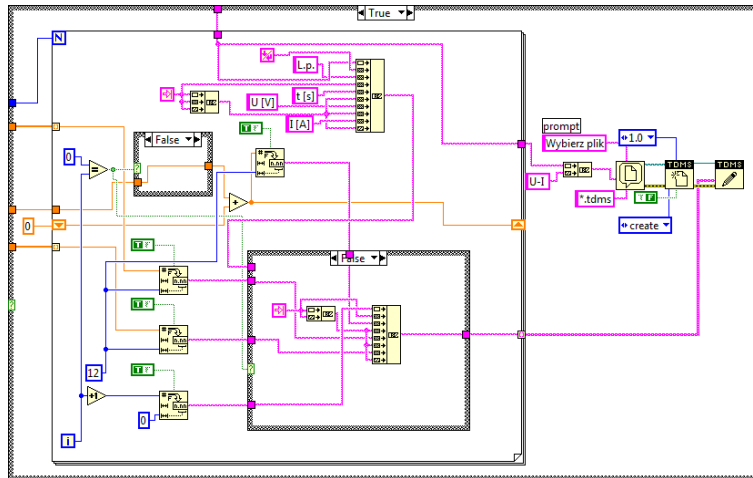


Rys.6.13. Fragment kodu źródłowego podprogramu „Analiza - Moc”

Kolejny podprogram „Baza – Łożyska” przeznaczony jest do zapisania do bazy danych łożysk informacji dotyczących konstrukcji i geometrii łożysk do pliku. W podprogramie tym należy podać dane dotyczące symbolu łożyska, średnicy pierścienia zewnętrznego, średnicy pierścienia wewnętrznego, liczbę oraz średnicę elementów tocznych oraz kąt pracy łożyska. Dane te zostają zapisane do pliku, w którym przechowywane są wszystkie informacje dotyczące łożysk. Aplikacja umożliwia również odczyt danych dotyczących budowy konkretnych typów łożysk z uprzednio zapisanego pliku stanowiącego bazę danych. Dane te przekazywane są do programu głównego i wykorzystywane są do obliczenia częstotliwości charakterystycznych dla określonych typów uszkodzeń łożysk.

Trzeci podprogram „Zapis” realizuje funkcję zapisu danych pomiarowych do pliku. Użytkownik aplikacji ma możliwość wyboru ścieżki zapisu oraz nazwy pliku. Do pliku

zapisywane są przebiegi czasowe mierzonych sygnałów. Fragment kodu źródłowego podprogramu „Zapis” przedstawiono na rysunku 6.14.



Rys.6.14. Fragment kodu źródłowego podprogramu „Zapis”

6.3. Pomiary testowe

Celem wykonania pomiarów testowych była weryfikacja metod (wibracyjnej oraz termograficznej) i przyrządów pomiarowych (wibrometru laserowego, systemu diagnostyki wibracyjnej oraz kamery termowizyjnej), przeznaczonych do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych oraz sprawdzenie, które z nich mogą zostać użyte do weryfikacji wyników badań diagnostycznych przeprowadzonych nową metodą.

Na stanowisku laboratoryjnym przeprowadzono szereg pomiarów przy wykorzystaniu metod wibracyjnych. Pomiary te miały na celu przetestowanie poszczególnych elementów stanowiska oraz sprawdzenie przydatności stanowiska do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych. Do badań użyto skanującego wibrometru laserowego PSV - 400 Polytec i systemu diagnostyki wibracyjnej DREAM. Dodatkowo przeprowadzono pomiary termograficzne, z użyciem kamery termowizyjnej FLIR ThermoCAM E25. Badanymi maszynami były silniki asynchroniczne, w których zamontowane zostały łożyska typu 6204. Badano zarówno łożyska nieuszkodzone oraz łożyska ze sztucznie wprowadzonymi uszkodzeniami. Pomiary zostały wykonane przy różnych wartościach obciążenia badanych maszyn, zarówno przy zasilaniu z sieci jak i z falownika.

Wykonane badania testowe miały na celu przetestowanie właściwości stanowiska laboratoryjnego w pomiarach diagnostycznych, realizowanych przy użyciu przyrządów pomiarowych o różnych zasadach działania.

6.3.1. Pomiary wykonane wibrometrem laserowym

Pierwszym rodzajem badań, jakie wykonano na stanowisku laboratoryjnym były pomiary drgań maszyn, wykonane wibrometrem laserowym [17]. Ze względu na wysokie koszty sprzętu badawczego urządzenie to nie jest powszechnie stosowane w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych. Skanujący wibrometr laserowy PSV 400 firmy Polytec umożliwia pomiar drgań maszyn i urządzeń oraz ich elementów konstrukcyjnych w wielu punktach. Możliwe jest wyznaczenie do pięciuset dwunastu punktów pomiarowych. Skanujący wibrometr laserowy zapewnia pomiar bezstykowy, dzięki czemu obraz wibracyjny badanej konstrukcji nie zostaje zakłócony masą czujników pomiarowych. Poza tym pomiar może być realizowany z dużej odległości dochodzącej do około 50 m, co ułatwia wykonywanie pomiarów w miejscach trudnodostępnych [49].

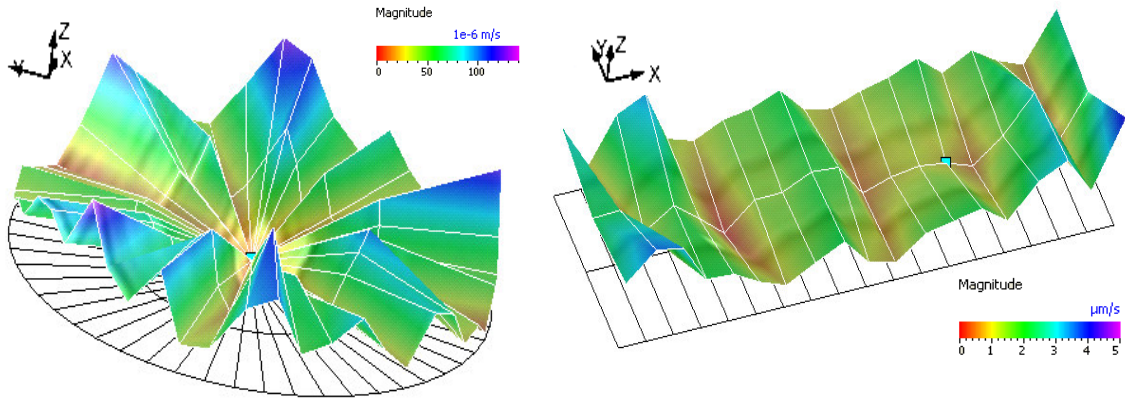
Proces pomiaru polegał na ustaleniu siatki punktów, obejmującej badany obszar i uruchomieniu skanera. Dane pomiarowe przesyłane były do karty akwizycji sygnałów pomiarowych a następnie do komputera. W dalszej części badania dane poddawane były analizie przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania, umożliwiającego analizę widmową, generowanie wykresów i map oraz eksport danych w różnych formatach.

Na rysunku 6.15.a przedstawiono mapę drgań zmierzonych na czole badanej maszyny, w której uszkodzeniu uległa bieżnia zewnętrzna łożyska, pracującej w stanie jałowym.

Jest to zarejestrowany obraz prędkości drgań dla częstotliwości 500 Hz. Częstotliwość ta została narzucona przez algorytm zaimplementowany w aplikacji sterującej pracą skanera.

Pomiary wykonano również na powierzchni bocznej silnika. Uzyskana mapa drgań dla silnika z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną łożyska przedstawiona jest na rysunku 6.15.b. W tym przypadku siatka składała się z 75 punktów pomiarowych. Częstotliwość, dla której wykonano analizę drgań jest taka sama, jak w przypadku badań wykonanych na czole maszyny.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



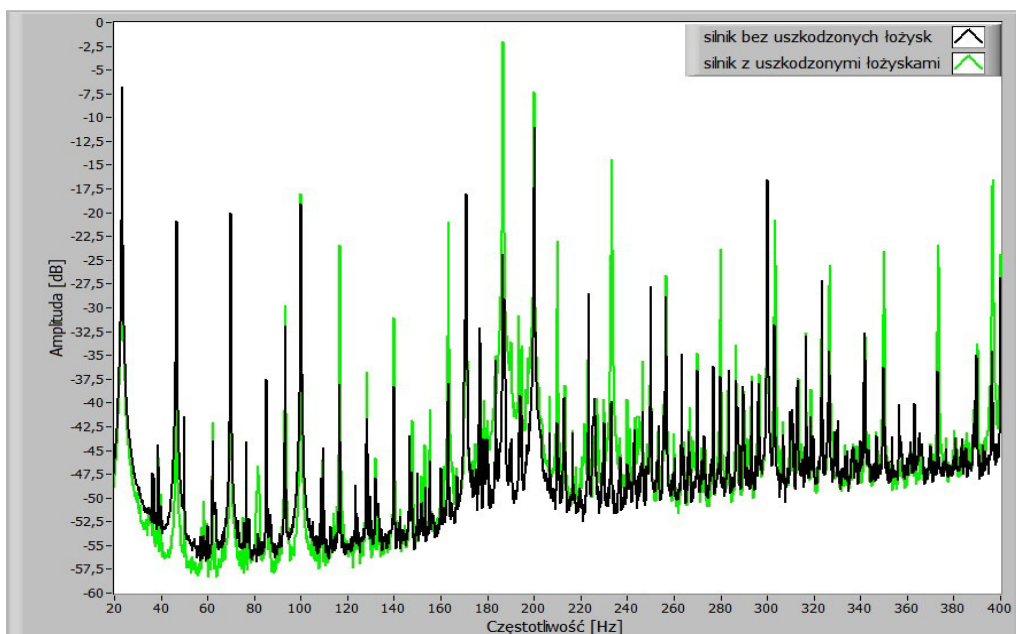
Rys.6.15. Mapa drgań zarejestrowanych a) na czole b) na powierzchni bocznej silnika STg80x-4C

Następnie przeprowadzono szereg badań łożysk z różnymi typami uszkodzeń. Pomiary drgań wykonywane były na powierzchniach bocznych badanych silników. Uzyskane wyniki poddano analizie widmowej celem zidentyfikowania w widmie przyspieszenia drgań składowych oczekiwanych dla uszkodzeń łożysk.

Ponieważ dostarczone przez producenta oprogramowanie, umożliwiające odczyt, analizę i prezentację wyników pomiarów dostępne jest tylko na komputerze przemysłowym, sterującym pracą wibrometru, konieczne stało się opracowanie przez autora pracy dodatkowej aplikacji w środowisku LabVIEW, która umożliwia dostęp do uzyskanych danych pomiarowych i pozwala na przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników. Przykładowe widmo drgań dla silnika nieuszkodzonego oraz silnika z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną łożyska, uzyskane z pomiarów wibrometrem laserowym przedstawiono na rysunku 6.16. Do badań przyjęto zakres analizy widmowej $20 \div 400$ Hz.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że dla łożyska bez uszkodzeń liczba składowych w widmie jest mniejsza niż w przypadku łożyska z wprowadzonym uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego. W silniku uszkodzonym zwiększeniu ulegają również amplitudy składowych, które występują zarówno w widmie drgań silnika bez uszkodzeń, jak i z uszkodzonymi łożyskami.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że w widmie drgań nie występują składowe o częstotliwościach charakterystycznych, znanych z literatury [5, 6, 8, 20, 23, 24, 25, 31, 35, 60, 68, 71, 72, 75], umożliwiające identyfikację uszkodzeń łożysk. Pojawiają się inne składowe, których częstotliwości nie zgadzają się z obliczonymi teoretycznie.



Rys.6.16. Widmo drgań dla silnika nieuszkodzonego i silnika z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną łożyska

Dla celów wykorzystania metody laserowej do diagnostyki łożysk należałoby opracować uzasadnienie teoretyczne dla pojawiających się w widmie wibracji składowych, co nie było przedmiotem tej pracy.

6.3.2. Pomiary wykonane systemem DREAM

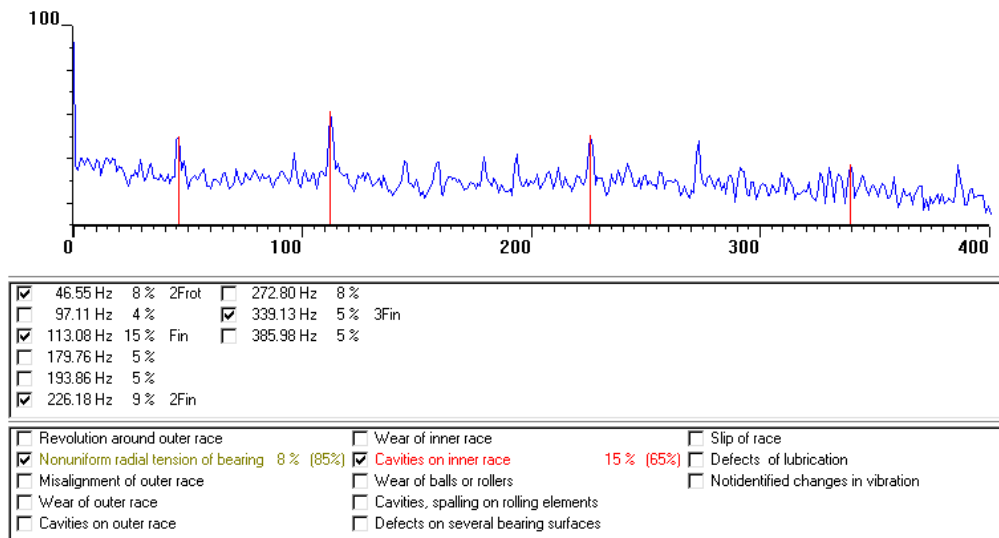
System diagnostyki wibracyjnej DREAM umożliwia diagnostykę szeregu maszyn wirujących (w tym: łożysk tocznych, łożysk ślizgowych, wentylatorów, pomp, przekładni zębatych, systemów elektromechanicznych maszyn elektrycznych).

Jest to komercyjny system, sprawdzony w wielu zastosowaniach w przemyśle, oraz w laboratorium Katedry Metrologii i Systemów Informacyjnych Politechniki Gdańskiej. System ten składa się z analizatora – kolektora danych DC11 wraz z czujnikiem drgań oraz z oprogramowania DREAM do komputera PC [63, 64].

Proces pomiaru polega na zainstalowaniu czujnika drgań na obiekcie badanym, dołączeniu wyjścia czujnika do wejścia kolektora danych, pomiarze i rejestracji widma wibracji w kolektorze. Dalej dane zostają przesłane do komputera, gdzie poddane zostają dalszej analizie.

Systemem DREAM sprawdzono szereg uszkodzonych łożysk. W każdym przypadku diagnozy przedstawiane przez analizator były zgodne ze stanem faktycznym łożysk.

Na rysunku 6.17 przedstawiony jest przykładowy wynik badania uszkodzonego łożyska systemem DREAM.



Rys.6.17. Wynik badania silnika z uszkodzonym łożyskiem systemem DREAM

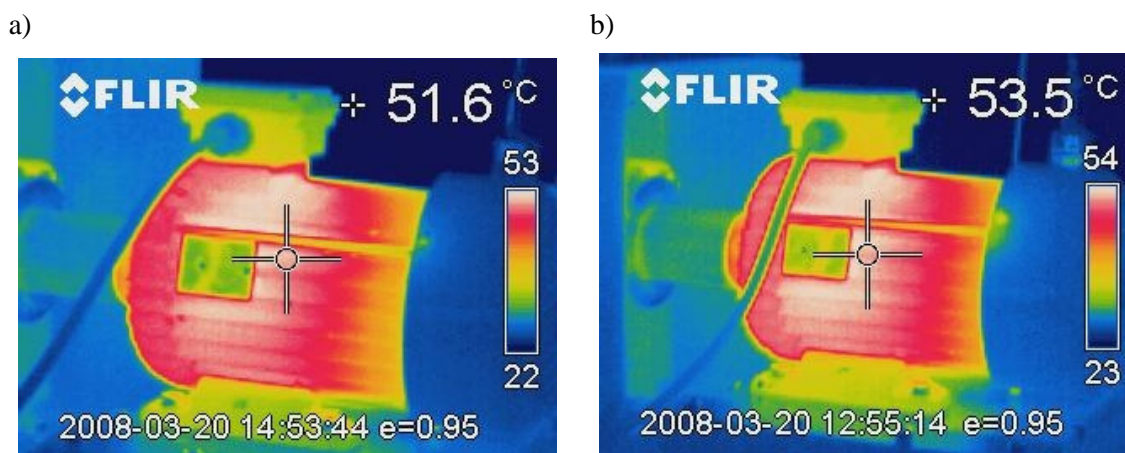
System diagnostyki wibracyjnej sygnalizował uszkodzenie pierścienia wewnętrznego podając częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 113,08 Hz. Diagnoza podana przez system była zgodna z rzeczywistym stanem technicznym badanego łożyska a podawana przez system częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia pierścienia wewnętrznego była zgodna z obliczoną na podstawie danych z literatury [5, 6, 8, 20, 23, 24, 25, 31, 35, 60, 68, 71, 72, 75] częstotliwością dla łożyska typu 6204 przy znamionowej prędkości obrotowej badanego silnika indukcyjnego.

6.3.3. Pomiary wykonane kamerą termowizyjną

Oprócz badań wibracyjnych, na stanowisku laboratoryjnym wykonano badania kamerą termowizyjną. Badano rozkład temperatur na powierzchni silników bez uszkodzeń jak również z uszkodzonymi łożyskami. Przykładowe wyniki badań termograficznych zaprezentowane zostały na rysunku 6.18.

Uzyskane wyniki pomiarów, wykonanych kamerą termowizyjną, nie pozwalają na diagnozę stanu technicznego łożyska. Różnica temperatur pomiędzy silnikiem nieuszkodzonym a silnikiem z uszkodzonym łożyskiem wynosi od 2°C do 6°C. Ponadto

uzyskany na termogramie rozkład temperatury nie pozwala na precyzyjne określenie miejsca uszkodzenia.



Rys.6.18. Wyniki badań kamerą termowizyjną FLIR E25: a) dla silnika nieuszkodzonego, b) dla silnika z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym łożyska

Do celów dokładnej diagnostyki należałoby użyć kamery o większej czułości termicznej i dokładności pomiarowej (dla kamery wykorzystanej do badań parametry te wynoszą odpowiednio: $0,2^{\circ}\text{C}$, $\pm 2^{\circ}\text{C}$ [82]).

6.3.4. Podsumowanie

Zaprezentowane w rozdziale 6.3 wyniki badań miały na celu przetestowanie właściwości stanowiska laboratoryjnego w pomiarach diagnostycznych, realizowanych przy użyciu różnych metod detekcji uszkodzeń łożysk i przyrządów pomiarowych o różnych zasadach działania.

Z uzyskanych wyników pomiarów wynika, iż spośród użytych metod i urządzeń pomiarowych jedynie system diagnostyki wibracyjnej DREAM umożliwia w prosty i mało kosztowny sposób uzyskanie poprawnej diagnozy stanu technicznego łożysk silników indukcyjnych. Ze względu na fakt, iż system ten jest sprawdzonym w przemyśle oraz w laboratorium Katedry Metrologii i Systemów Informacyjnych narzędziem do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych, został on wykorzystany w dalszej części pracy jako wzorzec do oceny trafności diagnoz, uzyskanych z wyników badań diagnostycznych przeprowadzanych z wykorzystaniem nowej metody

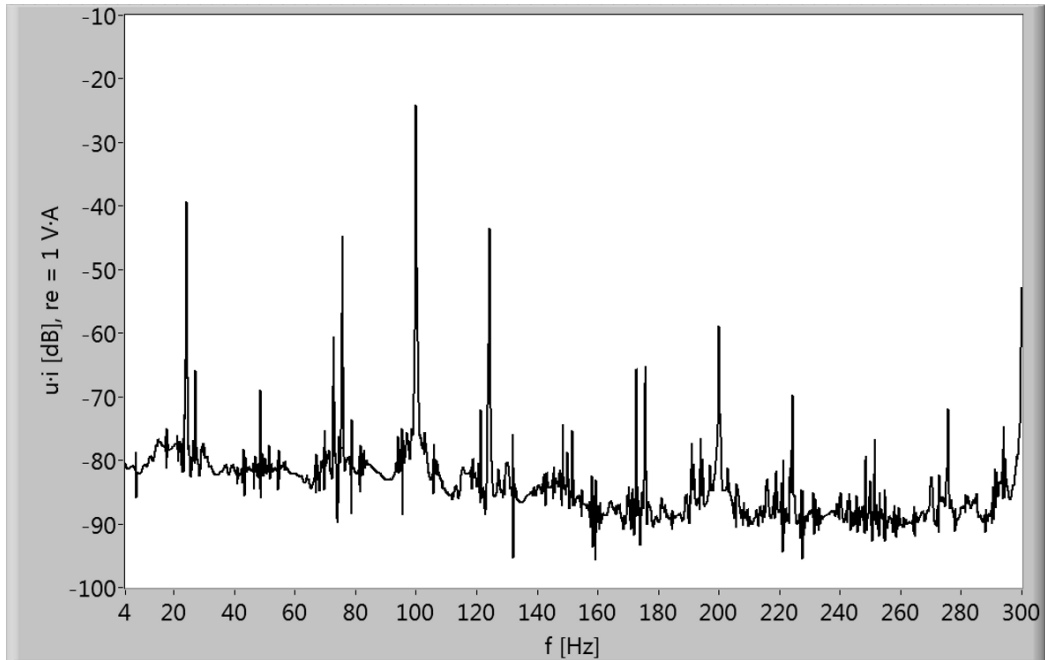
diagnostycznej, opartej na analizie iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny.

6.4. Badania silników indukcyjnych z symulowanymi uszkodzeniami w oparciu o analizę sygnałów elektrycznych

Wstępne badania eksperymentalne, których celem była weryfikacja praktyczna proponowanej metody przeprowadzone zostały na silnikach STg80X-4C zarówno bez uszkodzeń, jak i z uszkodzeniami sztucznie symulowanymi. Uszkodzenia łożysk symulowane były za pomocą silnika prądu stałego z niewyważonym wirnikiem o regulowanej prędkości obrotowej, który został przytwierdzony do korpusu badanego silnika indukcyjnego [15]. Częstotliwość drgań regulowano poprzez zmianę prędkości obrotowej wirnika silnika prądu stałego. Drgania pochodzące od silnika prądu stałego (wzbudnika drgań) wymuszały drgania korpusu badanej maszyny indukcyjnej. Sposób wykonywania pomiarów był następujący: po uruchomieniu silnika nastawiano odpowiednią częstotliwość rotacji wirnika silnika prądu stałego i wykonywano jednocześnie pomiar prądów i napięć zasilających badany silnik indukcyjny. Do akwizycji mierzonych sygnałów wykorzystano kartę PXI 4462, umożliwiającą jednoczesny pomiar prądu i napięcia. Dzięki temu, że oscylacje szczeliny powietrznej w silniku miały taką samą częstotliwość jak częstotliwość drgań wzbudnika, podejście takie pozwoliło na uzyskanie większej jednoznaczności otrzymanych wyników, niż w przypadku pomiarów na uszkodzonych łożyskach oraz na dokładniejsze określenie zależności pomiędzy wibracjami pochodzącymi od drgań wzbudnika a składowymi widma mocy chwilowej. W dalszej części tego rozdziału przedstawiono wyniki badań dla silnika nieuszkodzonego oraz silników z uszkodzeniami łożysk symulowanymi za pomocą wzbudnika drgań, w którym kolejno nastawiono trzy częstotliwości rotacji wirnika: 40 Hz, 27,3 Hz oraz 30 Hz. Pomiary przeprowadzono przy różnych wartościach momentu obciążenia badanych maszyn.

6.4.1. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego

Na rysunku 6.19 przedstawione zostało widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego bez wibracji zewnętrznych przy obciążeniu równym 70% prądu znamionowego I_N .



Rys.6.19. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego przy obciążeniu równym 70 % prądu znamionowego I_N

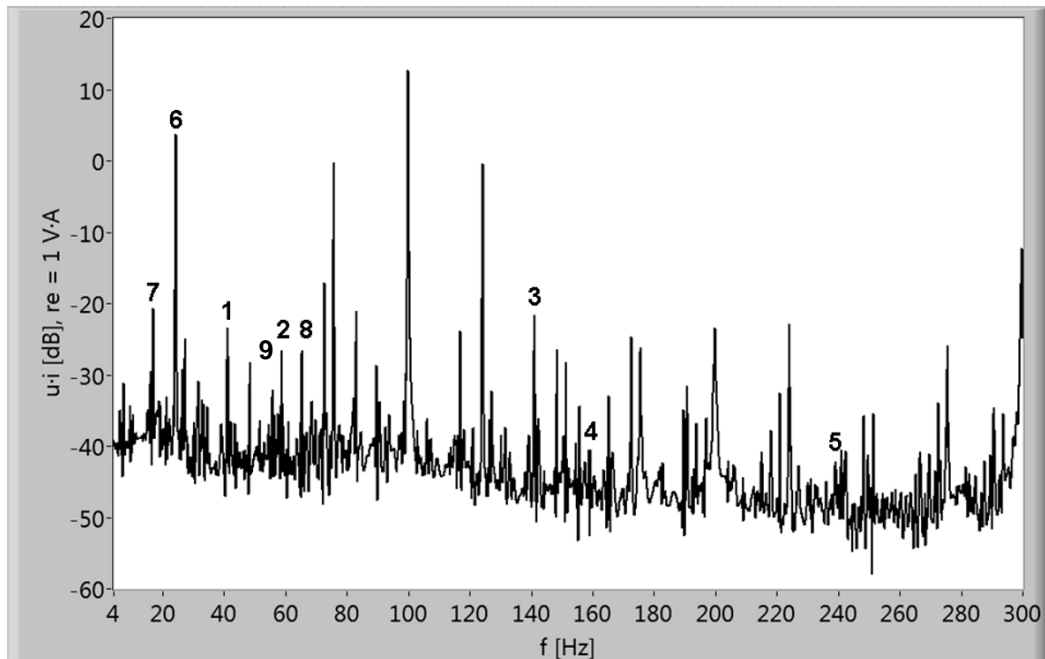
Składowe w widmie przedstawionym na rysunku wynikają z obecności harmoniczných napięcia zasilającego silnik. W widmie mocy chwilowej pojawiają się również prążki związane z modulacją sygnałem o częstotliwości rotacji wirnika składowych prądu wynikających z napięcia sieci.

6.4.2. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem łożyska symulowanym przez drgania wzbudnika o częstotliwości $f_H = 40$ Hz

Na rysunku 6.20 przedstawiono wynik pomiaru dla silnika indukcyjnego z symulowanym uszkodzeniem łożyska przy obciążeniu równym 70% prądu znamionowego I_N .

Uszkodzenie zasymulowano wprowadzając zewnętrzne wibracje, generowane przez wzbudnik, o częstotliwości $f_H = 40$ Hz (prążek numer 1). W otrzymanych wynikach występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej f_H . Ponadto w widmie obecne są składowe o częstotliwościach będących rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, sygnałem o częstotliwości charakterystycznej. Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 60 Hz, 140 Hz, 160 Hz i 240 Hz (odpowiednio prążki numer: 2, 3, 4, 5).

Składowe 60 Hz oraz 140 Hz są kombinacją częstotliwości: $2 \cdot f - f_H$ i $2 \cdot f + f_H$ przy czym f jest częstotliwością napięcia zasilającego.

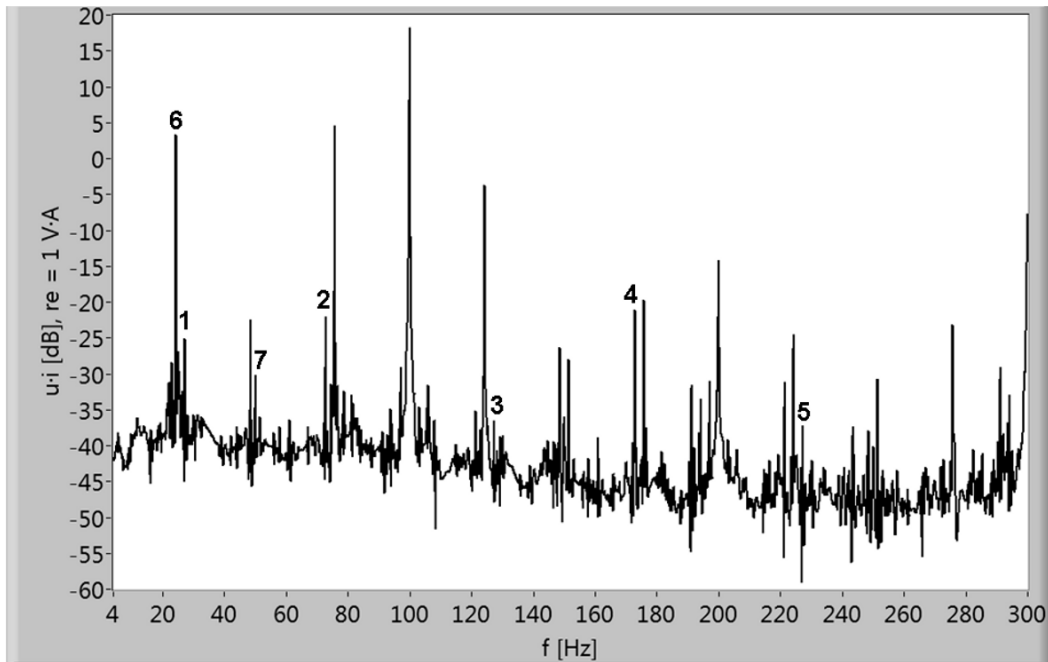


Rys.6.20. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego przy częstotliwości drgań $f_H = 40$ Hz i obciążeniu równym 70 % prądu znamionowego I_N

Prążki o częstotliwościach 160 Hz i 240 Hz to kombinacja częstotliwości $4 \cdot f - f_H$ i $4 \cdot f + f_H$. Ponadto w widmie mocy chwilowej pojawiają się prążki związane z prędkością rotacji wirnika silnika indukcyjnego (np. prążek numer 6, którego częstotliwość wynosi 24,2 Hz i jest to częstotliwość rotacji wirnika silnika indukcyjnego f_r oraz prążek numer 9, którego częstotliwość wynosi 48,4 Hz) oraz prążki będące produktami modulacji tych składowych sygnałem o częstotliwości symulowanego uszkodzenia (prążki numer 7 i 8, o częstotliwościach odpowiednio: 15,8 Hz oraz 64,2 Hz). Prążek numer 7 jest kombinacją częstotliwości $|f_r - f_H|$ natomiast prążek numer 8 to suma częstotliwości $f_r + f_H$.

6.4.3. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem łożyska symulowanym przez drgania wzbudnika o częstotliwości $f_H = 27,3$ Hz

Kolejny przykład wpływu symulowanego uszkodzenia łożysk na moc chwilową przedstawiono na rysunku 6.21.



Rys.6.21. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego przy częstotliwości drgań $f_H = 27,3$ Hz i obciążeniu równym 70 % prądu znamionowego I_N

Przedstawia on wynik pomiaru wartości wielkości zasilających silnik indukcyjny z symulowanym uszkodzeniem łożyska o częstotliwości $f_H = 27,3$ Hz przy obciążeniu równym 70% prądu znamionowego I_N .

Podobnie jak w przypadku symulacji uszkodzenia łożyska sygnałem wibracji o częstotliwości 40 Hz w widmie mocy chwilowej występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 27,3$ Hz (prążek numer 1) a także jej harmoniczne.

W widmie obecne są również częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, sygnałem o częstotliwości charakterystycznej. Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 72,7 Hz, 127,3 Hz, 172,3 Hz i 227,3 Hz (prążki odpowiednio: 2, 3, 4, 5). Składowe 72,7 Hz oraz 127,3 Hz są kombinacją częstotliwości: $2 \cdot f - f_H$ i $2 \cdot f + f_H$ przy czym f jest częstotliwością napięcia zasilającego. Prążki o częstotliwościach 172,3 Hz i 227,3 Hz to kombinacja częstotliwości $4 \cdot f - f_H$ i $4 \cdot f + f_H$.

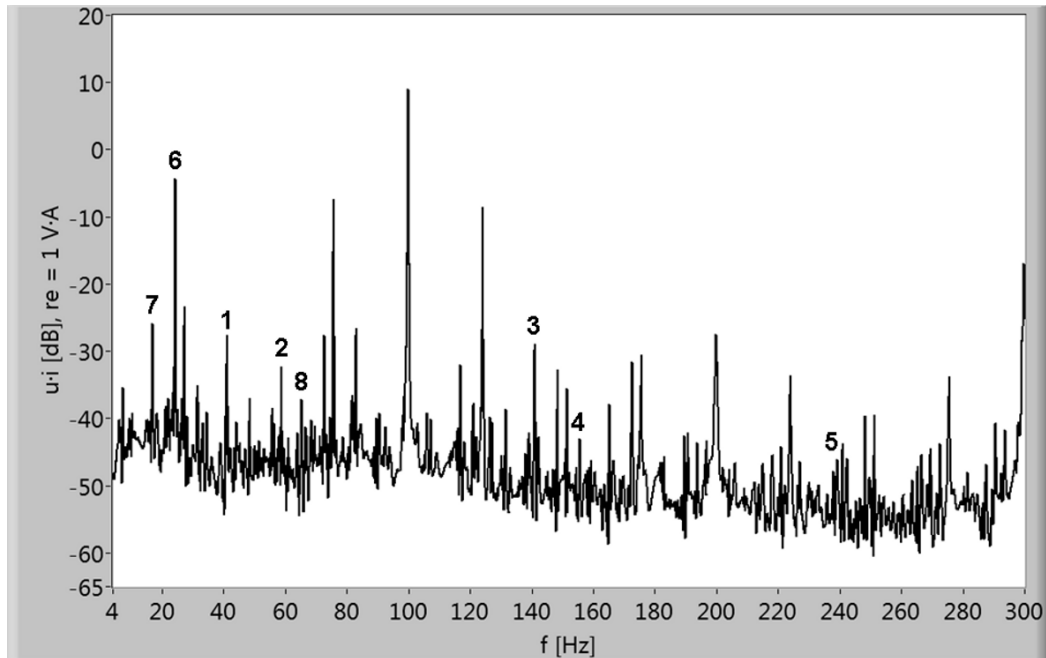
Również w tym przypadku w widmie mocy chwilowej pojawiają się prążki związane z prędkością rotacji wirnika silnika indukcyjnego (prążek numer 6, którego częstotliwość wynosi $f_r = 24,2$ Hz) oraz prążki będące produktami modulacji tych

składowych sygnałem o częstotliwości symulowanego uszkodzenia (np. prążek numer 7 o częstotliwości 51,5 Hz). Prążek numer 7 jest kombinacją częstotliwości $f_r + f_H$.

6.4.4. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem łożyska symulowanym przez drgania wzбудnika o częstotliwości $f_H = 30$ Hz

W celu sprawdzenia wpływu obciążenia na składowe, występujące w widmie mocy chwilowej, przeprowadzono badania dla innych wartości momentu obciążenia. Na rysunku 6.22 zaprezentowano przykładowe widmo mocy chwilowej dla silnika z symulowanym uszkodzeniem o częstotliwości $f_H = 30$ Hz pracującego na biegu jałowym.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że niezależnie od wartości momentu obciążenia w widmie mocy chwilowej występuje zarówno składowa charakterystyczna dla uszkodzenia (prążek numer 1) jak również składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 2, 3, 4, 5).



Rys.6.22. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego przy częstotliwości drgań $f_H = 30$ Hz, pracującego na biegu jałowym

W widmie mocy chwilowej pojawią się również prążki związane z prędkością rotacji wirnika silnika indukcyjnego (np. prążek 6, którego częstotliwość wynosi 24,9 Hz) oraz prążki będące produktami modulacji tych składowych sygnałem o częstotliwości symulowanego uszkodzenia. Zmianie ulegają jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmoniczných.

6.4.5. Podsumowanie

W rozdziale 6.4 zamieszczono jedynie przykładowe wyniki badań silnika indukcyjnego z uszkodzeniami symulowanymi za pomocą zewnętrznych wibracji, wybrane z szeregu przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Pomiarы przeprowadzone zostały zarówno dla silników nieuszkodzonych oraz dla silników, w których symulowano uszkodzenia łożysk.

Uszkodzenia łożysk symulowane były przez wprowadzenie dodatkowych wibracji zewnętrznych z określonymi częstotliwościami, symulującymi uszkodzenia łożysk.

Badanymi maszynami były silniki STg80X-4C, do których przymocowano silnik prądu stałego z regulowaną częstotliwością wirowania wirnika. Badania na obiektach rzeczywistych, podobnie jak badania symulacyjne opisane w rozdziale 5, potwierdziły założenie przyjętego modelu zjawisk, zachodzących w silniku indukcyjnym – powstanie uszkodzeń łożysk w silniku skutkuje pojawieniem się w widmie mocy chwilowej składowych harmoniczných, związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Podobnie jak w przypadku badań modelu matematycznego silnika indukcyjnego analiza otrzymanych wyników wstępnych badań eksperymentalnych silników indukcyjnych potwierdziła, iż zjawisko to występuje niezależnie od częstotliwości generowanych drgań symulujących uszkodzenia łożysk oraz od wartości momentu obciążenia silnika. Wyniki przykładowych badań, wraz z analizą występujących w widmie mocy chwilowej prążków o częstotliwościach, związanych z sygnałem wibracji zewnętrznych, symulującym uszkodzenia łożysk zestawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Zestawienie składowych związanych z uszkodzeniem łożyska symulowanym przez wprowadzenie oscylacji momentu obciążenia, zidentyfikowanych w widmie mocy chwilowej otrzymanym z badań silników indukcyjnych

Częstotliwość wprowadzonego zaburzenia	$f_H = 73,1 \text{ Hz}$	$f_H = 118,9 \text{ Hz}$	$f_H = 95,6 \text{ Hz}$
Składowe związane z sygnałem wibracji zewnętrznych, symulującym uszkodzenia łożysk zidentyfikowane w widmie mocy chwilowej	$f_H = 73,1 \text{ Hz}$ $2 \cdot f - f_H = 26,9 \text{ Hz}$ $2 \cdot f + f_H = 173,1 \text{ Hz}$ $4 \cdot f - f_H = 126,9 \text{ Hz}$ $4 \cdot f + f_H = 273,1 \text{ Hz}$ $6 \cdot f - f_H = 226,9 \text{ Hz}$ $6 \cdot f + f_H = 373,1 \text{ Hz}$ $8 \cdot f + f_H = 473,1 \text{ Hz}$	$f_H = 118,9 \text{ Hz}$ $ 2 \cdot f - f_H = 18,9 \text{ Hz}$ $2 \cdot f + f_H = 218,9 \text{ Hz}$ $4 \cdot f - f_H = 81,1 \text{ Hz}$ $4 \cdot f + f_H = 318,9 \text{ Hz}$ $6 \cdot f - f_H = 181,1 \text{ Hz}$ $6 \cdot f + f_H = 418,1 \text{ Hz}$ $8 \cdot f - f_H = 281,1 \text{ Hz}$	$f_H = 95,6 \text{ Hz}$ $2 \cdot f + f_H = 195,6 \text{ Hz}$ $4 \cdot f - f_H = 104,4 \text{ Hz}$ $4 \cdot f + f_H = 295,6 \text{ Hz}$ $6 \cdot f - f_H = 204,4 \text{ Hz}$ $6 \cdot f + f_H = 395,6 \text{ Hz}$ $8 \cdot f - f_H = 304,4 \text{ Hz}$ $8 \cdot f + f_H = 495,6 \text{ Hz}$

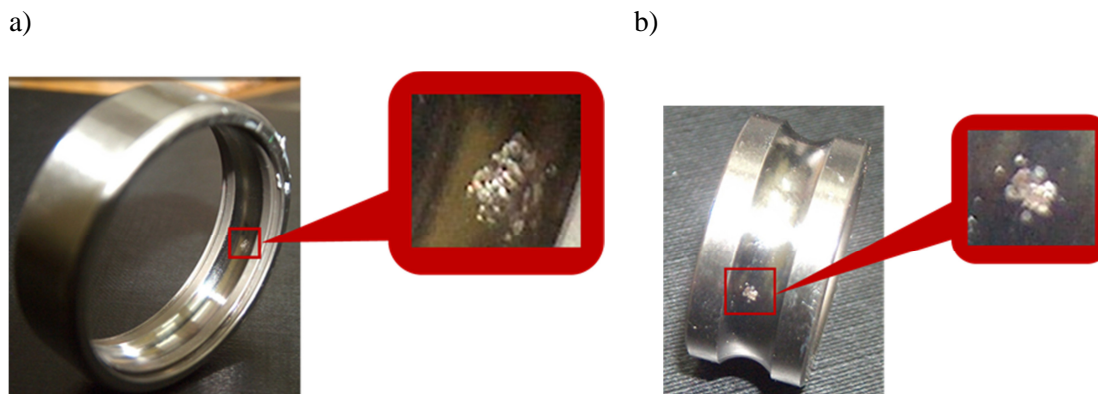
Wyniki przeprowadzonych wstępnych badań eksperymentalnych silnika indukcyjnego potwierdziły również fakt, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości wprowadzonego zaburzenia, co dowodzi tezy z rozdziału 2.

6.5. Badania silników indukcyjnych z rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk w oparciu o analizę mocy chwilowej

Celem praktycznego potwierdzenia wyników badań symulacyjnych i wstępnych badań eksperymentalnych opartych na metodzie diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego maszynę indukcyjną w dalszym ciągu pracy przeprowadzone zostały badania szeregu silników z uszkodzonymi łożyskami.

Badania przeprowadzone zostały zarówno na silnikach bez uszkodzeń, jak i z celowo uszkodzonymi łożyskami [13].

Uszkodzenia były wprowadzane albo do pierścienia zewnętrznego, albo do pierścienia wewnętrznego. Rysunek 6.23 przedstawia przykładowe uszkodzenia wykonane w elementach łożyska. Dla tych badań opracowano własną technologię wprowadzania uszkodzeń do łożyska.



Rys.6.23. Uszkodzenia elementów łożyska wprowadzone:
a) w bieżni zewnętrznej, b) w bieżni wewnętrznej

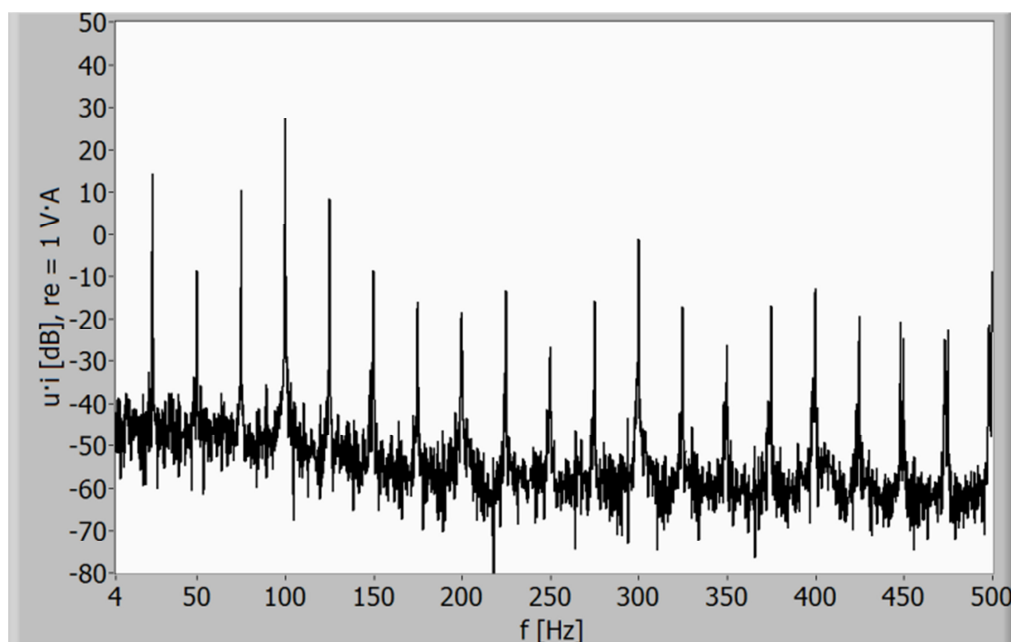
W przypadku sztucznego wprowadzenia uszkodzenia do łożyska, z reguły w widmie wibracji pojawiają się zarówno składowe odpowiedzialne za wprowadzone uszkodzenie, jak i składowe charakterystyczne dla innych uszkodzeń łożyska. Należy przypuszczać, że wprowadzenie do łożyska jednego uszkodzenia powoduje szybki rozwój uszkodzeń wtórnych. Zatem w takim przypadku również w widmie mocy chwilowej należy oczekiwać składowych harmonicznych, charakterystycznych dla dwóch (lub więcej) rodzajów uszkodzeń. Tak więc dla badania nowych metod diagnostycznych nie jest wystarczające wprowadzenie do łożyska określonego uszkodzenia, należy jeszcze stale w trakcie badań kontrolować rozwój ewentualnych uszkodzeń wtórnych za pomocą innego, sprawdzonego systemu diagnostycznego.

Metoda porównawcza, która została wykorzystana na stanowisku diagnostycznym, oparta jest na pomiarach wibracji. Do oceny proponowanej metody użyty został system diagnostyki wibracyjnej DREAM, opisany w rozdziale 6.2.2 niniejszej rozprawy.

W dalszej części tego rozdziału przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla silnika bez uszkodzeń oraz dla silników z uszkodzeniami bieżni zewnętrznych i wewnętrznych łożysk. Pomiarów wykonano przy różnych głębokościach wprowadzonych defektów łożysk i kilku wartościach momentu obciążenia badanych maszyn.

6.5.1. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego

Na rysunku 6.24 przedstawiono widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego.



Rys.6.24. Widmo mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego

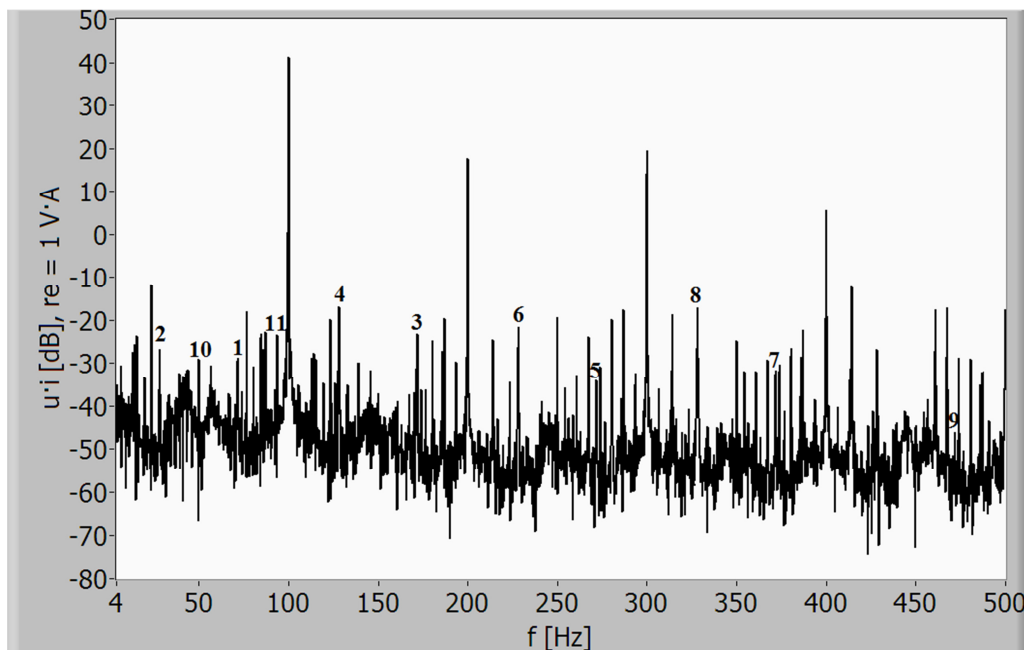
Wszystkie składowe w widmie przedstawionym na rysunku wynikają z normalnej pracy maszyny i są zgodne z oczekiwaniami.

Składowe te związane są z obecnością harmonicznego napięcia zasilającego silnik i częstotliwości związanej z prędkością rotacji wirnika. Również system diagnostyki wibracyjnej DREAM nie zidentyfikował żadnych uszkodzeń łożysk badanego silnika.

6.5.2. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia zewnętrznego łożyska

Na rysunku 6.25 przedstawiono widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia zewnętrznego łożyska o średniej głębokości uszkodzenia, przy obciążeniu równym 100% I_N .

W otrzymanych wynikach występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 71,9$ Hz (prążek numer 1). Ponadto w widmie obecne są częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną. Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 28,1 Hz, 128,1 Hz, 171,9 Hz, 228,1 Hz, 271,9 Hz, 328,1 Hz, 371,9 Hz, 471,9 Hz (prążki odpowiednio: 2, 4, 3, 6, 5, 8, 7, 9).



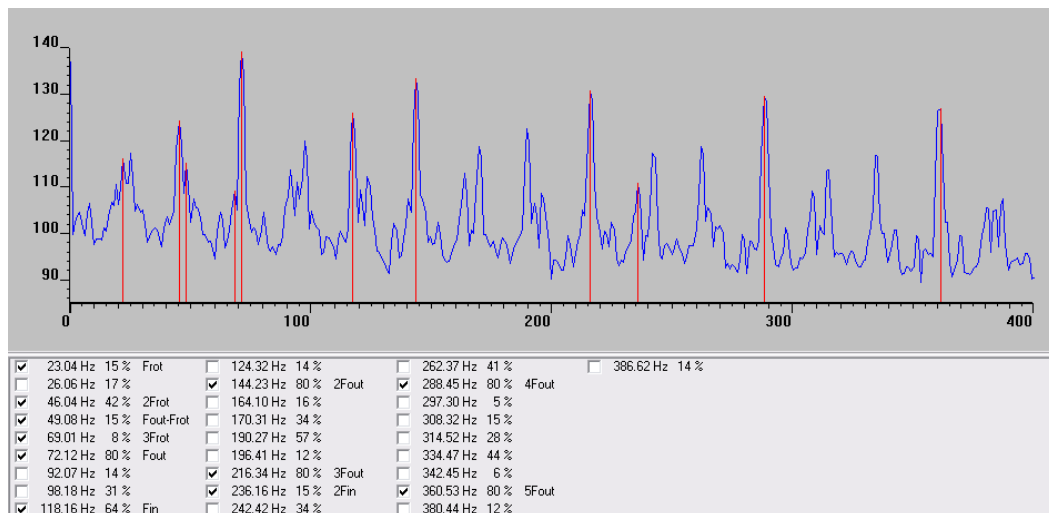
Rys.6.25. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym $100\% I_n$

Składowe 28,1 Hz oraz 171,9 Hz są kombinacją częstotliwości: $2\cdot f - f_H$ i $2\cdot f + f_H$, przy czym f jest częstotliwością napięcia zasilającego. Prążek o częstotliwości 271,9 Hz to kombinacja częstotliwości $4\cdot f + f_H$ a prążek o częstotliwości 128,1 Hz są kombinacją częstotliwości $4\cdot f - f_H$. Natomiast składowa o częstotliwości 371,9 Hz to kombinacja częstotliwości $6\cdot f + f_H$ a składowa 228,1 Hz to kombinacja częstotliwości $6\cdot f - f_H$. Składowe 328,1 Hz oraz 471,9 Hz są kombinacją częstotliwości $8\cdot f - f_H$ i $8\cdot f + f_H$.

Kolejne prążki w widmie to produkty modulacji składowej związanej z prędkością rotacji wirnika f_r składową o częstotliwości charakterystycznej f_H (prążki 10 i 11). Składowe te są kombinacją częstotliwości $|f_r - f_H|$ i $f_r + f_H$ i wynoszą odpowiednio 48,5 Hz i 95,3 Hz.

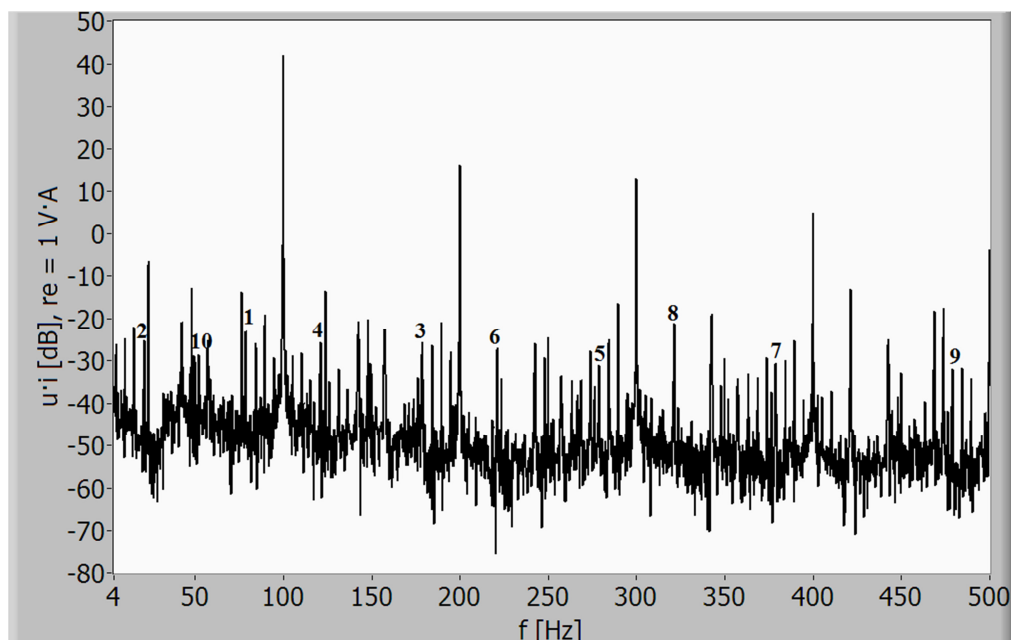
Również system diagnostyki wibracyjnej DREAM zidentyfikował uszkodzenie pierścienia zewnętrznego łożyska. System ten podawał częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 72,12 Hz. Widmo drgań, uzyskane z systemu DREAM przedstawione jest na rysunku 6.26.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



Rys.6.26. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym $100\% I_n$ uzyskane z systemu DREAM

Celem sprawdzenia wpływu obciążenia na składowe, występujące w widmie mocy chwilowej, autor pracy przeprowadził badania dla innych wartości momentu obciążenia. Na rysunku 6.27 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, uzyskane z pomiarów dla silnika z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym łożyska, przy obciążeniu równym 80% prądu znamionowego.

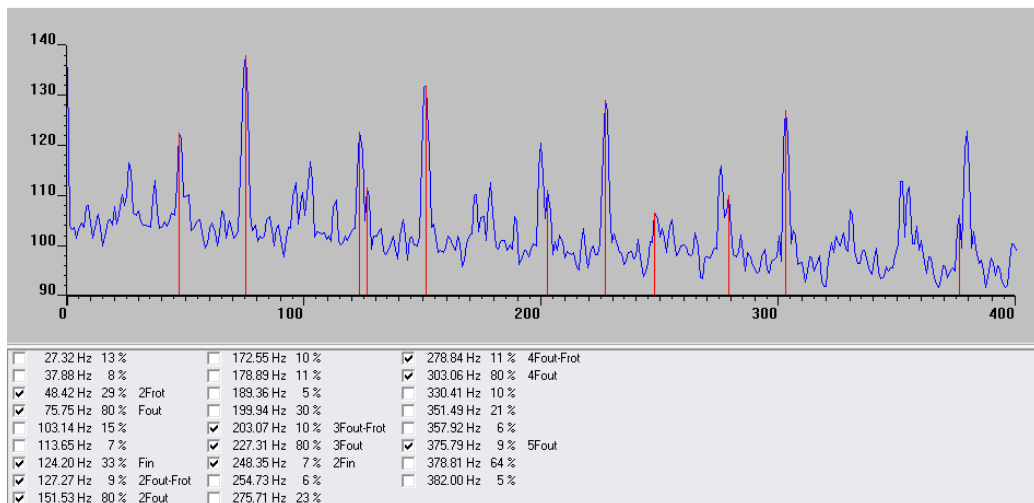


Rys.6.27. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym $80\% I_n$

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że niezależnie od wartości momentu obciążenia w widmie mocy chwilowej występuje zarówno składowa charakterystyczna dla uszkodzenia $f_H = 75,8$ Hz (prążek numer 1) jak również składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Zmianie ulegają jedynie amplitudy poszczególnych składowych harmonicznnych. Kolejny prążek w widmie to produkt modulacji składowej związanej z prędkością rotacji wirnika f_r składową o częstotliwości charakterystycznej f_H (prążek 10).

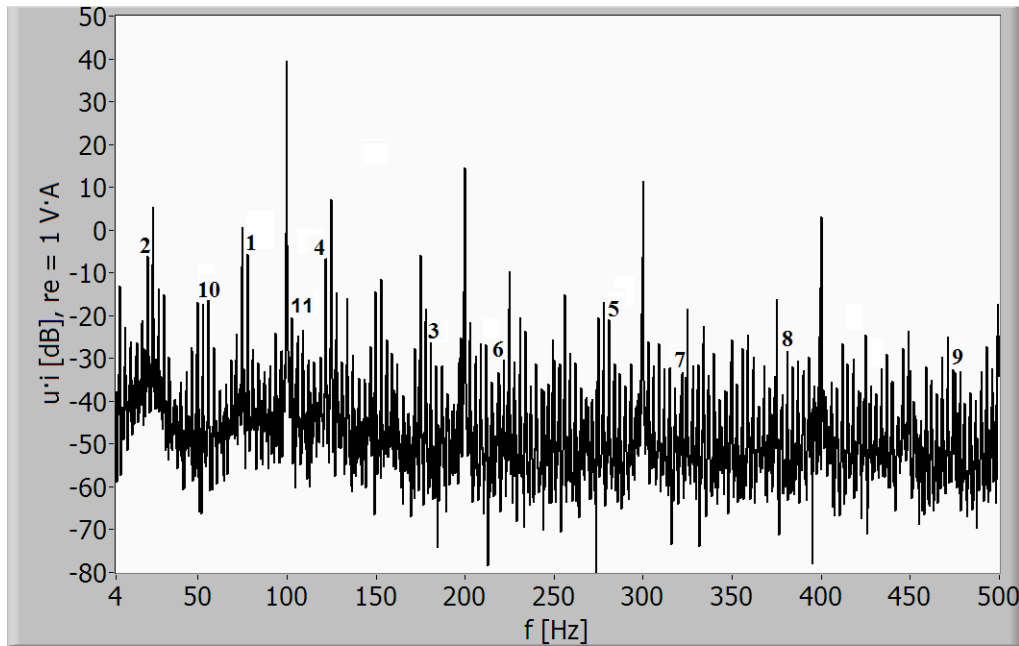
System DREAM również raportował uszkodzenie bieżni zewnętrznej, podając częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 75,75 Hz (rysunek 6.28).



Rys.6.28. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym 80% I_n uzyskane z systemu DREAM

Autor pracy przeprowadził również badania dla silników z zamontowanymi łożyskami, w których wykonano uszkodzenia bieżni zewnętrznych o różnych głębokościach. Na rysunku 6.29 przedstawiono przykładowy wynik badań dla silnika indukcyjnego z dużym defektem bieżni zewnętrznej łożyska.

W otrzymanych wynikach również występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 77,9$ Hz (prążek numer 1). Ponadto w widmie mocy chwilowej obecne są częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną.



Rys.6.29. Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska o dużej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym 70% I_n

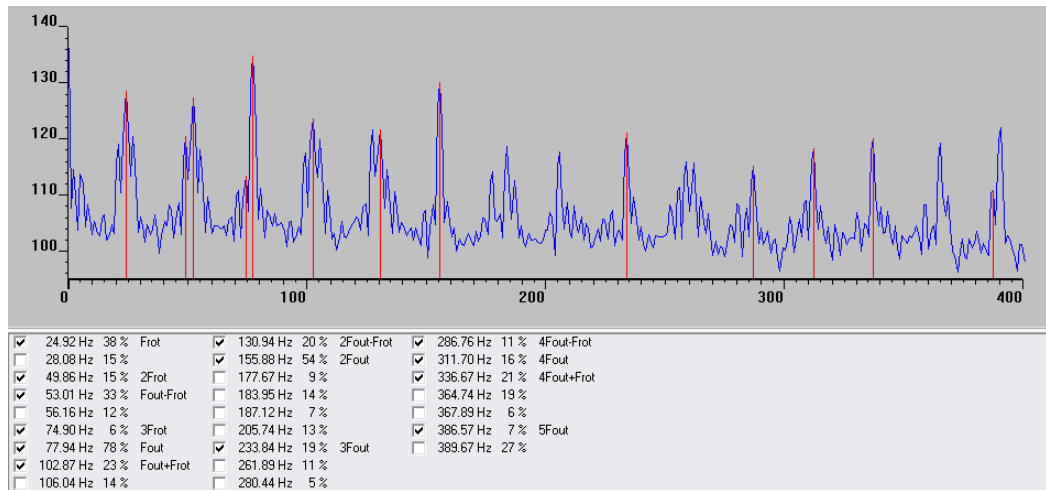
Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 22,1 Hz, 122,1 Hz, 177,9 Hz, 222,1 Hz, 277,9 Hz, 322,1 Hz, 377,9 Hz, 477,9 Hz (prążki odpowiednio: 2, 4, 3, 6, 5, 7, 8, 9). Składowe 22,1 Hz oraz 177,9 Hz są kombinacją częstotliwości: $2 \cdot f - f_H$ i $2 \cdot f + f_H$, przy czym f jest częstotliwością napięcia zasilającego. Prążek o częstotliwości 277,9 Hz to kombinacja częstotliwości $4 \cdot f + f_H$ a prążek o częstotliwości 122,1 Hz jest kombinacją częstotliwości $4 \cdot f - f_H$. Natomiast składowa o częstotliwości 377,9 Hz to kombinacja częstotliwości $6 \cdot f + f_H$ a składowa 222,1 Hz to kombinacja częstotliwości $6 \cdot f - f_H$. Składowe 322,1 Hz oraz 477,9 Hz są kombinacją częstotliwości $8 \cdot f - f_H$ i $8 \cdot f + f_H$. Kolejne prążki w widmie mocy chwilowej to produkty modulacji składowej związanej z prędkością rotacji wirnika f_r , składową o częstotliwości charakterystycznej f_H , których częstotliwości wynoszą 52,9 Hz i 102,9 Hz (prążki odpowiednio 10 i 11).

System DREAM również raportował uszkodzenie bieżni zewnętrznej, o dużej głębokości defektu podając częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 77,94 Hz (rysunek 6.30).

W przypadku uszkodzeń łożysk o dużej głębokości amplitudy składowych oczekiwanych dla uszkodzeń w widmie mocy chwilowej mają większe wartości, w porównaniu do amplitud składowych występujących w widmie mocy chwilowej dla uszkodzeń o mniejszym stopniu zaawansowania. Oznacza to, iż amplitudy składowych

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

o częstotliwościach charakterystycznych dla poszczególnych uszkodzeń można wykorzystać do oceny stanu zaawansowania danego typu uszkodzenia łożyska.



Rys.6.30. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym $70\% I_n$

W każdym przypadku diagnozy uzyskane z systemu DREAM potwierdzały występowanie uszkodzeń bieżni zewnętrznej łożysk.

6.5.3. Widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego łożyska

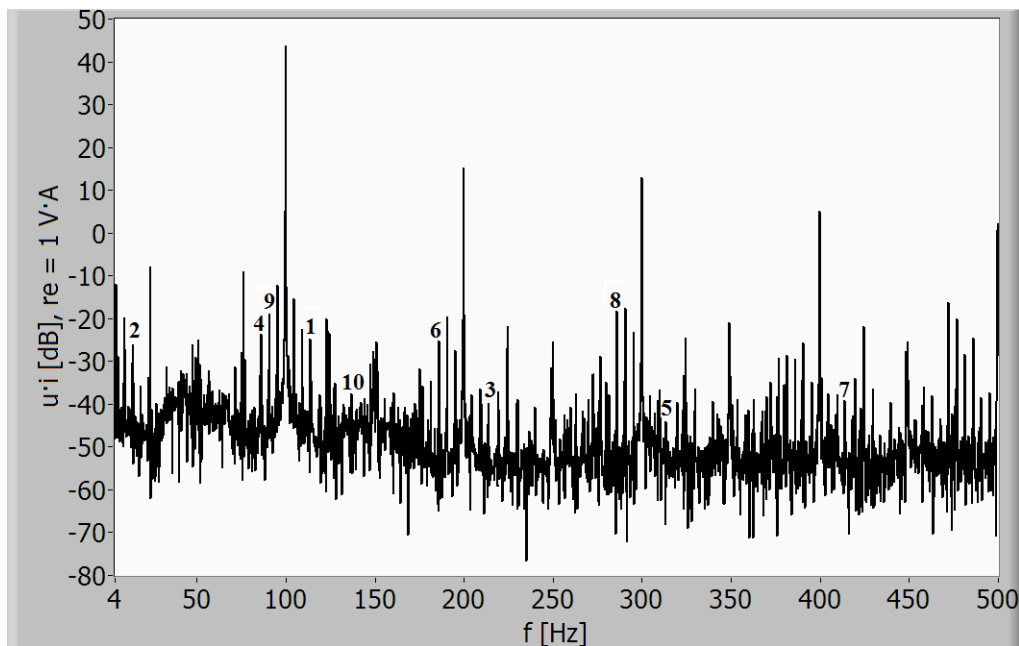
Na rysunku 6.31 przedstawiono widmo mocy chwilowej dla silnika z uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego łożyska o średnim stopniu zaawansowania uszkodzenia.

Badania wykonywano dla silnika indukcyjnego przy znamionowym obciążeniu.

Podobnie jak w przypadku uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska w widmie mocy chwilowej występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 113,9$ Hz (prążek numer 1).

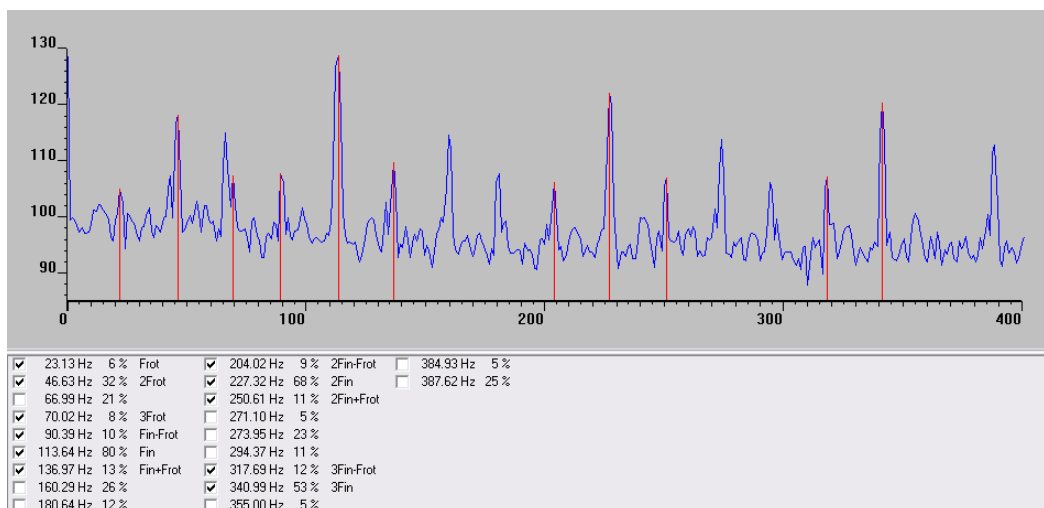
W widmie obecne są również częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną dla uszkodzenia pierścienia wewnętrznego. Są to prążki o częstotliwościach 13,9 Hz, 213,9 Hz, 86,1 Hz, 313,9 Hz, 186,1, 413,9 Hz i 286,1 Hz (odpowiednio prążki numer 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Składowe 90,7 Hz oraz 137,8 Hz (prążek

9 i 10) są produktem modulacji składowych związanych z prędkością rotacji wirnika f_r składową charakterystyczną f_H .



Rys.6.31 Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym 100% I_n

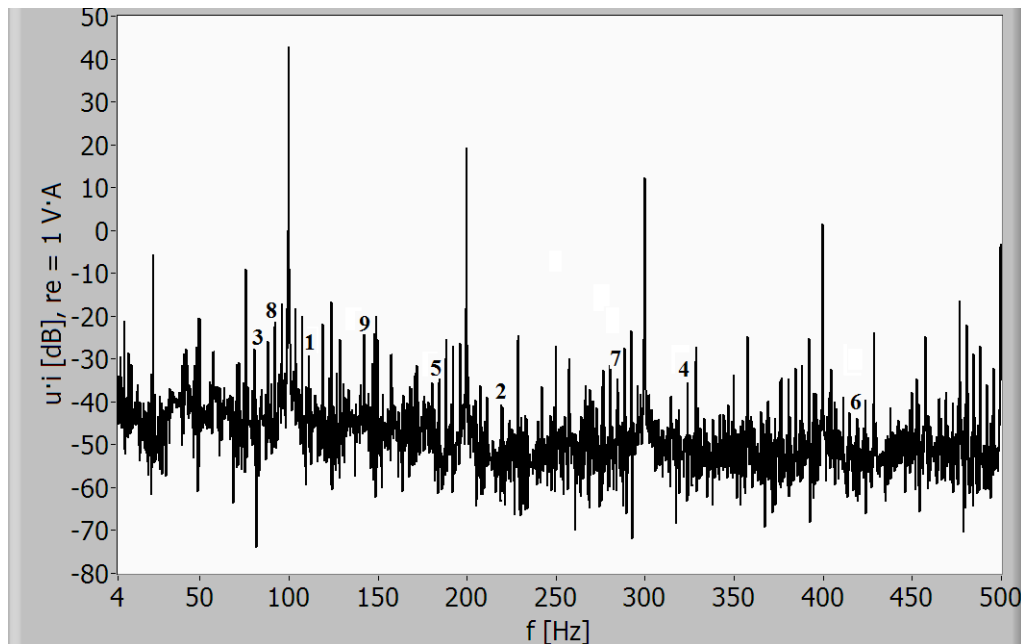
Również system diagnostyki wibracyjnej DREAM raportował uszkodzenie pierścienia wewnętrznego łożyska (rysunek 6.32).



Rys.6.32. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym 100% I_n uzyskane z systemu DREAM

System ten podając częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 113,64 Hz

Autor pracy przeprowadził badania dla innych wartości momentu obciążenia. Na rysunku 6.33 zaprezentowano widmo mocy chwilowej, uzyskane z pomiarów dla silnika z uszkodzeniem pierścienia wewnętrznego łożyska o średniej głębokości, przy obciążeniu równym 80% prądu znamionowego.

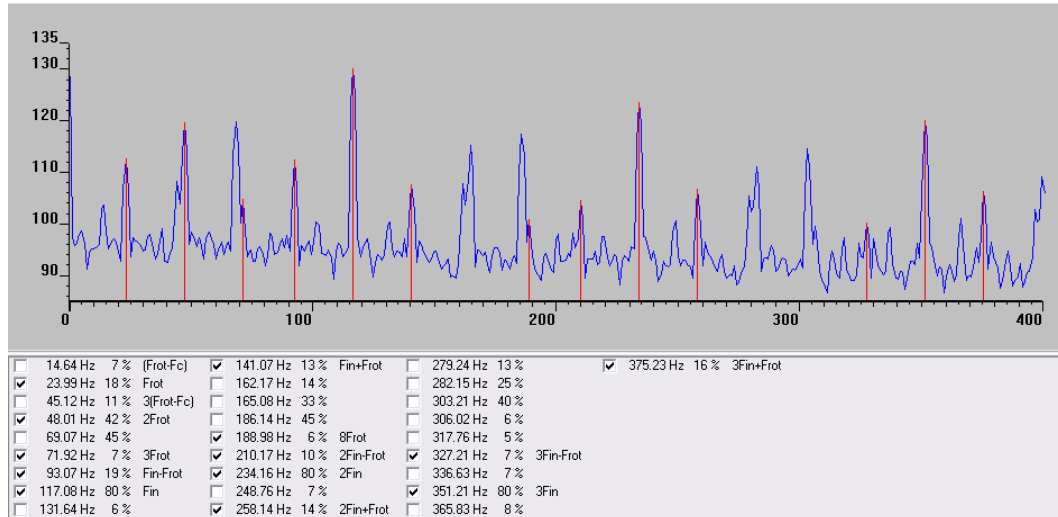


Rys.6.33 Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska o średniej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym 80% I_n

Można zauważyć, że niezależnie od wartości momentu obciążenia w widmie mocy chwilowej występuje zarówno składowa charakterystyczna dla uszkodzenia $f_H = 116,9$ Hz (prążek numer 1) jak również składowe, które są wynikiem modulacji częstotliwości obecnych w widmie silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną (prążki 2, 3, 4, 5, 6, 7). Kolejne prążki w widmie mocy chwilowej to produkty modulacji składowej związanej z prędkością rotacji wirnika f_r składową o częstotliwości charakterystycznej f_H (prążki 8 i 9).

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, iż w zależności od obciążenia zmianie ulegają amplitudy poszczególnych składowych harmoniczných.

Diagnozy uzyskane z systemu DREAM potwierdzały występowanie uszkodzenia łożyska. System raportował uszkodzenie bieżni wewnętrznej, podając częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 117,08 Hz (rysunek 6.34).

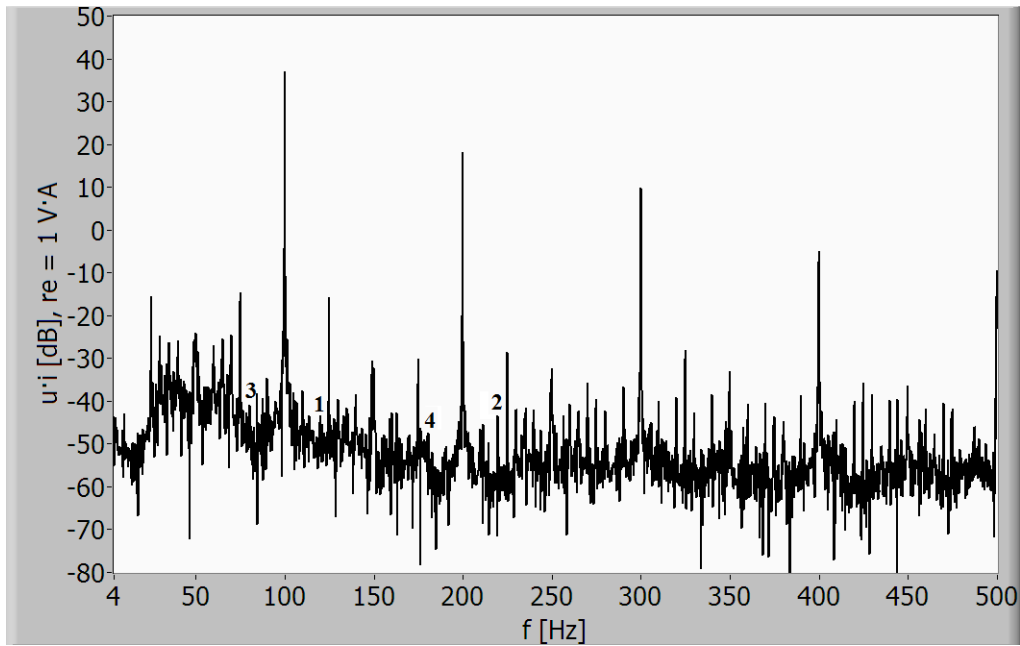


Rys.6.34. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska o dużej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym 80% I_n uzyskane z systemu DREAM

Przeprowadzono również badania dla silników z zamontowanymi łożyskami, w których wykonano uszkodzenia bieżni wewnętrznych o różnych głębokościach. Na rysunku 6.35 przedstawiono przykładowy wynik badań dla silnika indukcyjnego z małym defektem bieżni wewnętrznej łożyska.

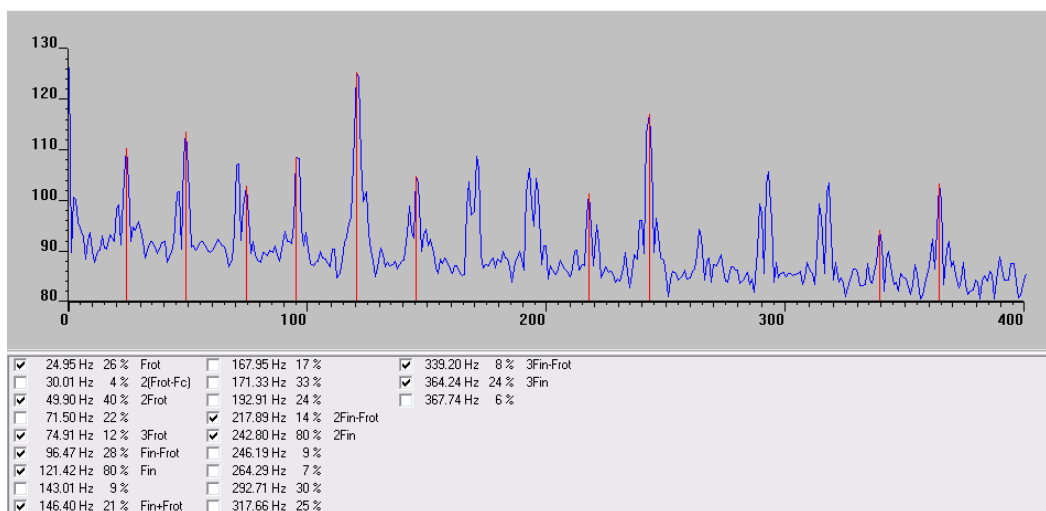
W otrzymanych wynikach także występuje oczekiwana składowa o częstotliwości charakterystycznej $f_H = 121,6$ Hz (prążek numer 1). Ponadto w widmie mocy chwilowej obecne są częstotliwości będące rezultatem modulacji składowych, występujących w widmie mocy chwilowej dla silnika nieuszkodzonego, składową charakterystyczną. Są to prążki, których częstotliwości wynoszą 78,4 Hz, 178,4 oraz 222,6 Hz (prążki odpowiednio: 3, 4 i 2). Składowa 78,4 Hz jest kombinacją częstotliwości $4 \cdot f - f_H$, przy czym f jest częstotliwością napięcia zasilającego. Prążek o częstotliwości 178,4 Hz to kombinacja częstotliwości $6 \cdot f - f_H$, a składowa 222,6 Hz to kombinacja częstotliwości $2 \cdot f + f_H$.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



Rys.6.35 Widmo mocy chwilowej dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska o małej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym $70\% I_n$

Inny stopień uszkodzenia łożyska potwierdziły również diagnozy uzyskane z systemu DREAM. System zidentyfikował uszkodzenie bieżni wewnętrznej o małej głębokości defektu, podając częstotliwość charakterystyczną dla tego typu uszkodzenia 121,42 Hz (rysunek 6.36).



Rys.6.36. Widmo wibracji dla silnika indukcyjnego z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska o dużej głębokości uszkodzenia przy obciążeniu równym $80\% I_n$ uzyskane z systemu DREAM

W przypadku uszkodzeń łożysk o małej głębokości amplitudy składowych diagnostycznych w widmie mocy chwilowej mają mniejsze wartości i jest ich mniej, w porównaniu do amplitud składowych występujących w widmie mocy chwilowej dla uszkodzeń o większym stopniu zaawansowania.

6.6. Podsumowanie

W rozdziale 6 opisano opracowaną metodykę przeprowadzania badań diagnostycznych uszkodzeń łożysk silników indukcyjnych. Przedstawiono również wykorzystywane do badań stanowisko laboratoryjne oraz zaprezentowano wyniki pomiarów testowych, wykonanych na stanowisku badawczym przy użyciu różnych metod i przyrządów pomiarowych. Dalej umieszczono przykładowe wyniki badań silników indukcyjnych wybrane z szeregu przeprowadzonych pomiarów. Badania przeprowadzone zostały zarówno dla silników nieuszkodzonych, jak i dla silników, w których zamontowano uszkodzone łożyska. Uszkodzono bieżnie wewnętrzne i zewnętrzne szeregu łożysk tocznych. Badania wykonane zostały przy zasilaniu napięciem sieci elektroenergetycznej, przy różnych wartościach momentu obciążenia badanych silników. Wykonano szereg pomiarów dla różnych głębokości uszkodzeń bieżni zewnętrznej i wewnętrznej łożysk.

Przeprowadzone badania silników indukcyjnych, w których zamontowano uszkodzone łożyska potwierdziły założenia przyjętego modelu zjawisk zachodzących w silniku indukcyjnym – w widmie iloczynu napięcia zasilania i prądu stojana pojawiają się składowe harmoniczne o częstotliwościach związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Analiza otrzymanych wyników badań potwierdziła, iż zjawisko to występuje dla różnych rodzajów uszkodzeń łożysk, niezależnie od wartości momentu obciążenia silnika.

Wyniki przeprowadzonych badań diagnostycznych uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego potwierdziły również fakt, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości charakterystycznej dla danego typu uszkodzenia.

Na bazie przeprowadzonych badań autor pracy dokonał zgłoszenia w sprawie uzyskania patentu na wynalazek pt. „Sposób i układ do przeprowadzania badań diagnostycznych łożysk tocznych silników indukcyjnych” [14]. Zgłoszenie zostało oznaczone przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej numerem P.391575.

Zgłoszenie dotyczy opracowania układu pomiarowego służącego do wyznaczania charakterystycznych częstotliwości pojawiających się w mocy chwilowej silnika, na skutek uszkodzenia tego silnika oraz zwiększenia dokładności analizy tego sygnału.

Wyniki przykładowych badań, wraz z analizą występujących w widmie mocy chwilowej prązków o częstotliwościach, związanych z uszkodzeniami łożysk zestawiono w tabelach 6.2 (dla uszkodzenia bieżni zewnętrznej łożysk) oraz 6.3 (dla uszkodzenia bieżni wewnętrznej łożysk).

Tabela 6.2. Zestawienie składowych związanych z uszkodzeniami łożysk, zidentyfikowanych w widmie mocy chwilowej uzyskanych z przykładowych badań silników indukcyjnych z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną łożyska

Uszkodzenie bieżni zewnętrznej	Średnia głębokość	Średnia głębokość	Duża głębokość
Obciążenie	100% I_n	Obciążenie 80% I_n	Obciążenie 70% I_n
Częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia	$f_H = 71,9$ Hz	$f_H = 75,8$ Hz	$f_H = 77,9$ Hz
Składowe związane z uszkodzeniem łożyska zidentyfikowane w widmie mocy chwilowej	$f_H = 71,9$ Hz $2 \cdot f - f_H = 28,1$ Hz $2 \cdot f + f_H = 171,9$ Hz $4 \cdot f - f_H = 128,1$ Hz $4 \cdot f + f_H = 271,9$ Hz $6 \cdot f - f_H = 228,1$ Hz $6 \cdot f + f_H = 371,9$ Hz $8 \cdot f - f_H = 328,1$ Hz $8 \cdot f + f_H = 471,9$ Hz $ f_r - f_H = 48,5$ Hz $f_r + f_H = 95,3$ Hz	$f_H = 75,8$ Hz $2 \cdot f - f_H = 24,2$ Hz $2 \cdot f + f_H = 175,8$ Hz $4 \cdot f - f_H = 124,2$ Hz $4 \cdot f + f_H = 275,8$ Hz $6 \cdot f - f_H = 224,8$ Hz $6 \cdot f + f_H = 375,8$ Hz $8 \cdot f - f_H = 324,2$ Hz $ f_r - f_H = 51,4$ Hz	$f_H = 77,9$ Hz $2 \cdot f - f_H = 22,1$ Hz $2 \cdot f + f_H = 177,9$ Hz $4 \cdot f - f_H = 122,1$ Hz $4 \cdot f + f_H = 277,9$ Hz $6 \cdot f - f_H = 222,1$ Hz $6 \cdot f + f_H = 377,9$ Hz $8 \cdot f + f_H = 477,9$ Hz $ f_r - f_H = 52,9$ Hz $f_r + f_H = 102,9$ Hz

W przypadku uszkodzeń łożysk o małej głębokości amplitudy składowych oczekiwanych dla uszkodzeń w widmie mocy chwilowej mają mniejsze wartości, w porównaniu do amplitud składowych występujących w widmie mocy chwilowej dla

uszkodzeń o większym stopniu zaawansowania. Oznacza to, iż amplitudy składowych o częstotliwościach charakterystycznych dla poszczególnych uszkodzeń, występujące w widmie mocy chwilowej, w początkowej fazie rozwoju defektu są trudniejsze do zidentyfikowania niż w przypadku bardziej rozwiniętych uszkodzeń łożysk.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, iż ważnym aspektem badań jest dobór odpowiedniego układu pomiarowego, którego zadaniem będzie filtracja składowej podstawowej oraz jej harmonicznym po stronie analogowej systemu pomiarowego, celem uzyskania większej rozdzielczości sygnałów po stronie cyfrowej systemu pomiarowego. Taki układ pomiarowy pozwoli na łatwiejszą identyfikację składowych oczekiwanych dla uszkodzeń w początkowej fazie uszkodzenia.

Tabela 6.3. Zestawienie składowych związanych z uszkodzeniami łożysk, zidentyfikowanych w widmie mocy chwilowej uzyskanych z przykładowych badań silników indukcyjnych z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną łożyska

Uszkodzenie bieżni wewnętrznej	Średnia głębokość	Średnia głębokość	Duża głębokość
Obciążenie	100% I_n	Obciążenie 80% I_n	Obciążenie 70% I_n
Częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia	$f_H = 113,9$ Hz	$f_H = 116,1$ Hz	$f_H = 121,4$ Hz
Składowe związane z uszkodzeniem łożyska zidentyfikowane w widmie mocy chwilowej	$f_H = 113,9$ Hz $ 2 \cdot f - f_H = 13,9$ Hz $2 \cdot f + f_H = 213,9$ Hz $4 \cdot f - f_H = 86,1$ Hz $4 \cdot f + f_H = 313,9$ Hz $6 \cdot f - f_H = 186,1$ Hz $6 \cdot f + f_H = 413,9$ Hz $8 \cdot f - f_H = 286,1$ Hz $ f_r - f_H = 90,7$ Hz $f_r + f_H = 137,8$ Hz	$f_H = 116,1$ Hz $2 \cdot f + f_H = 216,9$ Hz $4 \cdot f - f_H = 83,1$ Hz $4 \cdot f + f_H = 316,9$ Hz $6 \cdot f - f_H = 183,1$ Hz $6 \cdot f + f_H = 416,9$ Hz $8 \cdot f - f_H = 283,1$ Hz $ f_r - f_H = 92,5$ Hz $f_r + f_H = 141,3$ Hz	$f_H = 121,4$ Hz $2 \cdot f + f_H = 221,4$ Hz $4 \cdot f - f_H = 78,6$ Hz $6 \cdot f - f_H = 178,6$ Hz

W oparciu o wyniki badań przeprowadzonych w niniejszej pracy, opracowano propozycje dalszych modyfikacji układu pomiarowego. Propozycje te zostaną zgłoszone do opatentowania. Są to zgłoszenia o roboczych tytułach: „Sposób i układ do przeprowadzania badań diagnostycznych łożysk tocznych silników indukcyjnych z wykorzystaniem impedora” oraz „Sposób przeprowadzania badań diagnostycznych łożysk tocznych silników indukcyjnych z wykorzystaniem układu różnicowego”, których współtwórcą jest autor rozprawy.

7. Analiza metrologiczna układu pomiarowego

W rozdziale tym przedstawiono analizę metrologiczną wykorzystanych do badań układów pomiarowych:

- a) układu z przetwornikami napięcie-napięcie oraz prąd-napięcie (rozdział 6, rysunek 6.3),
- b) układu z dzielnikiem napięcia i bocznikiem (rozdział 6, rysunek 6.5).

7.1. Wstęp

Analiza metrologiczna układów do pomiaru mocy chwilowej miała na celu oszacowanie niepewności pomiarów dokonywanych tymi układami.

Do oceny niepewności układu pomiarowego, składającego się z przetworników: napięciowego i prądowo-napięciowego wykorzystano system pomiarowy składający się z kalibratora FLUKE 5500A oraz multimetru Keithley 2002.

Do oceny niepewności układu z bocznikiem i dzielnikiem napięcia wykorzystano opracowany specjalnie w tym celu system komputerowy. System ten został zrealizowany jako zespół urządzeń, współpracujących z opracowanym przez autora pracy oprogramowaniem, zainstalowanym na komputerze klasy PC. Do analizy niepewności wykorzystane zostały również dane producentów, dotyczące klasy dokładności bocznika oraz rezystorów użytych do budowy dzielnika napięcia.

Wyniki tych analiz pozwolą sprecyzować, jakiej niepewności pomiarowej można się spodziewać, dokonując badań diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych w określonych warunkach, na stanowisku badawczym metodą pomiaru i analizy mocy chwilowej.

W obu wykorzystywanych do pomiarów mocy chwilowej układach pomiarowych funkcję pomiaru przedstawia następujący wzór:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (7.1)$$

Ponieważ pomiar mocy chwilowej jest pomiarem pośrednim [26], niepewność $u(p)$ określona jest następującą zależnością:

$$u(p) = \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right) u^2(u) + \left(\frac{\partial p}{\partial i} \right) u^2(i) \quad (7.2)$$

gdzie: $u(p)$ – niepewność pomiaru mocy chwilowej,
 $u^2(u)$ – wariancja pomiaru napięcia,
 $u^2(i)$ – wariancja pomiaru prądu.

Ze wzoru (7.2) wynika, iż niepewność pomiaru mocy chwilowej określona jest następująco:

$$u(p) = \sqrt{i^2 \cdot u^2(u) + u^2 \cdot u^2(i)} \quad (7.3)$$

Poniżej przedstawiono sposób wyznaczania niepewności $u(p)$ dla obu wymienionych układów pomiarowych.

7.2. Niepewność pomiaru mocy chwilowej w układzie z przetwornikiem napięcia i przetwornikiem prąd - napięcie.

Zgodnie ze wzorem (7.3) w celu wyznaczenia niepewności pomiaru mocy chwilowej $u(p)$ należy wyznaczyć wariancję pomiaru napięcia $u^2(u)$ oraz wariancję pomiaru prądu $u^2(i)$. Sposób postępowania przy wyznaczaniu tych wariancji przedstawiony jest na rysunku 7.1.

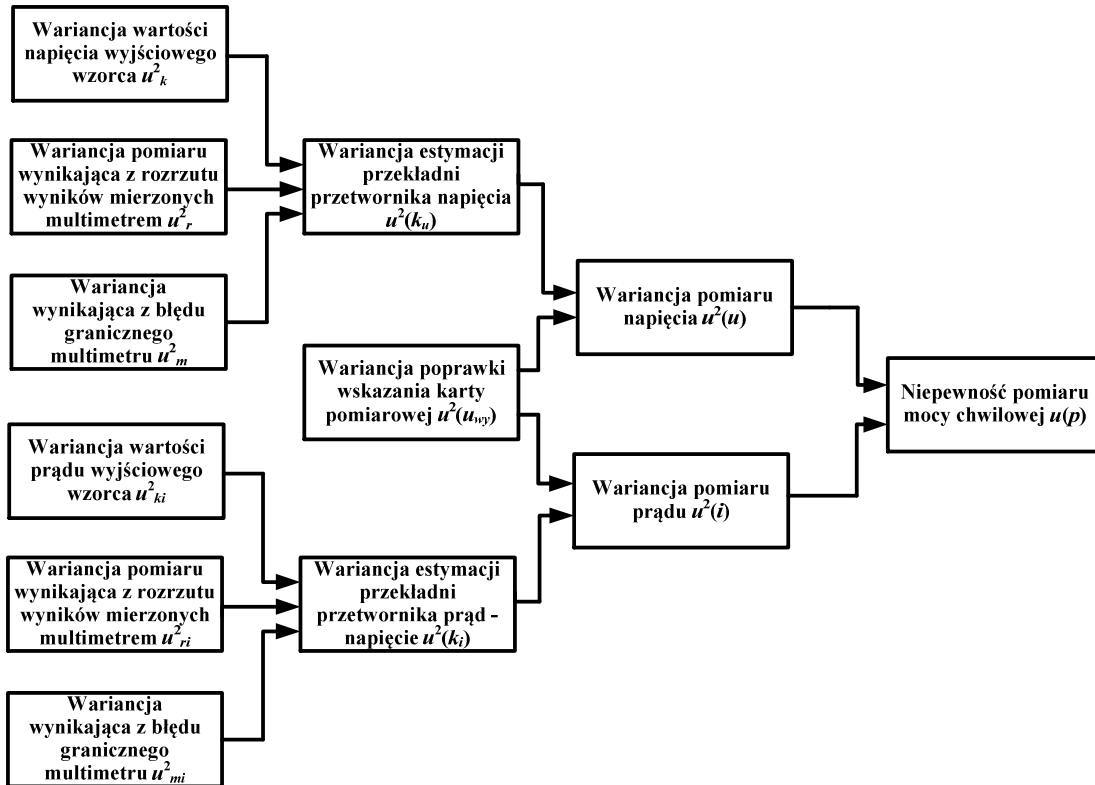
W celu wyznaczenia wariancji pomiaru napięcia $u^2(u)$ należy oszacować wariancję poprawki wskazania karty pomiarowej $u^2(u_{wy})$ oraz wariancję estymacji przekładni przetwornika napięciowego $u^2(k_u)$. Do określenia wariancji $u^2(k_u)$ konieczne jest oszacowanie:

- wariancji wartości napięcia wyjściowego wzorca u^2_k ,
- wariancji pomiaru napięcia, wynikającej z rozrzutu wyników mierzonych multimetrem u^2_r ,
- wariancji wynikającej z błędu granicznego multimetru u^2_m .

Do określenia wariancji pomiaru prądu $u^2(i)$ konieczne jest uwzględnienie wariancji poprawki wskazania karty pomiarowej $u^2(u_{wy})$ oraz wyznaczenie wariancji estymacji przekładni przetwornika prądowo - napięciowego $u^2(k_i)$. W celu oszacowania wariancji $u^2(k_i)$ należy określić:

- wariancję wartości prądu wyjściowego wzorca u^2_{ki} ,

- wariancję pomiaru napięcia, wynikającą z rozrzutu wyników mierzonych multimetrem u_{ri}^2 ,
- wariancję wynikającą z błędu granicznego multimetru u_{mi}^2 .



Rys.7.1. Sposób postępowania przy wyznaczaniu niepewności pomiaru mocy chwilowej $u(p)$ w układzie pomiarowym z przetwornikami napięcie-napięcie oraz prąd-napięcie.

W dalszej części tego podrozdziału przedstawiono metodologię oszacowania wartości wymienionych wyżej wariancji dla układu pomiarowego z przetwornikiem napięciowym i przetwornikiem prąd-napięcie.

7.2.1. Niepewność pomiaru napięcia

Napięcie na wyjściu przetwornika napięciowego określone jest zależnością:

$$u_{wy} = k_u \cdot u \tag{7.4}$$

gdzie: u_{wy} – napięcie na wyjściu przetwornika napięciowego,
 k_u – przekładnia przetwornika napięciowego,
 u – napięcie na wejściu przetwornika napięciowego.

W celu oszacowania niepewności pomiaru napięcia wykonano badania przetwornika dla szeregu częstotliwości i kilku wartości napięcia wejściowego. W układzie pomiarowym wartość napięcia określa funkcja pomiaru, będąca podstawą szacunku niepewności pomiaru napięcia:

$$u = \frac{u_{wy}}{k_u} \quad (7.5)$$

Wariancję pomiaru napięcia $u^2(u)$ określa następująca zależność:

$$u^2(u) = \left(\frac{\partial u}{\partial k_u} \right)^2 u^2(k_u) + \left(\frac{\partial u}{\partial u_{wy}} \right)^2 u^2(u_{wy}) \quad (7.6)$$

Po przekształceniach, wariancja pomiaru napięcia przetwornikiem napięcie-napięcie przyjmuje postać:

$$u^2(u) = \left(-\frac{u}{k_u} \right)^2 u^2(k_u) + \left(\frac{1}{k_u} \right)^2 u^2(u_{wy}) \quad (7.7)$$

gdzie: $u^2(k_u)$ – wariancja estymacji przekładni przetwornika napięciowego,
 $u^2(u_{wy})$ – wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych.

7.2.1.1. Wariancja estymacji przekładni przetwornika napięciowego - $u^2(k_u)$

Przekładnię przetwornika napięciowego k_u określa zależność:

$$k_u = \frac{u_{wy}}{u} \quad (7.8)$$

Współczynniki wrażliwości $c_{u_{wy}}$ oraz c_u wynoszą odpowiednio:

$$c_{u_{wy}} = \frac{\partial k_u}{\partial u_{wy}} = \frac{1}{u} \quad (7.9)$$

$$c_u = \frac{\partial k_u}{\partial u} = -\frac{u_{wy}}{u^2} = -\frac{k_u}{u} \quad (7.10)$$

Zatem wariancję estymacji przekładni przetwornika napięciowego można zapisać następująco:

$$u^2(k_u) = c_{u_{wy}}^2 u^2(\bar{u}_{wy}) + c_u^2 u^2(\bar{u}) = \left(\frac{1}{u}\right)^2 u^2(\bar{u}_{wy}) + \left(-\frac{k_u}{u}\right)^2 u^2(\bar{u}) \quad (7.11)$$

Wariancja wartości średniej napięcia na wyjściu przetwornika $u^2(\bar{u}_{wy})$ jest ściśle powiązana z niepewnością pomiarową multimetru Keithley i określona następującą zależnością:

$$u^2(\bar{u}_{wy}) = u_r^2 + u_m^2 \quad (7.12)$$

- gdzie: \bar{u}_{wy} – wartość średnia napięcia, zmierzona multimetrem Keithley 2002,
 u_r – niepewność pomiaru wynikająca z rozrzutu wyników mierzonych multimetrem Keithley 2002,
 u_m – niepewność wynikająca z błędu granicznego multimetru Keithley 2002, podanego przez producenta w specyfikacji.

W przeprowadzonych badaniach kalibrator Fluke 5500A generował sygnał wejściowy dla przetwornika. Wariancję wartości średniej napięcia podawanego na wejście przetwornika $u^2(\bar{u})$ przedstawia wzór:

$$u^2(\bar{u}) = u_k^2 \quad (7.13)$$

- gdzie: u_k – niepewność wartości napięcia wyjściowego kalibratora Fluke 5500A, podana przez producenta w specyfikacji.

Badanym przetwornikiem, o którym jest mowa wcześniej, był przetwornik LEM typu CV 3-500. Badania wykonane zostały dla 6 wartości częstotliwości: 50 Hz, 75 Hz, 90 Hz, 120 Hz, 500 Hz, 1000 Hz dla każdej z nich przy 6 wartościach napięcia: 20 V, 50 V, 100 V, 150 V, 200 V, 230 V. Pomiary powtarzane były 50-krotnie. Dla każdego wariantu obliczono składowe, zgodnie z wzorami (7.11), (7.12) i (7.13). W tabeli 7.1 przedstawiono maksymalne uzyskane wartości składowych wariancji.

Tabela 7.1. Maksymalne wartości składowych wariancji dla poszczególnych częstotliwości

Symbol wielkości	Rozkład prawdopodobieństwa	Maksymalne składowe wariancji dla częstotliwości					
		50 Hz	75 Hz	90 Hz	120 Hz	500 Hz	1000 Hz
u_r^2 [V ²]	normalny	1,21E-5	2,93E-10	4,57E-10	4,82E-10	1,57E-8	6,47E-8
u_m^2 [V ²]	jednostajny	9,67E-6	9,67E-6	9,67E-6	4,80E-6	4,80E-6	4,80E-6
u_k^2 [V ²]	jednostajny	3,70E-3	3,70E-3	3,70E-3	3,70E-3	3,70E-3	4,80E-6
$u^2(k_u)$ [V ² /V ²]	normalny	4,39E-10	2,11E-10	2,11E-10	1,19E-10	1,19E-10	1,20E-10

Na podstawie oszacowanych wariancji można zauważyć, iż najmniejszą wartością niepewności charakteryzuje się przekładnia przekładnika napięciowego dla częstotliwości 120 Hz i 500 Hz. Natomiast największą wartość niepewność osiąga dla częstotliwości sieci elektroenergetycznej – 50 Hz. Głównym składnikiem wartości niepewności dla częstotliwości 50 Hz jest niepewność pomiaru wynikająca z rozrzutu wyników mierzonych multimetrem.

7.2.1.2. Wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych - $u^2(u_{wy})$

Przy pomiarze napięcia kartą akwizycji danych estymację wariancji pomiaru napięcia $u^2(u_{wy})$ można określić na podstawie wariancji poprawki pomiaru napięcia Δu_Q . Poprawkę tą określa wzór:

$$\Delta u_Q = u_k - u_Q + \Delta u_k \quad (7.14)$$

- gdzie: Δu_Q – poprawka wskazania karty pomiarowej,
 u_k – napięcie podane ze wzorca (kalibrator Fluke 5500A) podane na wejście karty pomiarowej,
 u_Q – wskazanie karty pomiarowej,
 Δu_k – poprawka wskazania wzorca.

Estymacja wariancji poprawki pomiaru napięcia wynika z poniższej zależności:

$$u^2(\Delta u_Q) = u_{rQ}^2 + u_{kQ}^2 + u_k^2 \quad (7.15)$$

- gdzie: $u^2(\Delta u_Q)$ – wariancja wyznaczenia poprawki wskazania karty pomiarowej,
 u_{rQ}^2 – wariancja wynikająca z rozrzutu wyników pomiarów kartą akwizycji danych,
 u_{kQ}^2 – wariancja wynikająca z rozdzielczości wskazania karty pomiarowej,
 u_k^2 – wariancja poprawki wskazania wzorca.

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano kasetę pomiarową NI PXI 1031, w której umieszczono kartę pomiarową NI PXI 4462. Pomiary powtarzano 50 – krotnie każdorazowo dla 6 wartości napięcia nastawianych na wzorcu: 0,3 V, 0,5 V, 1 V, 2 V, 3 V, 5 V i przy 6 wartościach częstotliwości (takich samych jak dla przetwornika napięciowego) dla każdej z wartości napięcia.

Dla każdej z kombinacji napięcia i częstotliwości obliczono składowe wariancji, zgodnie ze wzorem (7.15). W tabeli 7.2 przedstawiono maksymalne uzyskane wartości składowych wariancji pomiaru napięcia kartą akwizycji danych dla poszczególnych częstotliwości.

Tabela 7.2. Maksymalne wartości składowych wariancji dla poszczególnych częstotliwości

Symbol wielkości	Rozkład prawdopodobieństwa	Maksymalne składowe wariancji dla częstotliwości					
		50 Hz	75 Hz	90 Hz	120 Hz	500 Hz	1000 Hz
$u_{kQ}^2 [V^2]$	jednostajny	3,55E-13	3,55E-13	3,55E-13	3,55E-13	3,55E-13	3,55E-13
$u_{rQ}^2 [V^2]$	normalny	3,42E-7	2,47E-9	2,83E-9	2,19E-9	2,13E-9	2,30E-9
$u_k^2 [V^2]$	jednostajny	1,69E-6	1,69E-6	1,69E-6	1,69E-6	1,69E-6	2,30E-9
$u^2(\Delta u_Q) [V^2]$	normalny	1,69E-6	1,69E-6	1,69E-6	1,69E-6	1,69E-6	1,69E-6

Do dalszych obliczeń przyjęto, iż wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych jest równa wariancji poprawki pomiaru napięcia $u^2(\Delta u_Q)$:

$$u^2(u_{wy}) = u^2(\Delta u_Q) \quad (7.16)$$

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż głównym składnikiem wartości niepewności pomiaru napięcia kartą akwizycji danych jest niepewność poprawki wzorca. Wartość u_k^2 jest kilka rzędów wielkości większa od pozostałych składowych, wchodzących w skład niepewności pomiaru napięcia kartą akwizycji danych.

7.2.1.3. Wariancja złożona estymaty napięcia $u^2(u)$

Na podstawie zależności (7.11) określającej wariancję estymacji przekładni przetwornika napięciowego $u^2(k_u)$ oraz wzoru (7.16), wykorzystanego do oszacowania wartości wariancji pomiaru napięcia kartą akwizycji danych $u^2(u_{wy})$ obliczono wariancję złożoną estymaty napięcia $u^2(u)$ zgodnie z zależnością (7.7). W tabeli 7.3 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń niepewności złożonej pomiaru napięcia dla częstotliwości sieciowej: 50 Hz.

Tabela 7.3. Budżet niepewności estymaty napięcia dla częstotliwości 50 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2_i(y)$
u_{wy}	4,60 V	1,69E-6 V ²	normalny	50 V/V	4,22E-3 V ²
k_u	0,02 V/V	4,39-10 V ² /V ²	normalny	11500 V ² /V	5,81E-2 V ²
u	230,00 V		normalny		6,23E-2 V ²
Niepewność standardowa $u(u)$					0,25 V

Przy założonym poziomie ufności równym 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 2$ niepewność rozszerzoną U_u pomiaru napięcia można wyznaczyć ze wzoru:

$$U_u = k \cdot u(u) \quad (7.17)$$

Niepewność rozszerzona pomiaru napięcia dla częstotliwości 50 Hz wynosi:
 $U_u = 0,50$ V.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wynik pomiaru napięcia dla częstotliwości 50 Hz przy założonym poziomie ufności oraz współczynniku rozszerzenia można zapisać jako: $U = (230,00 \pm 0,50)$ V.

Autor rozprawy oszacował również budżet niepewności estymaty napięcia dla częstotliwości 120 Hz. Budżet ten podano w tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Budżet niepewności estymaty napięcia dla częstotliwości 120 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2_i(y)$
u_{wy}	4,60 V	1,69E-6 V ²	normalny	50 V/V	4,22E-3 V ²
k_u	0,02 V/V	3,56E-10 V ² /V ²	normalny	11500 V ² /V	1,57E-2 V ²
u	230,00 V		normalny		2,00E-2 V ²
Niepewność standardowa $u(u)$					1,41 E-1 V

Korzystając ze wzoru (7.17) obliczono również niepewność rozszerzoną pomiaru napięcia przy częstotliwości 120 Hz. Niepewność ta wynosi:
 $U_u = 2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-1} = 2,82 \cdot 10^{-1} \approx 0,28 \text{ V}$.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wynik pomiaru napięcia dla częstotliwości 120 Hz przy założonym poziomie ufności oraz współczynnika rozszerzenia można zapisać jako: $U = (230,00 \pm 0,28) \text{ V}$.

Porównując wartości niepewności rozszerzonej dla częstotliwości 50 Hz i 120 Hz można stwierdzić, że dla częstotliwości 50 Hz niepewność ta jest większa niż dla pomiarów wykonywanych dla częstotliwości 120 Hz. Niepewności te nie przekraczają 1% wartości mierzonego napięcia.

7.2.2. Niepewność pomiaru prądu

Napięcie na wyjściu przetwornika prąd-napięcie określone jest zależnością:

$$u_{wy} = k_i \cdot i \quad (7.18)$$

- gdzie: u_{wy} – napięcie na wyjściu przetwornika prąd-napięcie,
 k_i – przekładnia przetwornika prąd-napięcie,
 i – prąd na wejściu przetwornika prąd-napięcie.

W celu oszacowania niepewności pomiaru prądu wykonano badania dla takich samych wartości częstotliwości jak w przypadku badań przetwornika napięciowego

(podrozdział 7.2.1.1) i kilku wartości prądu wejściowego. W układzie pomiarowym wartość prądu określa funkcja pomiaru, będąca podstawą szacunku niepewności pomiaru prądu:

$$i = \frac{u_{wy}}{k_i} \quad (7.19)$$

Wariancję pomiaru prądu określa następująca zależność:

$$u^2(i) = \left(-\frac{i}{k_i}\right)^2 u^2(k_i) + \left(\frac{1}{k_i}\right)^2 u^2(u_{wy}) \quad (7.20)$$

gdzie: $u^2(i)$ – wariancja pomiaru prądu,
 i – prąd mierzony na wejściu przetwornika prąd-napięcie,
 $u^2(u_{wy})$ – wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych,
 $u^2(k_i)$ – wariancja estymacji przekładni przetwornika prąd-napięcie.

Do powyższej zależności wartości wariancji pomiaru napięcia kartą akwizycji danych $u^2(u_{wy})$ podstawiono wartości oszacowanych niepewności pomiaru napięcia kartą akwizycji danych wyznaczone w podrozdziale 7.2.1.2 rozprawy.

7.2.2.1. Wariancja estymacji przekładni przetwornika prąd-napięcie - $u^2(k_i)$

Przekładnię przetwornika prądowego k_i określa zależność:

$$k_i = \frac{u_{wy}}{i} \quad (7.21)$$

Współczynniki wrażliwości c_{ii} oraz $c_{u_{wy}}$ określono następująco:

$$c_{u_{wy}} = \frac{\partial k_i}{\partial u_{wy}} = \frac{1}{i} \quad (7.22)$$

$$c_{ii} = \frac{\partial k_i}{\partial i} = -\frac{u_{wy}}{i^2} = -\frac{k_i}{i} \quad (7.23)$$

Wariancja estymacji przekładni przetwornika prąd-napięcie wynosi:

$$u^2(k_i) = c_{u_{wy}}^2 u^2(\bar{u}_{wy}) + c_{ii}^2 u^2(\bar{i}) = \left(\frac{1}{i}\right)^2 u^2(\bar{u}_{wy}) + \left(-\frac{k_i}{i}\right)^2 u^2(\bar{i}) \quad (7.24)$$

Wariancja wartości średniej napięcia na wyjściu przetwornika prąd-napięcie $u^2(\bar{u}_{wy})$ jest ściśle związana z niepewnością pomiarową multimetru Keithley 2002 i wynosi:

$$u^2(\bar{u}_{wy}) = u_{ri}^2 + u_{mi}^2 \quad (7.25)$$

- gdzie: \bar{u}_{wy} – wartość średnia napięcia, zmierzona multimetrem Keithley 2002,
 u_{ri} – niepewność pomiaru wynikająca z rozrzutu wyników mierzonych multimetrem Keithley 2002,
 u_{mi} – niepewność wynikająca z błędu granicznego multimetru Keithley 2002, podanego przez producenta w specyfikacji.

W omawianych badaniach kalibrator Fluke 5500A generował sygnał wejściowy dla przetwornika. Wariancję wartości średniej prądu podawanego na wejście przetwornika $u^2(\bar{i})$ przedstawia wzór:

$$u^2(\bar{i}) = u_{ki}^2 \quad (7.26)$$

- gdzie: \bar{i} – wartość średnia prądu podawanego na wejście przetwornika,
 u_{ki} – niepewność wartości prądu wyjściowego kalibratora Fluke 5500A, podana przez producenta w specyfikacji,

Badania przetwornika prąd-napięcie typu CT-5T wykonane zostały dla 6 wartości częstotliwości: 50 Hz, 75 Hz, 120 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, dla każdej z nich przy 6 wartościach natężenia prądu: 250 mA, 500 mA, 1 A, 1,9 A, 2,5 A, 2,9 A. Pomiar powtarzane były 50-krotnie. Dla każdego wariantu obliczono składowe, zgodnie z wzorami (7.24), (7.25) i (7.26). W tabeli 7.4 przedstawiono uzyskane maksymalne wartości tych składowych.

Tabela 7.4. Maksymalne wartości składowych wariancji dla poszczególnych częstotliwości

Symbol wielkości	Rozkład prawdopodobieństwa	Maksymalne składowe wariancje dla częstotliwości					
		50 Hz	75 Hz	90 Hz	120 Hz	500 Hz	1000 Hz
u_{ri}^2 [V ²]	normalny	5,41E-5	7,47E-5	1,06E-4	6,64E-5	3,83E-5	7,54E-5
u_{mi}^2 [V ²]	jednostajny	6,33E-6	6,33E-6	6,33E-6	3,74E-6	3,74E-6	3,74E-6
u_{ki}^2 [A ²]	jednostajny	3,48E-7	3,48E-7	3,48E-7	3,48E-7	3,48E-7	3,74E-6
$u^2(k_i)$ [V ² /A ²]	normalny	7,22E-6	9,68E-6	1,34E-5	8,38E-6	5,05E-6	9,46E-6

Z powyższych rozważań wynika, iż głównym składnikiem niepewności przekładni przetwornika prąd-napięcie jest niepewność pomiaru wynikająca z rozrzutu wyników mierzonych multimetrem Keithley 2002.

7.2.2.2. *Wariancja złożona estymaty prądu*

Wariancja złożona estymaty prądu została obliczona na podstawie zależności (7.20). Przykładowe wyniki obliczeń wariancji złożonej pomiaru prądu wykonano dla dwóch wartości częstotliwości: 50 Hz i 120 Hz. Budżet niepewności estymaty prądu dla częstotliwości 50 Hz podano w tabeli 7.5.

Tabela 7.5. Budżet niepewności estymaty prądu dla częstotliwości 50 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2_i(y)$
u_{wy}	2,90 V	1,69E-6 V ²	normalny	1 A/V	1,69E-6 A ²
k_i	1 V/A	7,22E-6 V ² /A ²	normalny	2,9 A ² /V	6,07E-5 A ²
i	2,90 A		normalny		6,24E-5 A ²
Niepewność standardowa $u(i)$					7,90E-3 A

Przy założonym poziomie ufności równym 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 2$ niepewność rozszerzoną U_i pomiaru prądu można wyznaczyć z zależności:

$$U_i = k \cdot u(i) \quad (7.27)$$

Korzystając ze wzoru (7.27) obliczono niepewność rozszerzoną pomiaru prądu przy częstotliwości 50 Hz. Niepewność ta wynosi: $U_i = 2 \cdot 7,90 \cdot 10^{-3} = 1,58 \cdot 10^{-2} \approx 0,02$ A.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wynik pomiaru prądu dla częstotliwości 50 Hz przy założonym poziomie ufności oraz współczynnika rozszerzenia można zapisać jako: $I = (2,90 \pm 0,02)$ A.

Następnie oszacowano budżet niepewności estymaty prądu dla częstotliwości 120 Hz. Wyniki składowych niepewności dla tej częstotliwości zaprezentowano w tabeli 7.6.

Tabela 7.6. Budżet niepewności estymaty prądu dla częstotliwości 120 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2_i(y)$
u_{wy}	2,90 V	1,69E-6 V ²	normalny	1 A/V	1,69E-6 A ²
k_i	1 V/A	8,38E-6 V ² /A ²	normalny	2,9 A ² /V	7,05E-5 A ²
i	2,90 A		normalny		7,22E-5 A ²
Niepewność standardowa $u(i)$					8,50E-3 A

W celu oszacowania niepewności rozszerzonej wykorzystano zależność (7.27). Niepewność ta dla częstotliwości 120 Hz wynosi: $U_i = 2 \cdot 8,50 \cdot 10^{-3} = 1,70 \cdot 10^{-2} \approx 0,02$ A

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wynik pomiaru prądu dla częstotliwości 120 Hz przy założonym poziomie ufności oraz współczynnika rozszerzenia można zapisać jako: $I = (2,90 \pm 0,02)$ A.

Porównując wartości niepewności rozszerzonej pomiaru prądu dla częstotliwości 50 Hz i 120 Hz można stwierdzić, iż niepewności te nie przekraczają 1% wartości mierzonego prądu.

7.2.3. Niepewność pomiaru mocy chwilowej – $u(p)$

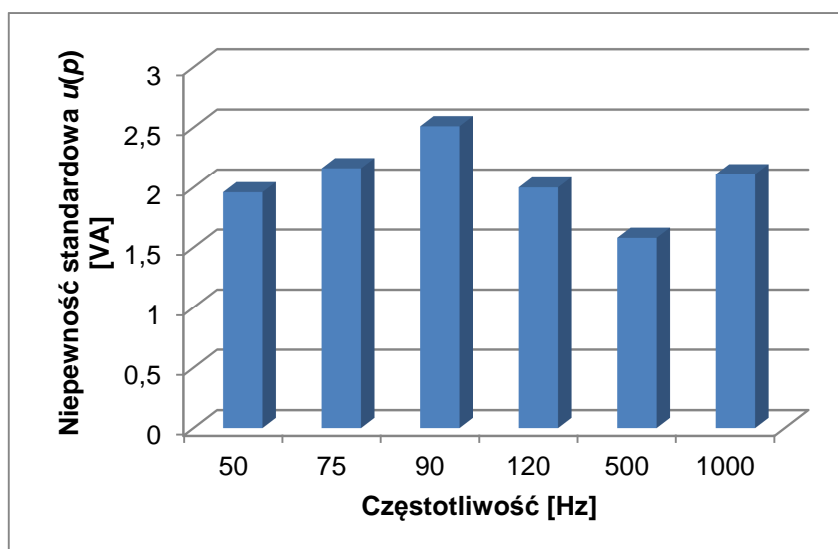
Niepewność pomiaru mocy chwilowej obliczona została na podstawie wzoru (7.3), czyli jako pierwiastek kwadratowy z sumy wariancji pomiaru napięcia $u^2(u)$ i wariancji pomiaru prądu $u^2(i)$.

Wartości niepewności pomiaru mocy chwilowej dla tych samych wartości częstotliwości, przy których badane były przetworniki napięcie-napięcie i prąd-napięcie przedstawione zostały w tabeli 7.7.

Tabela 7.7. Maksymalne wartości niepewności pomiaru mocy chwilowej

Symbol wielkości	Maksymalne wartości niepewności dla częstotliwości					
	50 Hz	75 Hz	90 Hz	120 Hz	500 Hz	1000 Hz
$u(p)$ [VA]	1,96	2,16	2,51	2,00	1,58	2,11

Na rysunku 7.2 przedstawiono wykres zależności niepewności pomiaru mocy chwilowej od częstotliwości dla układu z przetwornikami: napięcie-napięcie i prąd-napięcie.



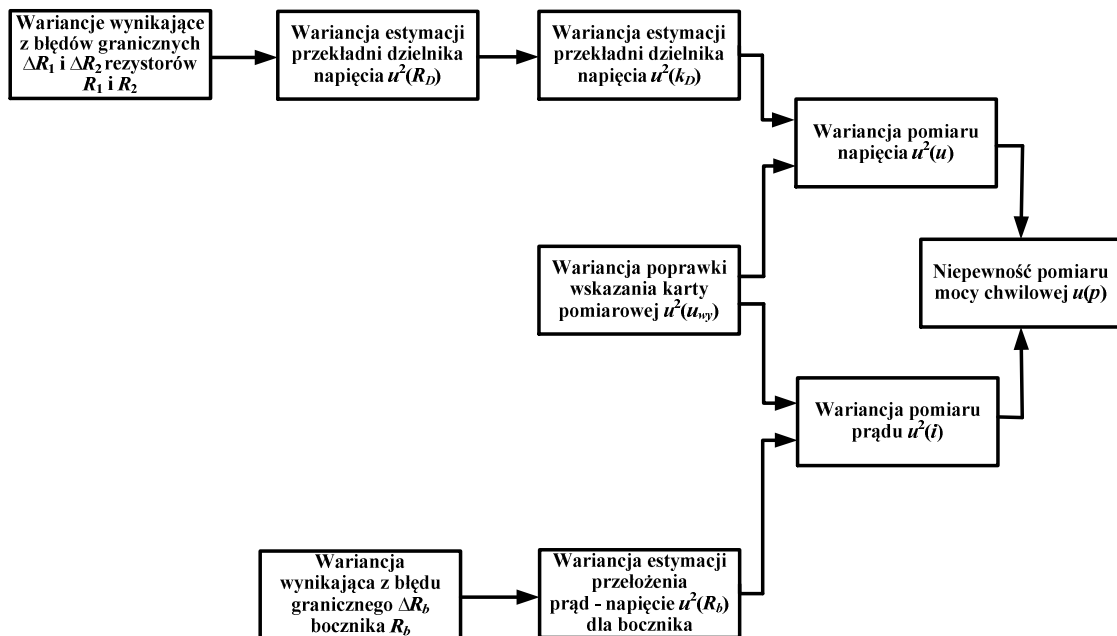
Rys.7.2. Wykres zależności niepewności pomiaru mocy chwilowej $u(p)$ od częstotliwości w układzie pomiarowym z przetwornikami napięcie-napięcie

Z powyższych wyników można wnioskować, iż największą niepewnością pomiaru mocy chwilowej charakteryzują się pomiary wykonane przy częstotliwości 90 Hz, natomiast najmniejszą – pomiar przy częstotliwości 500 Hz.

Dokonano także oszacowania niepewności rozszerzonej U_p pomiaru mocy chwilowej. Niepewność tą wyznaczono przy założonym poziomie ufności równym 95% i współczynniku rozszerzenia $k = 2$. Przykładowo dla częstotliwości 50 Hz niepewność $U_p = 3,92$ VA a dla częstotliwości 120 Hz - $U_p = 4,00$ VA.

7.3. Niepewność pomiaru mocy chwilowej w układzie z bocznikiem i dzielnikiem napięcia.

Niepewność pomiaru mocy chwilowej w układzie z bocznikiem i dzielnikiem napięcia określa zależność (7.3) podana w podrozdziale 7.1 niniejszej pracy. Podobnie jak w przypadku układu z przetwornikiem napięcie-napięcie oraz prąd-napięcie w celu wyznaczenia niepewności pomiaru mocy chwilowej należy wyznaczyć wariancję pomiaru napięcia $u^2(u)$ oraz wariancję pomiaru prądu $u^2(i)$. W układzie z bocznikiem i dzielnikiem napięcia dokonano oszacowania niepewności typu B pomiaru napięcia i prądu. Sposób postępowania przy wyznaczaniu tych wariancji przedstawiony jest na rysunku 7.3.



Rys.7.3. Sposób postępowania przy wyznaczaniu niepewności pomiaru mocy chwilowej $u(p)$ w układzie pomiarowym z bocznikiem i dzielnikiem napięcia.

Do oszacowania wariancji pomiaru napięcia $u^2(u)$ należy wyznaczyć wariancję poprawki wskazania karty pomiarowej $u^2(u_{wy})$ oraz wariancję estymacji przekładni dzielnika napięcia $u^2(k_D)$. Wariancja $u^2(k_D)$ została oszacowana jako wariancja typu B, która związana jest z błędami granicznymi rezystorów R_1 i R_2 , wykorzystanych do budowy dzielnika napięcia.

Do oszacowania wariancji pomiaru prądu $u^2(i)$ konieczne jest uwzględnienie wariancji poprawki wskazania karty pomiarowej $u^2(u_{wy})$ oraz wyznaczenie wariancji

estymacji przełożenia prąd-napięcie dla bocznika $u^2(R_b)$. W celu oszacowania wariancji $u^2(R_b)$ należy określić wariancję typu B, która wynika z błędu granicznego bocznika R_b .

W dalszej części tego podrozdziału przedstawiono metodologię oszacowania wartości wymienionych wyżej wariancji dla układu pomiarowego z dzielnikiem napięcia i bocznikiem.

7.3.1. Niepewność pomiaru napięcia

Napięcie na wyjściu dzielnika napięciowego określone jest następującą zależnością:

$$u_{wy} = k_D \cdot u \quad (7.28)$$

$$k_D = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (7.29)$$

- gdzie: u_{wy} – napięcie wyjściowe dzielnika napięciowego,
 k_D – przekładnia dzielnika napięciowego,
 R_1 – rezystancja pierwszego rezystora dzielnika napięciowego równa 20 k Ω ,
 R_2 – rezystancja drugiego rezystora dzielnika napięciowego równa 10 M Ω ,
 u – napięcie wejściowe dzielnika napięciowego.

W układzie pomiarowym wartość napięcia określa funkcja pomiaru, będąca podstawą szacunku niepewności pomiaru napięcia:

$$u = \frac{u_{wy}}{k_D} \quad (7.30)$$

Wariancję pomiaru napięcia określa następująca zależność:

$$u^2(u) = \left(\frac{1}{k_D}\right)^2 u^2(u_{wy}) + \left(-\frac{u}{k_D}\right)^2 u^2(k_D) \quad (7.31)$$

- gdzie: $u^2(u)$ – wariancja pomiaru napięcia,
 $u^2(u_{wy})$ – wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych,
 $u^2(k_D)$ – wariancja estymacji przekładni dzielnika napięciowego.

Wariancja pomiaru napięcia $u^2(u_{wy})$ została oszacowana w podrozdziale 7.2.1.2 rozprawy. Natomiast określenie wariancji estymacji przekładni dzielnika napięciowego przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

7.3.1.1. Wariancja estymacji przekładni dzielnika napięciowego - $u^2(k_D)$

Wariancję estymacji przekładni dzielnika napięciowego $u^2(k_D)$ wyznaczono z zależności (7.29) jako wariancję typu B, zakładając jednostajny rozkład prawdopodobieństwa

$$\begin{aligned} u^2(k_D) &= \left(\frac{\partial k_D}{\partial R_1} \right)^2 u^2(R_1) + \left(\frac{\partial k_D}{\partial R_2} \right)^2 u^2(R_2) = \\ &= \left(\frac{\frac{1}{R_2}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)^2} \right)^2 u^2(R_1) + \left(\frac{-\frac{R_1}{R_2^2}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)^2} \right)^2 u^2(R_2) = \\ &= \left(\frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{(R_1 + R_2)^2} \right) \right)^2 u^2(R_1) + \left(-\frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} \right)^2 u^2(R_2) = \\ &= \left(\frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \right)^2 u^2(R_1) + \left(-\frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} \right)^2 u^2(R_2) \end{aligned} \tag{7.32}$$

Przy założonym jednostajnym rozkładzie prawdopodobieństwa błędów granicznych ΔR_1 i ΔR_2 rezystorów R_1 i R_2 można napisać, iż wariancje $u^2(R_1)$ i $u^2(R_2)$ są równe:

$$u^2(R_1) = \left(\frac{\Delta R_1}{\sqrt{3}} \right)^2 \tag{7.33}$$

$$u^2(R_2) = \left(\frac{\Delta R_2}{\sqrt{3}} \right)^2 \tag{7.34}$$

Do oszacowania wariancji typu B dzielnika napięcia wartości błędów granicznych ΔR_1 i ΔR_2 zostały zaczerpnięte ze specyfikacji użytych rezystorów.

W tabeli 7.8 zestawiono wyniki obliczeń składowych wariancji typu B dla dzielnika napięcia.

Tabela 7.8. Wartości składowych wariancji dla dzielnika napięcia

Symbol wielkości	Rozkład prawdopodobieństwa	Wartości składowych wariancji typu B
$u^2(R_1) [\Omega^2]$	jednostajny	33,30
$u^2(R_2) [\Omega^2]$	jednostajny	1,33E6
$u^2(k_D) [V^2/V^2]$	jednostajny	3,83E-13

Na podstawie uzyskanych wyników, można zauważyć, iż niepewność przekładni dzielnika napięciowego $u(k_D)$ wynosi 0,03% wartości przekładni tego dzielnika.

7.3.1.2. Wariancja złożona estymaty napięcia

Wariancja złożona estymaty napięcia została obliczona na podstawie zależności (7.31). Do wyznaczenia wariancji złożonej wykorzystano obliczenia wariancji pomiaru napięcia kartą akwizycji danych $u^2(u_{wy})$ przedstawione w podrozdziale 7.2.1.2 niniejszej rozprawy. Przykładowe wyniki obliczeń niepewności złożonej pomiaru napięcia dla dwóch częstotliwości: 50 Hz i 120 Hz podano w tabelach odpowiednio: 7.9 oraz 7.10.

Tabela 7.9. Budżet niepewności estymaty napięcia dla częstotliwości 50 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2_i(y)$
u_{wy}	0,46 V	1,69E-6 V ²	normalny	501 V/V	4,24E-1 V ²
k_D	0,002 V/V	3,83E-13 V ² /V ²	normalny	115230 V ² /V	5,09E-3 V ²
u	230,00 V		normalny		4,29E-1 V ²
Niepewność standardowa $u(u)$					6,55E-1 V

Korzystając z zależności (7.17) oszacowano również niepewność rozszerzoną U_u pomiaru napięcia w układzie z dzielnikiem napięcia i bocznikiem. Niepewność rozszerzona dla obu częstotliwości: 50 Hz i 120 Hz wynosi $U_u = 1,31$ V.

Tabela 7.10. Budżet niepewności estymaty napięcia dla częstotliwości 120 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2(y)$
u_{wy}	0,46 V	1,69E-6 V ²	normalny	501 V/V	4,24E-1 V ²
k_D	0,002 V/V	3,83E-13 V ² /V ²	normalny	115230 V ² /V	5,09E-3 V ²
u	230,00 V		normalny		4,29E-1 V ²
Niepewność standardowa $u(u)$					6,55E-1 V

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wynik pomiaru napięcia zarówno dla częstotliwości 50 Hz i 120 Hz przy założonym poziomie ufności oraz współczynnika rozszerzenia można zapisać jako: $U = (230,00 \pm 1,31)$ V. Wartość niepewności rozszerzonej pomiaru napięcia w tym układzie nie przekracza 1% wartości mierzonej.

7.3.2. Niepewność pomiaru prądu

Napięcie na zaciskach napięciowych bocznika określone jest zależnością:

$$u_{wy} = R_b \cdot i \quad (7.34)$$

gdzie: u_{wy} – napięcie na zaciskach napięciowych bocznika,
 R_b – rezystancja bocznika równa 0,1 Ω ,
 i – prąd na zaciskach prądowych bocznika.

W celu oszacowania niepewności pomiaru prądu $u(i)$ wykonano badania dla tych samych wartości częstotliwości, które przyjęto do rozważań dotyczących układu pomiarowego z przetwornikiem prąd-napięcie (podrozdział 7.2.2.1) i takich samych wartości prądu wejściowego jak dla przetwornika typu CT-5T.

Funkcja pomiaru, będąca podstawą szacunku niepewności pomiaru prądu jest następująca:

$$i = \frac{u_{wy}}{R_b} \quad (7.35)$$

Wariancję pomiaru prądu określa następująca zależność, która została wyznaczona analogicznie jak dla przetwornika prąd-napięcie i opisana w podrozdziale 7.2.2.1:

$$u^2(i) = \left(\frac{1}{R_b}\right)^2 u^2(u_{wy}) + \left(-\frac{i}{R_b}\right)^2 u^2(R_b) \quad (7.36)$$

gdzie: $u^2(i)$ – wariancja pomiaru prądu,
 i – prąd mierzony na zaciskach prądowych bocznika,
 $u^2(u_{wy})$ – wariancja pomiaru napięcia kartą akwizycji danych,
 $u^2(R_b)$ – wariancja estymacji przełożenia prądu na napięcie dla bocznika.

Składowa $u^2(u_{wy})$ w powyższej zależności została wyznaczona w podrozdziale 7.2.1.2 niniejszej pracy. Natomiast składowa $u^2(R_b)$ została oszacowana w kolejnym podrozdziale.

7.3.5. Wariancja estymacji przełożenia prądu na napięcie dla bocznika - $u^2(R_b)$

Wariancję estymacji przełożenia prądu na napięcie $u^2(R_b)$ wyznaczono jako wariancję typu B, na podstawie danych podanych przez producenta w specyfikacji bocznika, przyjmując jednostajny rozkład prawdopodobieństwa.

$$u^2(R_b) = \left(\frac{\Delta R_b}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (7.37)$$

gdzie: $u^2(R_b)$ – wariancja estymacji zamiany prądu na napięcie dla bocznika,
 ΔR_b – błąd graniczny bocznika, wynikający z jego specyfikacji.

Wartość tej składowej wariancji wynosi:

$$u^2(R_b) = \left(\frac{0,02 \cdot 0,1}{100} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 = 1,33 \cdot 10^{-10} [\Omega^2]$$

Podobnie jak w przypadku obliczeń wariancji przekładni dzielnika napięcia, wariancja przełożenia prądu na napięcia dla bocznika jest również kilka rzędów wielkości mniejsza od wartości przełożenia prądu na napięcie.

7.3.2.2. Wariancja złożona estymaty prądu

Do wyznaczenia niepewności złożonej wykorzystano obliczenia wariancji pomiaru napięcia kartą akwizycji danych $u^2(u_{wy})$ przedstawione w podrozdziale 7.2.1.2 niniejszej rozprawy. Przykładowe wyniki obliczeń wariancji złożonej pomiaru prądu dla dwóch częstotliwości: 50 Hz i 120 Hz podano w tabelach odpowiednio: 7.11 oraz 7.12.

Tabela 7.11. Budżet niepewności estymaty prądu dla częstotliwości 50 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2_i(y)$
u_{wy}	0,29 V	1,69E-6 V ²	normalny	10 A/V	1,69E-4 A ²
R_b	0,1 V/A	1,33E-10 V ² /A ²	normalny	29 A ² /V	1,12E-7 A ²
i	2,90 A		normalny		1,69E-4 A ²
Niepewność standardowa $u(i)$					1,30E-2 A

Tabela 7.12. Budżet niepewności estymaty prądu dla częstotliwości 120 Hz

Wielkość X_i	Estymata wielkości x_i	Wariancja standardowa $u^2(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w wariancji złożonej $u^2_i(y)$
u_{wy}	0,29 V	1,69E-6 V ²	normalny	10 A/V	1,69E-4 A ²
R_b	0,1 V/A	1,33E-10 V ² /A ²	normalny	29 A ² /V	1,12E-7 A ²
i	2,90 A		normalny		1,69E-4 A ²
Niepewność standardowa $u(i)$					1,30E-2 A

Niepewność rozszerzoną U_i estymaty prądu obliczono korzystając z zależności (7.27). Dla częstotliwości 50 Hz i 120 Hz niepewność ta wynosi $U_i = 2,60 \cdot 10^{-2} \approx 0,03$ A.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wynik pomiaru prądu dla częstotliwości 50 Hz i 120 Hz przy założonym poziomie ufności oraz współczynnika rozszerzenia można zapisać jako: $I = (2,90 \pm 0,03)$ A.

Porównując wartości niepewności rozszerzonej pomiaru prądu dla częstotliwości 50 Hz i 120 Hz można stwierdzić, iż wartość niepewności pomiaru prądu osiąga 1% wartości mierzonego prądu.

7.3.3. Niepewność pomiaru mocy chwilowej

Niepewność $u(p)$ pomiaru mocy chwilowej obliczona została na podstawie zależności (7.3).

Wartości niepewności mocy chwilowej dla układu z dzielnikiem napięcia i bocznikiem wynosi $u(p) = 3,54$ VA i jest taka sama dla wszystkich, analizowanych w niniejszym rozdziale częstotliwości.

Dokonano także oszacowania niepewności rozszerzonej U_p pomiaru mocy chwilowej. Niepewność tą wyznaczono przy założonym poziomie ufności równym 95% i współczynnika rozszerzenia $k = 2$. Niepewność ta w omawianym układzie wynosi: $U_p = 7,08$ VA.

7.4. Podsumowanie.

W rozdziale 7 umieszczono wyniki analizy metrologicznej wykorzystanych do badań układów pomiarowych. Przedstawiona analiza metrologiczna dotyczyła wyznaczenia niepewności pomiaru mocy chwilowej dla dwóch układów:

1. z przetwornikami napięcie-napięcie i prąd-napięcie,
2. z bocznikiem i dzielnikiem napięcia.

W tabeli 7.13 przedstawiono oszacowane na poziomie ufności 0,95 i dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$ niepewności rozszerzone U_p pomiaru mocy chwilowej dla wymienionych wyżej układów pomiarowych.

Tabela 7.13. Maksymalne wartości niepewności rozszerzonej pomiaru mocy chwilowej

Symbol wielkości	Układ pomiarowy	Maksymalne wartości niepewności U_p dla częstotliwości					
		50 Hz	75 Hz	90 Hz	120 Hz	500 Hz	1000 Hz
U_p [VA]	1	3,92	4,32	5,02	4,00	3,16	4,22
	2	7,08	7,08	7,08	7,08	7,08	7,08

Układ pomiarowy z przetwornikami napięcie-napięcie oraz prąd-napięcie charakteryzuje się zbliżoną wartością niepewności rozszerzonej pomiaru mocy chwilowej co układ z dzielnikiem napięcia i bocznikiem. Oznacza to, iż z punktu widzenia niepewności dokonywanych pomiarów oba układy mają podobne właściwości

metrologiczne. Największa wartość niepewności pomiaru mocy chwilowej w układzie z przetwornikami przy znamionowych wartościach prądu i napięcia zasilającego występuje dla częstotliwości 90 Hz.

Mimo zbliżonych wartości niepewności pomiaru mocy chwilowej w obu omawianych układach to właśnie układ z dzielnikiem napięcia i bocznikiem został wybrany do realizacji na stanowisku badawczym. Czynnikiem decydującym o wyborze tego układu był niższy poziom szumów własnych układu niż w układzie przetwornikami.

Niepewność pomiaru mocy chwilowej w tym układzie nieznacznie przekracza 1% wartości mierzonej mocy chwilowej. Przykładowo dla częstotliwości 50 Hz oraz wartości napięcia 230 V i wartości prądu 2,9 A pełen zapis wyniku pomiaru mocy chwilowej, wyznaczonej na podstawie zależności (7.1) można przedstawić jako:
 $p = (1013,78 \pm 7,08) \text{VA}$.

Zdaniem autora pracy oszacowana niepewność pomiarowa w układzie z dzielnikiem napięcia i bocznikiem nie stanowi przeszkody w wykorzystaniu tego układu do celów pomiaru mocy chwilowej.

8. Podsumowanie, wnioski końcowe oraz najważniejsze osiągnięcia

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy problematyki związanej z diagnostyką łożysk silników indukcyjnych. Tematyka ta jest ciągle ważna, aktualna i dynamicznie rozwija się ze względu na fakt, iż łożyska są najczęstszą przyczyną awarii silników indukcyjnych.

8.1. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki studiów literaturowych przeprowadzonych przez autora rozprawy oraz podstawowe zagadnienia związane z budową łożysk oraz kryteriami ich jakości (rozdział 3).

Dokonano również krytycznej analizy metod najczęściej wykorzystywanych do monitorowania stanu technicznego łożysk, a mianowicie metod wibracyjnych i prądowych.

Ze względu na wady opisanych na podstawie literatury metod, autor pracy zaproponował nową, bezczujnikową metodę diagnostyki łożysk opartą na pomiarze i analizie widma iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia. Niewątpliwą zaletą nowej metody w porównaniu z obecnie stosowanymi metodami prądowej diagnostyki łożysk silników indukcyjnych, jest jawne występowanie składowej o częstotliwości uszkodzenia w widmie mocy chwilowej. Dzięki czemu częstotliwość uszkodzenia jest łatwiejsza do obliczenia, aniżeli identyfikacja składowych, zmodulowanych sygnałem o częstotliwości charakterystycznej, jak ma to miejsce w metodach opartych na analizie widma prądu zasilającego silnik.

Autor rozprawy przeprowadził obliczenia i analizy matematyczne nowej metody, których celem było teoretyczne określenie wpływu uszkodzeń łożysk na pojawienie się dodatkowych składowych harmonicznym w widmie mocy chwilowej, związanych z częstotliwościami charakterystycznymi dla uszkodzeń łożysk (rozdział 4). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń matematycznych możliwe było wyznaczenie składowych, występujących w widmie mocy chwilowej pobieranej przez silnik indukcyjny. Wyniki obliczeń pozwoliły autorowi pracy stwierdzić, iż w widmie iloczynu napięcia zasilania i prądu stojana pojawiają się składowe harmoniczne

o częstotliwościach związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska.

W rozprawie przedstawiono także wyniki przeprowadzonych przez autora pracy badań uproszczonego modelu matematycznego jednej fazy silnika indukcyjnego opracowanego w programie PSpice (rozdział 5). Opisano także obwodowy model matematyczny silnika indukcyjnego, wykorzystany do dalszych badań symulacyjnych, związanych z wykorzystaniem nowej metody analizy mocy chwilowej do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych.

Autor przeprowadził również badania opisanego w pracy obwodowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego. Badania przeprowadzono zarówno dla silników nieuszkodzonych oraz dla silników, w których symulowano uszkodzenia łożysk. Wykonano szereg symulacji dla różnych typów uszkodzeń łożysk i różnych wartości momentu obciążenia silników. Przeprowadzone badania obwodowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego potwierdziły fakt, iż w widmie iloczynu napięcia zasilania i prądu stojana pojawiają się składowe harmoniczne o częstotliwościach związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Analiza otrzymanych wyników badań obwodowego modelu matematycznego potwierdziła, iż zjawisko to występuje dla wszystkich rodzajów uszkodzeń łożysk, niezależnie od wartości momentu obciążenia silnika. Ponadto, na podstawie badań symulacyjnych stwierdzono, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości wprowadzonego zaburzenia.

Autor rozprawy dokonał wyboru metody odniesienia, z wynikami której porównywał później wyniki badań eksperymentalnych uzyskanych nową metodą. Jako metody odniesienia przeanalizowano: wibrometr laserowy, kamerę termowizyjną oraz system diagnostyki wibracyjnej DREAM. Ostatecznie jako sposób odniesienia wybrano system diagnostyki wibracyjnej DREAM, ze względu na fakt, iż podawał on najszerszy zakres informacji a wyniki dla różnych uszkodzeń i warunków pomiaru zgadzały się z rzeczywistym stanem badanego łożyska.

W ramach realizacji tej tematyki rozprawy autor rozprawy zaprojektował i zbudował komputerowe stanowisko przeznaczone do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych (rozdział 6), jak również opracował metodykę przeprowadzania badań diagnostycznych uszkodzeń łożysk silników indukcyjnych.

W niniejszej rozprawie przedstawiono przykładowe wyniki przeprowadzonych przez autora rozprawy badań eksperymentalnych silników indukcyjnych. Badania eksperymentalne polegały na pomiarach prądu stojana i napięcia zasilającego i analizie wyników uzyskanych dla silników indukcyjnych typu STg80X-4C z symulowanymi oraz z rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk. Uszkodzenia łożysk symulowane były przez wprowadzenie dodatkowych wibracji zewnętrznych z określonymi częstotliwościami, za pomocą przymocowanego do badanych maszyn silnika prądu stałego z regulowaną częstotliwością wirowania wirnika. Uszkodzenia rzeczywiste były wprowadzane albo do pierścienia zewnętrznego, albo do pierścienia wewnętrznego łożyska. Wykonano szereg uszkodzeń łożysk o różnych głębokościach. Następnie uszkodzone łożyska montowane były do silników indukcyjnych, na których przeprowadzono badania.

Ostatecznie uzyskane wyniki badań eksperymentalnych na obiektach rzeczywistych okazały się zbieżne z wynikami z badań symulacyjnych i potwierdziły, że powstanie uszkodzeń łożysk w silniku skutkuje pojawieniem się w widmie mocy chwilowej składowych harmonicznym, związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Podobnie jak w przypadku badań modelu matematycznego silnika indukcyjnego analiza otrzymanych wyników wstępnych badań eksperymentalnych silników indukcyjnych z symulowanymi za pomocą zewnętrznych wibracji uszkodzeniami łożysk oraz silników z rzeczywistymi uszkodzeniami łożysk potwierdziła, iż zjawisko to występuje niezależnie od częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk oraz od wartości momentu obciążenia silnika.

Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych silnika indukcyjnego potwierdziły również fakt, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości wprowadzonego zaburzenia.

Można zatem uznać, że postawione tezy pracy zostały udowodnione.

W pracy umieszczono także wyniki, przeprowadzonej przez autora niniejszej rozprawy, analizy metrologicznej wykorzystanego do badań układu pomiarowego (rozdział 7). Analiza metrologiczna układu do pomiaru mocy chwilowej miała na celu ocenę niepewności pomiarów dokonywanych za pomocą zbudowanego układu do pomiaru prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny.

Wyniki tych analiz pozwoliły sprecyzować, jakiej niepewności pomiarowej można się spodziewać, dokonując badań diagnostycznych łożysk silników indukcyjnych w określonych warunkach, na stanowisku badawczym metodą pomiaru i analizy mocy chwilowej.

8.2. Wnioski końcowe

- Analiza teoretyczna nowej metody diagnostyki łożysk silników indukcyjnych oraz badania modelu matematycznego silnika indukcyjnego potwierdziły, że w widmie mocy chwilowej pojawiają się składowe harmoniczne o częstotliwościach związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Analiza otrzymanych wyników badań modelu matematycznego potwierdziła, iż zjawisko to występuje dla wszystkich rodzajów uszkodzeń łożysk, niezależnie od wartości momentu obciążenia silnika.
- Wyniki badań silników indukcyjnych z symulowanymi uszkodzeniami łożysk oraz badania eksperymentalne silników indukcyjnych, w których zamontowano uszkodzone łożyska dowiodły, podobnie jak badania modelu matematycznego, że powstanie uszkodzeń łożysk w silniku skutkuje pojawieniem się w widmie mocy chwilowej składowych harmonicznych, związanych z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Wyniki przeprowadzonych badań diagnostycznych uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego potwierdziły również fakt, iż w widmie mocy chwilowej w sposób jawny występuje składowa o częstotliwości charakterystycznej dla danego typu uszkodzenia.
- Występująca w widmie mocy chwilowej w sposób jawny składowa o częstotliwości uszkodzenia jest łatwiejsza do identyfikacji, aniżeli rozpoznanie składowych, zmodulowanych sygnałem o częstotliwości charakterystycznej, jak ma to miejsce w metodach opartych na analizie widma prądu zasilającego silnik, co jest niewątpliwą zaletą nowej metody.
- Analiza metrologiczna zaprojektowanego układu pomiarowego dowiodła, że maksymalna wartość niepewności rozszerzonej w wykorzystanym układzie z dzielnikiem napięcia i bocznikiem wynosi 42,38 VA. Oznacza to, iż

niepewność rozszerzona pomiaru mocy chwilowej jest jeden rząd wielkości mniejsza od wartości wielkości mierzonej.

8.3. Najważniejsze osiągnięcia autora

Do najważniejszych osiągnięć pracy, zdaniem autora, należy zaliczyć:

- przeprowadzenie wnikliwego studium literaturowego, mającego na celu krytyczną ocenę skuteczności znanych metod diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych, które skłoniło autora do opracowania nowej metody,
- opracowanie podstaw teoretycznych nowej, nieniszczącej metody diagnostyki łożysk silników indukcyjnych opartej na pomiarach i analizie mocy chwilowej pobieranej przez silnik indukcyjny,
- wskazanie składowej o częstotliwości charakterystycznej dla uszkodzenia łożyska w widmie mocy chwilowej jako symptomu diagnostycznego,
- wykonanie badań symulacyjnych obwodowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego,
- zaprojektowanie i fizyczną realizację oryginalnego, komputerowego systemu do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych opartego na nowej metodzie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik wraz z opracowaniem specjalistycznego oprogramowania umożliwiającego diagnostykę łożysk,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych łożysk nieuszkodzonych i uszkodzonych silników indukcyjnych nową metodą na stanowisku badawczym, wyposażonym w opracowany komputerowy system diagnostyki łożysk,
- dokonanie zgłoszenia w sprawie uzyskania patentu na wynalazek pt. „Sposób i układ do przeprowadzania badań diagnostycznych łożysk tocznych silników indukcyjnych” (zgłoszenie nr P.391575).

8.4. Kierunki dalszych badań

Dalsze prace związane z tematyką rozprawy zdaniem autora powinny być prowadzone w kierunku:

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

- modyfikacji układu pomiarowego, w celu umożliwienia filtracji składowej podstawowej oraz jej harmonicznych po stronie analogowej systemu pomiarowego, co pozwoli na uzyskanie większej rozdzielczości sygnałów po stronie cyfrowej systemu pomiarowego. Taki układ pomiarowy pozwoli na łatwiejszą identyfikację składowych oczekiwanych dla uszkodzeń w początkowej fazie uszkodzenia,
- przeprowadzenia badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych zmodyfikowanego układu pomiarowego,
- opracowania i zaimplementowania do komputerowego systemu pomiarowego zaawansowanych algorytmów diagnostycznych, opartych o logikę rozmytą i sieci neuronowe.

Literatura

- [1] Antal, M., Kowalski, Cz. T.: *Wykrywanie uszkodzeń elementów łożysk tocznych silników indukcyjnych na podstawie analizy widmowej przyspieszenia drgań*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWr, Vol. 54, nr 23 (2003), s. 249-260, ISSN: 0084-294X.
- [2] Ballal P., Ramani A., Middleton M., McMurrough C., Athamneh A., Lee W., Kwan C., Lewis F.: *Mechanical fault diagnosis using wireless sensor networks and a two-stage neural network classifier*, 2009 IEEE Aerospace conference, 7-14 March 2009.
- [3] Barakat M., Druaux F., Lefebvre D., Khalil M., Mustapha O.: *Monitoring of rotary machine by mean of self adaptive growing neural network*, 19th Mediterranean Conference on Control and Automation, Aquis Corfu Holiday Palace, Corfu, Greece, June 20-23, 2011.
- [4] Barkow A., Barkowa N., Referowski L., Swędrowski L., Świsulski D., *Progress in machine condition monitoring basing on analysis of generalized vibration spectra*, International AMSE Conference “System, analysis, control & design”, Lyon, France, 1994.
- [5] Bellini A., Cocconcelli M., Immovilli F., Rubini R., *Diagnosis of mechanical faults by spectral kurtosis energy*, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. 10-13 Nov. 2008 p. 3079 – 3083.
- [6] Bellini A., Immovilli F., Rubini R., Tassoni C.: *Diagnosis of bearing faults of induction machines by vibration or current signals: A critical comparison*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 5-9 Oct. 2008 p. 1 – 8, 2008.
- [7] Białkowski J., Gul J., Karaczun A., Oleśkiewicz M.: *Łożyskowanie część I, łożyska toczne*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, 1986.
- [8] Blödt M., Granjon P., Raison B., Rostaing G.: *Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, no. 4, April 2008.
- [9] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, WNT, Warszawa 1982.
- [10] Cempel C., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn*, Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1994.
- [11] Cempel C.: *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa 1989.
- [12] Djeddi M, Granjon P., Leprettre B.: *Bearing fault diagnosis in induction machine based on current analysis using high-resolution technique*, Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007. SDEMPED 2007. IEEE International Symposium, p. 23 – 28, ISBN: 978-1-4244-1061-3, 2007.
- [13] Dzwonkowski A., Swędrowski L., *Diagnosis of bearing damage in induction motors by instantaneous power analysis*, The Sixth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM 2010.

- [14] Dzwonkowski A.: *Sposób i układ do przeprowadzania badań diagnostycznych łożysk tocznych silnika indukcyjnego*, zgłoszenie patentowe P.391575 z dnia 21-06-2010.
- [15] Dzwonkowski A.: *Wpływ uszkodzeń łożysk na mocą chwilową pobieraną przez silnik indukcyjny*, Metrologia dziś i jutro: praca zbiorowa pod redakcją Wiesława Kicińskiego i Leona Swędrowskiego, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2009, str. 359-370, ISBN 83-911669-5-3.
- [16] Dzwonkowski A.: *Badania wpływu uszkodzeń łożysk na iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny. - R. 84, nr 12 (2008), s. 297-300, ISSN 0033-2097.
- [17] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: *Laser measurements in the motor bearing diagnostics*, 16th IMEKO TC4 International Symposium Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements and 13th Workshop on ADC Modelling and Testing, IMEKO TC4 - TC21 Joint Session, Florence, Italy, September 22-24, 2008.
- [18] Dzwonkowski A., Swędrowski L., Rusek J.: *The instantaneous power as a diagnostic symptom of the bearing damage*, The Fifth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM 2008, MFPT 2008, Heriot-Watt University, Edinburgh, 15-18 July, 2008.
- [19] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: *Badania symulacyjne wpływu uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego na przebieg chwilowych wartości prądu i napięcia*, Pomiar Automatyka Kontrola. - Vol. 53, nr 4 (2007), s. 41-43.
- [20] Dzwonkowski A.: *Stanowisko laboratoryjne do diagnostyki łożysk silników indukcyjnych*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 25 „Zastosowanie Komputerów W Nauce I Technice” 2008”, Gdańsk, 2008.
- [21] El Hachemi Benbouzid M.: *A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, 2000.
- [22] Eren L., Devaney M.J.: *Motor current analysis via wavelet transform with spectral post-processing for bearing fault detection*, proc. of the 20th IEEE IMTC'03, vol.1.
- [23] Ewert P., Kowalski Cz. T.: *Neuronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 92/2011.
- [24] Frosini L., Bassi E.: *Stator current and motor efficiency as indicators for different types of bearing faults in induction motors*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 1, 2010.
- [25] Garcia-Perez, A.; de Jesus Romero-Troncoso, R.; Cabal-Yepez, E.; Osornio-Rios, R.A.; *The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors*, Industrial Electronics, IEEE Transactions vol. 58 Issue: 5, p.2002 – 2010, ISSN: 0278-0046, 2011.

- [26] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO 1995. Tłumaczenie polskie, Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii, GUM 1996.
- [27] Khalid F. Al-Raheem, Asok Roy, Ramachandran K. P., Harrison D. K., Grainger S.: *Application of the Laplace-Wavelet combined with ANN for rolling bearing fault diagnosis*, Journal of Vibration and Acoustics, October 2008, Volume 130, Issue 5, 2008.
- [28] Kliman G. B., Yazici B. *An adaptive statistical Time-Frequency method for detection of broken bars and bearing faults in motors using stator current*, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 35, no 2, 1999.
- [29] Kliman G. B., Stein J.: *Induction motor fault detection via passive current monitoring*, ICEM, MIT Cambridge USA, 1990.
- [30] Kowalski Cz. T.: *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [31] Kowalski, Cz.T.: *Diagnosis of the induction motor rolling bearings using neural networks*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, 2004.
- [32] Krzemiński-Freda H.: *Łożyska toczne*, PWN Warszawa 1989.
- [33] Lau Enzo C. C., Ngan H. W.: *Detection of motor bearing outer raceway defect by wavelet packet transformed motor current signature analysis*, IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement, vol. 59, no. 10, 2010.
- [34] Legowski S.F., Sadrul Ula H.M., Trzynadlowski A.M: *Instantaneous Power as a Medium for the Signature Analysis of Induction Motors*, IEEE, Transactions on Industry Applications, vol.32, no.4, 1996.
- [35] Martinez-Morales J. D, Palacios E., Campos-Delgado D. U.: *Data fusion for multiple mechanical fault diagnosis in induction motors at variable operating conditions*, 7th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2010) Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. September 8-10, 2010.
- [36] Materiały Zakładu Inżynierii Systemów, Instytut Automatyki, Politechniki Śląskiej: <http://e-zipk.ia.polsl.pl/bearings/index.php?action=teoria03>.
- [37] Mazanek E.: *Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn - łożyska, sprzęgła i hamulce, przekładnie mechaniczne*, WNT Warszawa 2005.
- [38] Meng L., Ping Z.: *The application of wavelet packet and SVM in rolling bearing fault diagnosis*, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2008. 5-8 Aug. 2008.
- [39] Neelam Mehala, Ratna Dahiya: *Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis*, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, vol2. Issue 1, 2009.

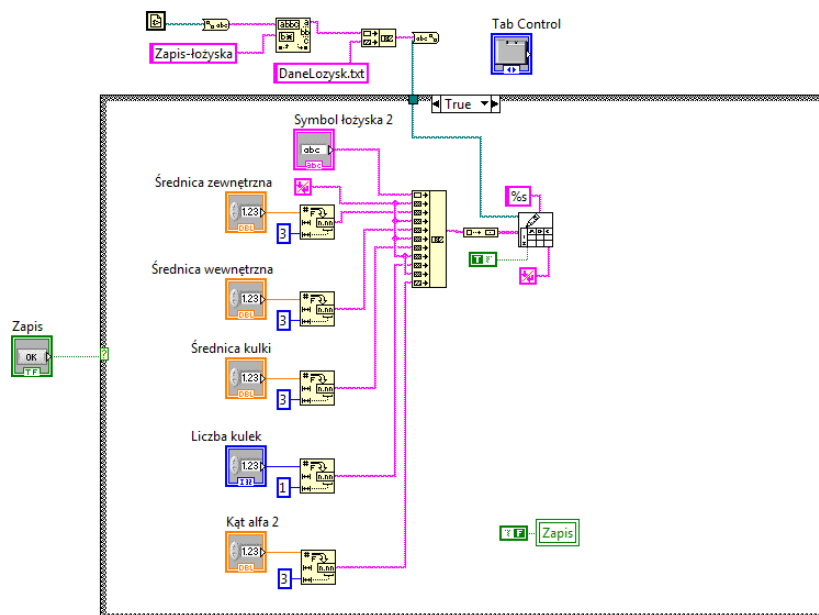
- [40] Izzet Y O, Burak Dalci K and Brahim Senol I: *Detection of bearing defects in three-phase induction motors using Park's transform and radial basis function neural networks*, Sadhana Vol. 31, Part 3, June 2006, p. 235–244.
- [41] Norma PN-90 N-01358, *Metody pomiarów i oceny drgań maszyn*.
- [42] Norma PN-ISO 10816-1, *Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących*.
- [43] Obaid RR, Habetler TG, Stack JR: *Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors*, IEEE International SDEMPED, Atlanta, USA, 2003.
- [44] Onel I.Y., El Hachemi Benbouzid M.: *Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and Concordia transform approaches comparative study*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Volume 13, Issue 2, April 2008, p. 257 – 262.
- [45] Osiński Z., Bajon W., Szucki T.: *Podstawy konstrukcji maszyn*, PWN Warszawa, 1986.
- [46] Pacholski K, Piwowarczyk J., Szczęsny A.: *Błędy elektronicznych przekładników prądowych*, MSM Rzeszów, październik 2006, str. 213-222.
- [47] Pacholski K, Piwowarczyk J., Szczęsny A.: *System pomiarowy do wyznaczania błędów elektronicznych przekładników prądowych*, MKM Warszawa, wrzesień 2006.
- [48] Poradnik CX Bearings: http://e-katalog.home.pl/CX_BEARINGS/poradnik.php?gr=5&pod=17&sub=1
- [49] PSV-400 Technical specifications, Polytec GmbH, 2007, (<http://www.polytepci.com/PDF/PSV-400Data Sheet1003.pdf>).
- [50] Qiu Mian-hao, Wang Zi-ying: *Fault diagnosis of bearing based on empirical mode decomposition and decision directed acyclic graph support vector machine*, CINC '09. International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Volume 2, 6-7 June 2009 Page(s):471 – 474.
- [51] Razik H., Correa M.B.R., da Silva E.R.C: *An application of Genetic Algorithm and Fuzzy Logic for the induction motor diagnosis*, Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE 2008.
- [52] Rodriguez I., Alves R.: *Bearing damage detection of the induction motors using current analysis*, IEEE Power Engineering Society, Transition and Distribution Conference and Exposition, Aug. 2006.
- [53] Rosero J., Romeral L., Rosero E., Urresty J.: *Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet decomposition for PMSM running under bearing damage*, APEC 2009, Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 15-19 Feb. 2009, p. 951 – 956.
- [54] Rusek J., Swędrowski L.: *Induction machine model for current diagnostics of bearings*, Tagungsband 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, 2003.

- [55] Rusek J.: *Categorization of Induction Machines Resulting from Their Harmonic-Balance Model*, Electromagnetics 23, pp. 277-292, 2003.
- [56] Rusek J.: *Interharmonics generated by induction machines*, Electric Power Quality and Utilization, Magazine, vol. II, no 2, 2006, p. 49-52.
- [57] Rusek J.: *Interharmoniczne generowane przez maszynę indukcyjną ze statyczną lub dynamiczną ekscentrycznością*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 83/2009, str. 129-134.
- [58] Rusek J.: *Computer implementation of the induction machine dynamical model accounting for broken bars, eccentricities, slotting and parallel branches*, in Proc. ICEM 2000 Conference, Espoo, Finland 2000, p.868 – 872.
- [59] Samanta B., Al-Balushi K. R., *Artificial neural-network-based fault diagnostics of rolling-element bearings using time-domain features*, Mech. Syst. Signal Process., vol. 17, no. 2, pp. 317–328, Mar. 2003.
- [60] Schoen R. R., Habetler T. G., Kamran F., Bartheld R. G.: *Motor bearing damage detection using stator current monitoring*, IEEE vol.31, Nov/Dec 1995.
- [61] Seryasat, O.R.; Aliyari Shoorehdeli, M.; Honarvar, F.; Rahmani, A.: *Multi-fault diagnosis of ball bearing using FFT, wavelet energy entropy mean and root mean square (RMS)*, Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on , vol., no., pp.4295-4299, 10-13 Oct. 2010.
- [62] Swędrowski L. 2003 *Diagnostics measurement of current supplying an electric motor*, XVII IMEKO World Congress – Metrology in the 3rd Millenium Dubrovnik, Croatia.
- [63] Swędrowski L., Dzwonkowski A.: *Application of vibration methods for calibration of diagnostic system based on motor current analysis*, Elektrotechnika i Elektronika, Vol. 25, Issue 2, 2006, p. 202-206.
- [64] Swędrowski L., Dzwonkowski A.: *Wzorcowanie systemu dla diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego z wykorzystaniem metod wibracyjnych*, Pomiar Automatyka Kontrola nr 9 bis (2006), s. 186-188, ISSN 0032-4110.
- [65] Swędrowski L., Rusek J.: *Model and laboratory simulation of a induction motor for diagnostic purposes*, Metrology and Measurement Systems, vol. XVI (2009), No 4, p. 607-618, ISSN 0860-8229.
- [66] Swędrowski L., Rusek J.: *Model and simulation tests of a squirrel-cage induction motor with oscillation of air gap*, Proc. of 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (Vienna, Austria)/IEEE, Arsenal Research 131- 6, 2005.
- [67] Swędrowski L.: *Current measurement and analysis for induction motor diagnostics*, Metrology and Measurement Systems, vol. XVII, 2010, s. 87-94, ISSN 0860-8229.
- [68] Swędrowski L.: *Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego, oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego*, Wydawnictwo PG, Gdańsk 2005, s. 14-24, ISBN 83-7348-111-7.

- [69] Szymaniec S.: *Diagnostyka łożysk tocznych w silnikach w warunkach ich przemysłowej eksploatacji*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006, str. 91 – 96.
- [70] Teotrakool K., Devaney M. J., Eren L.: *Bearing fault detection in adjustable speed drives via a support vector machine with feature selection using a genetic algorithm*, I2MTC 2008 - IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12-15, 2008.
- [71] Trajin B., Regnier J., Faucher J.: *Comparison between vibration and stator current analysis for the detection of bearing faults in asynchronous drives*, IET Electric Power Applications, DOI: 10.1049/iet-epa.2009.0040, 2009.
- [72] Trajin B., Regnier J., Faucher J.: *Indicator for bearing fault detection in asynchronous motors using stator current spectral analysis*, Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium June 30 2008-July 2 2008, p. 570 – 575.
- [73] Wilczewski L., Swędrowski L.: *Badania symulacyjne wpływu modulacji prądu na przebieg mocy chwilowej pobieranej przez silnik indukcyjny dla celów diagnostyki łożysk*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 21, Gdańsk 2005.
- [74] Yilmaz M.S., Ayaz E.: *Adaptive neuro-fuzzy inference system for bearing fault detection in induction motors using temperature, current, vibration data*, EUROCON 2009, 18-23 May 2009, page(s):1140, 1145 2009 F 397.
- [75] Zarei J., Poshtan J.: *An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection*, Tribology International, no 42(2009), p. 213–219.
- [76] Zhou W, Lu B., Habetler T. G., Harley R. G.: *Incipient bearing fault detection via motor stator current noise cancellation using Wiener filter*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 4, July/August 2009.
- [77] Zimroz R.: *Optymalizacja procedury demodulacji z wykorzystaniem unormowanej sumy amplitud wstęp bocznych jako kryterium decyzyjne*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 118, 2007.
- [78] Zimroz R.: *Optymalizacja wyboru szerokości pasma w demodulacji sygnału do wykrywania uszkodzeń lokalnych w elementach maszyn górniczych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol. 118, nr 33, s. 151-161, ISSN 0370-0798.
- [79] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996 r.
- [80] Katalog firmy Besel S.A.: http://www.cantonigroup.com/gfx/file/besel/Katalog/Kat_8.pdf, 2007.
- [81] Katalog firmy National Instruments, 2006.
- [82] Katalog firmy FLIR Systems: <http://www.instruments4hire.co.uk/ThermaCAM%20E25%20EN.pdf>.

Załącznik 1

W załączniku 1 przedstawiono kod źródłowy podprogramów „Baza – Łożyska”, „Analiza – Moc” oraz „Zapis” programu głównego „Moc-Łożyska”, wykorzystywanego do archiwizacji, analizy i wizualizacji danych uzyskanych z pomiarów, wykonanych z wykorzystaniem kasy NI PXI 6122. Zadaniem opracowanej aplikacji jest również identyfikacja składowych charakterystycznych dla szeregu typów uszkodzeń łożysk. Ponadto oprogramowanie umożliwia odczyt danych pomiarowych z uprzednio zapisanych plików. Opis programu został zamieszczony w rozdziale 6.2.2 rozprawy.

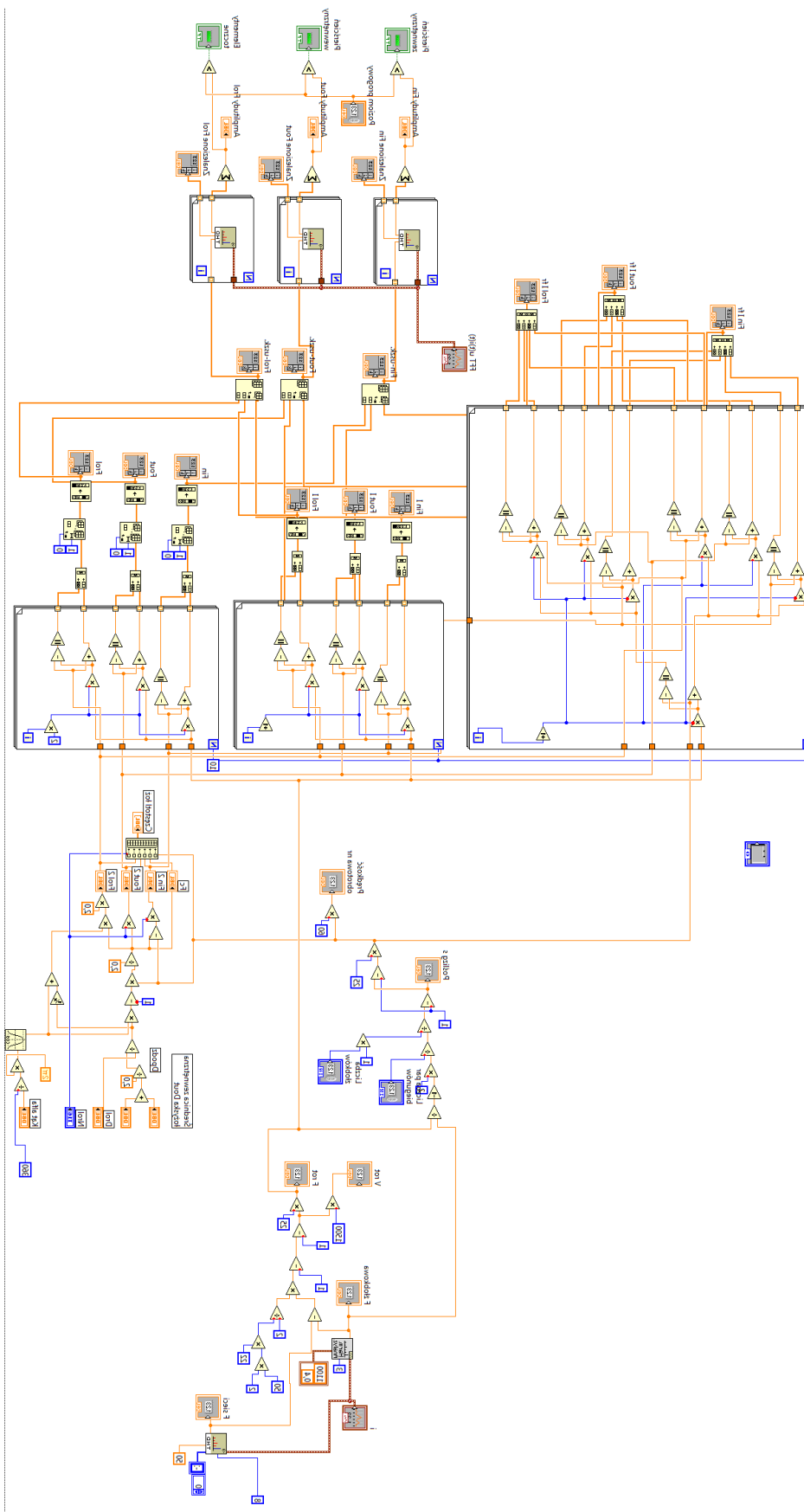


Rys.1. Kod źródłowy podprogramu „Baza-Łożyska”.

Podprogram „Baza-Łożyska”, przeznaczony jest do zapisania danych łożysk do bazy danych.

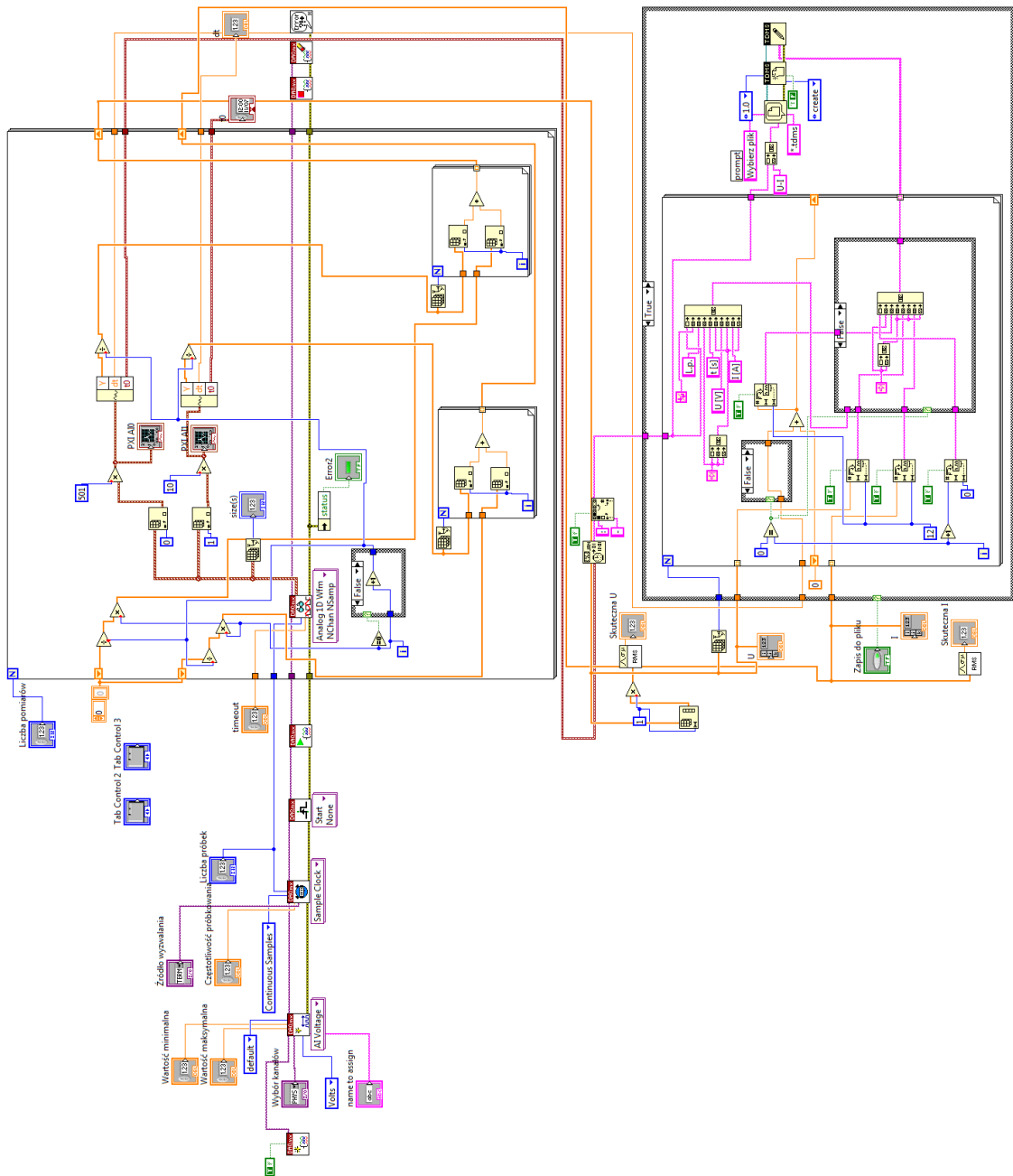
Na rysunku 2 przedstawiono kod źródłowy podprogramu „Analiza-Moc”, na rysunku 3 – kod źródłowy podprogramu „Zapis”, natomiast na rysunku 4 zaprezentowano kod źródłowy głównego programu „Moc-Łożyska”.

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



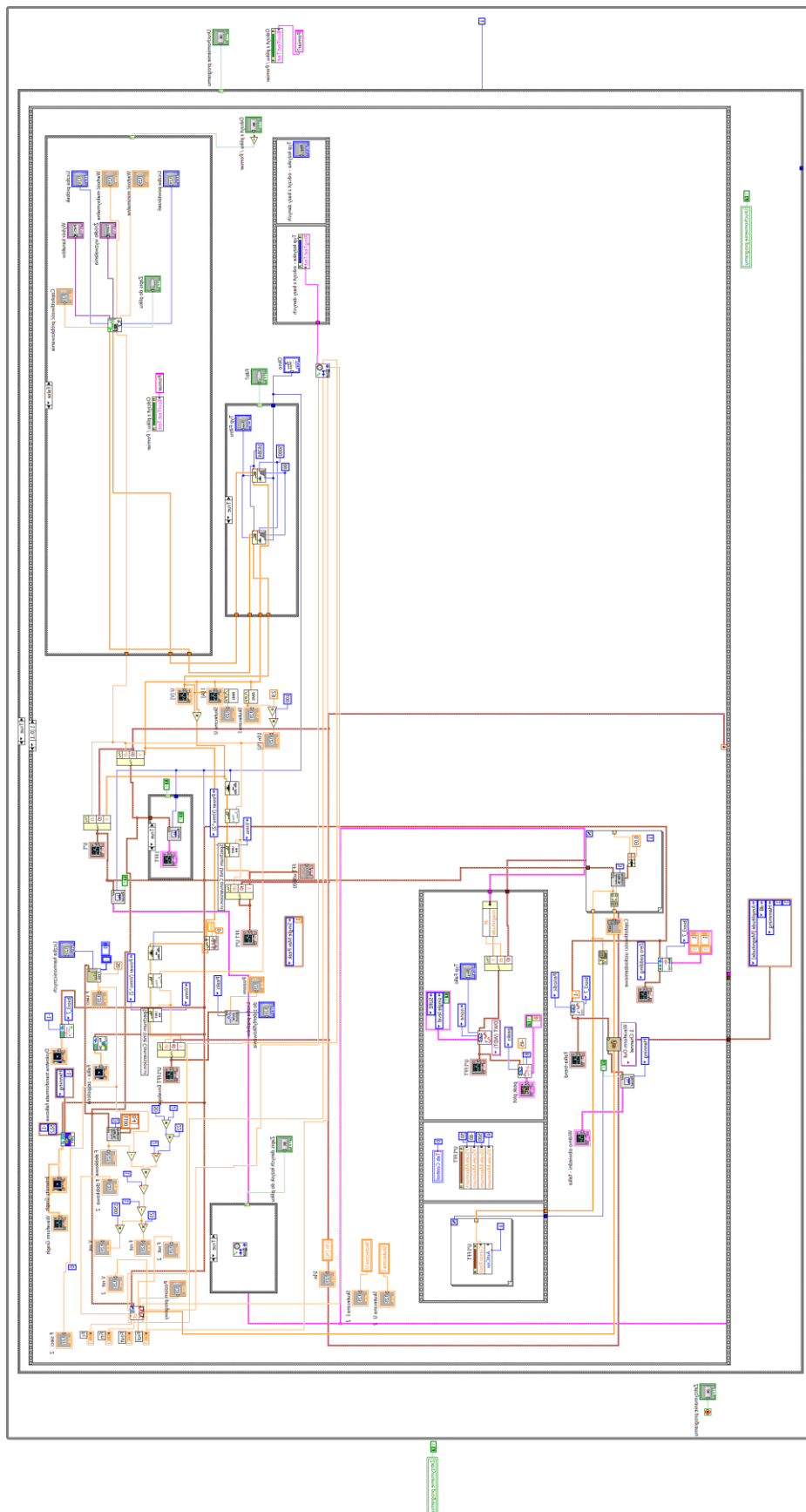
Rys.2. Kod źródłowy podprogramu „Analiza-Moc”

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



Rys.3. Kod źródłowy podprogramu „Zapis”

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny



Rys.1. Kod źródłowy programu „Analiza-Moc”.

Załącznik 2

W załączniku 2 umieszczono specyfikację techniczną karty akwizycji danych NI PXI 6122 produkcji National Instruments, pobraną ze strony producenta: www.ni.com.

NI PXI-6122

16-Bit, 500 kS/s/ch, Simultaneous Sampling Multifunction DAQ

- 4 simultaneously sampled analog inputs, 16-bit, 500 kS/s per channel
- 4 input ranges from ± 1.25 to ± 10 V and deep onboard memory (16 MS)
- 8 hardware-timed digital I/O lines; two 24-bit counters; analog and digital triggering
- Direct SMB connectivity with the TB-2709 terminal block
- Included NI-DAQmx driver software and LabVIEW SignalExpress interactive data-logging software
- Optimized integration with NI LabVIEW, LabWindows™/CVI, and Measurement Studio



Specifications

Specifications Documents

- Specifications
- Data Sheet

Specifications Summary

General	
Product Name	PXI-6122
Product Family	Multifunction Data Acquisition
Form Factor	PXI Platform
PXI Bus Type	PXI Hybrid Compatible
Part Number	779179-01
Operating System/Target	Windows , Real-Time , Linux
LabVIEW RT Support	Yes
Power Requirement for +3.3V Rail	1.1 A
Power Requirement for +5V Rail	1.03 A
Power Requirement for +12V Rail	0 mA
Power Requirement for -12V Rail	52 mA
Slot Two Module	No
Module Width	1
MXI Compatible	Yes
DAQ Product Family	S Series
Measurement Type	Quadrature encoder , Digital , Frequency , Voltage
RoHS Compliant	No
Analog Input	

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

Channels	4 , 0
Single-Ended Channels	0
Differential Channels	4
Resolution	16 bits
Sample Rate	500 kS/s
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	4960 μ V
Maximum Voltage Range Sensitivity	132 μ V
Minimum Voltage Range	-1.25 V , 1.25 V
Minimum Voltage Range Accuracy	740 μ V
Minimum Voltage Range Sensitivity	24 μ V
Number of Ranges	4
Simultaneous Sampling	Yes
On-Board Memory	32 MB
Analog Output	
Channels	0
Digital I/O	
Bidirectional Channels	8
Input-Only Channels	0
Output-Only Channels	0
Number of Channels	0 , 8
Timing	Hardware
Max Clock Rate	10 MHz
Logic Levels	TTL
Input Current Flow	Sinking , Sourcing
Output Current Flow	Sinking , Sourcing
Programmable Input Filters	No
Supports Programmable Power-Up States?	No
Current Drive Single	24 mA
Current Drive All	192 mA
Watchdog Timer	No
Supports Handshaking I/O?	No
Supports Pattern I/O?	Yes
Maximum Input Range	0 V , 5 V
Maximum Output Range	0 V , 5 V
Counter/Timers	
Counters	2
Number of DMA Channels	1
Buffered Operations	Yes
Debouncing/Glitch Removal	No
GPS Synchronization	No
Maximum Range	0 V , 5 V
Max Source Frequency	20 MHz
Minimum Input Pulse Width	10 ns
Pulse Generation	Yes
Resolution	24 bits
Timebase Stability	100 ppm
Logic Levels	TTL
Physical Specifications	
Length	16 cm
Width	10 cm
I/O Connector	68-pin male SCSI-II type
Timing/Triggering/Synchronization	
Triggering	Digital , Analog
Synchronization Bus (RTSI)	Yes

Załącznik 3

W załączniku 3 umieszczono specyfikację techniczną karty akwizycji danych NI PXI 4462 produkcji National Instruments, pobraną ze strony producenta: www.ni.com.

NI PXI-4462

24-Bit, 204.8 kS/s, 4-Input

- Six gain settings for input ranges from ± 316 mV to 42.4 V
- Four simultaneously sampled analog inputs at up to 204.8 kS/s
- Software-configurable AC/DC coupling and IEPE conditioning
- Variable antialiasing filters
- Support for IEEE 1451.4 Class 1 Smart (TEDS) Sensors
- 24-bit resolution ADCs with 118 dB dynamic range



Specifications

Specifications Documents

- Specifications
- Data Sheet

Specifications Summary

General

Product Name	PXI-4462
Product Family	Dynamic Signal Analyzers
Form Factor	PXI Platform
PXI Bus Type	PXI Hybrid Compatible
Part Number	779132-01 , 779688-01 , 779131-01
Operating System/Target	Real-Time , Linux , Windows
LabVIEW RT Support	Yes
Power Requirement for +3.3V Rail	0.99 A
Power Requirement for +5V Rail	1.8 A
Power Requirement for +12V Rail	130 mA
Power Requirement for -12V Rail	70 mA
Slot Two Module	No
Module Width	1
MXI Compatible	Yes
Measurement Type	IEPE accelerometer , Voltage
RoHS Compliant	No
Signal Conditioning	Current excitation , Anti-aliasing filter
Analog Input	

Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny

Channels	4 , 0
Single-Ended Channels	0
Differential Channels	4
Resolution	24 bits
Sample Rate	204.8 kS/s
Max Voltage	42.4 V
Maximum Voltage Range	-42.4 V , 42.4 V
Maximum Voltage Range Sensitivity	5.05 μ V
Minimum Voltage Range	-316 mV , 316 mV
Minimum Voltage Range Sensitivity	37.7 nV
Number of Ranges	6
Simultaneous Sampling	Yes
On-Board Memory	2047 samples
Analog Output	
Channels	0
Digital I/O	
Bidirectional Channels	0
Input-Only Channels	0
Output-Only Channels	0
Number of Channels	0
Counter/Timers	
Counters	0
Physical Specifications	
Length	16 cm
Width	10 cm
I/O Connector	BNC connectors , SMB female
Timing/Triggering/Synchronization	
Triggering	Digital , Analog
Synchronization Bus (RTSI)	Yes