

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

INSTYTUT MECHANIKI STOSOWANEJ



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Mateusz WRÓBEL

***METODYKA TESTOWANIA ODBIORCZEGO ASYNCHRONICZNYCH
SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH***

Promotor:

dr hab. inż. Roman BARCZEWSKI

Promotor pomocniczy:

dr inż. Dominik RYBARCZYK

Poznań, 2023

Spis treści:

STRESZCZENIE	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I AKRONIMÓW	9
1. WPROWADZENIE	11
1.1. Wstęp	11
1.2. Cel i zakres pracy	14
2. ASYNCHRONICZNY SILNIK ELEKTRYCZNY - OBIEKT DIAGNOZOWANIA. 17	
2.1. Przestrzeń wad i uszkodzeń silników elektrycznych	17
2.2. Metody diagnozowania i testowania silników elektrycznych	19
2.2.1. Standardowe (normowe) metody diagnozowania silników elektrycznych	19
2.2.1.1. Pomiary drgań	21
2.2.1.2. Pomiary hałasu	24
2.2.1.3. Pomiary parametrów elektrycznych	25
2.2.2. Rozwijane metody badawcze	28
2.3. Stanowiska i systemy testowe opracowane w literaturze	37
2.4. Podsumowanie metod diagnozowania silników elektrycznych	37
3. PROPONOWANA METODYKA TESTOWANIA ASE	41
3.1. Symptomy diagnostyczne i metody testowania	41
3.2. Wpływ warunków prowadzenia testów	43
4. METODYKA TESTOWANIA ASE - WYBRANE METODY I TECHNIKI PRZETWARZANIA I ANALIZOWANIA SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH ..	47
4.1. Dekompozycja multisynchroniczna (MSA) jako narzędzie diagnostyczne	47
4.2. Analiza informatywności sygnałów wibroakustycznych	51
4.3. Wpływ warunków prowadzenia testów ASE na hałas, drgania i pole magnetyczne	59
4.3.1. Pomiary hałasu	59
4.3.2. Pomiary i analizy widmowe drgań	62
4.3.3. Pomiary i analizy pola magnetycznego	67
4.3.4. Wpływ sposobu montażu/posadowienia na drgania testowanego ASE	79
5. WALIDACJA KLASYCZNYCH I NOWYCH METOD DETEKCJI WAD PRODUKCYJNYCH ASE	91
5.1. Wprowadzenie	91
5.2. Weryfikacja metodyki - silnik badawczy GUNT PT500.19	92
5.2.1. Opis obiektu badań	92
5.2.2. Opis systemu pomiarowego i układu zasilania	93
5.2.3. Wyniki badań	98
5.2.3.1. Detekcja wad na podstawie podstawowych pomiarów i analizy drgań	98
5.2.3.2. Detekcja wad na podstawie pomiarów i analizy hałasu	112
5.2.3.3. Detekcja wad na podstawie pomiarów i analizy prądów fazowych	116

5.2.3.4.	Detekcja wad na podstawie pomiaru poślizgu.....	122
5.2.3.5.	Detekcja wad na podstawie pomiarów i analiz pola magnetycznego	125
5.2.3.6.	Detekcja wad na podstawie analizy stanów nieustalonych.....	128
5.3.	Weryfikacja metodyki - silniki produkowane seryjnie BESEL 2SIEK 63-4A2.....	131
5.3.1.	Opis obiektu.....	131
5.3.2.	Opis stanowiska badawczego	132
5.3.3.	Wpływ ośrodka sprzęgającego na drgania rejestrowane na głowicy pomiarowej	133
5.3.4.	Wpływ sposobu montażu silnika w trakcie testowania na drgania przedniej tarczy łożyskowej	139
5.3.5.	Wyniki pomiarów i analiz	143
5.4.	Proponowana metodyka oceny jakości wykonania i testowania odbiorczego ASE	144
6.	WNIOSKI.....	151
	LITERATURA	155

Streszczenie

Obecne systemy testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych bazują głównie na pomiarach wielkości elektrycznych (prąd, napięcie, moc chwilowa), a metody testowania wibroakustycznego polegają na podstawowych pomiarach drgań i hałasu. Stosowana obecnie parametryzacja drgań i hałasu nie umożliwia detekcji wad produkcyjnych. Jest ona jedynie narzędziem ogólnej oceny jakości wykonania silników. W celu poprawy jakości produkowanych silników oraz wskazania ogniw produkcyjnych, odpowiedzialnych za powstawanie wad w gotowych produktach uzasadnione jest udoskonalenie obecnych i/lub opracowanie nowych metod testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych.

Celem niniejszej pracy było opracowanie metodyki testowania, obejmującej sprecyzowanie warunków prowadzenia pomiarów i wskazanie ich wpływu na wyniki testów oraz implementacji zaawansowanych metod i technik przetwarzania sygnałów pozwalających na uzyskanie kompleksowej informacji o jakości wykonania części mechanicznej jak i obwodów elektromagnetycznych silnika. Istotne było również opracowanie nowych metod i technik parametryzacji procesów resztkowych towarzyszących pracy silników asynchronicznych oraz parametrów funkcjonalnych, umożliwiających pozyskiwanie uszkodzeniowo zorientowanych symptomów diagnostycznych.

W ramach pracy przeprowadzono rozeznanie literaturowe dotyczące obecnie stosowanych metod testowania odbiorczego silników elektrycznych. Na podstawie przeglądu stwierdzono, że głównie rozwijane są metody diagnozowania eksploatacyjnego silników prowadzące do wykrywania uszkodzeń. Detekcja wad produkcyjnych metodami stosowanymi w diagnostyce eksploatacyjnej może być nieskuteczna z uwagi na to, że większość informacji o wadach produkcyjnych w sygnałach diagnostycznych zawiera się w składowych niskoenergetycznych. Dodatkowo istotny wpływ na wyniki testowania poprodukcyjnego mają warunki prowadzenia testów.

Na podstawie eksperymentu czynnego określono: wrażliwość symptomów i sygnałów diagnostycznych na intencjonalnie wprowadzane wady produkcyjne, wpływ warunków prowadzenia testów na wyniki pomiarów oraz zaproponowano metodę oceny jakości wykonania silników na płaszczyźnie $v_{RMS} - f_{RICE}$. W końcowej części pracy sformułowano wnioski oraz przesłanki do dalszych prac badawczych w zakresie testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych.

Abstract

Currently used acceptance testing systems for asynchronous electric motors are mainly based on measurements of electrical quantities (current, voltage, instantaneous power) but vibroacoustic testing methods rely on basic vibration and noise measurements. The currently used parameterization of vibration and noise does not enable detection of manufacturing defects. It is only a tool for general assessment of electric motor quality. The improvement of current and/or the development of new acceptance testing methods for asynchronous electric motors is justified, in order to improve the quality of manufactured electric motors and to indicate the production link responsible for generation of defects in final products.

The purpose of this thesis was to develop a testing methodology, including specifying the conditions for conducting measurements and indicating their impact on the test results, as well as implementing advanced signal processing techniques and methods providing comprehensive information about the quality of the mechanical part and electromagnetic circuits of the electric motors. It was also important to develop new methods and techniques for parameterization of residual processes accompanying the operation of asynchronous motors (likewise functional parameters), enabling the acquisition of fault-oriented diagnostic symptoms.

As part of the thesis, a literature research was carried out regarding the currently used methods of acceptance testing of electric motors. Based on this research, it was found that the methods of exploitational diagnosis of electric motors leading to damage detection are mainly being developed. Detection of production defects using the methods of exploitational diagnostics may be ineffective due to the fact that the majority of information about production defects are contained in low-energy components of diagnostic signals. Moreover, the conditions of acceptance tests have a significant impact on the results of testing.

On the basis of the active experiment, the sensitivity of symptoms and diagnostic signals to intentionally introduced manufacturing defects and the impact of test conditions on the measurement results were determined. The method for evaluating the quality of motor performance on the $v_{RMS} - f_{RICE}$ plane was proposed. In the final part of the thesis, conclusions and premises for further research in the field of acceptance testing of asynchronous electric motors were formulated.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów

ASE – asynchroniczny silnik elektryczny
WA – wibroakustyka lub wibroakustyczny
MSA – uśrednianie multisynchroniczne
AFC – korekcja amplitudowo-częstotliwościowa
CPS – cyfrowe przetwarzanie sygnałów
RMS – wartość skuteczna
AVG – wartość średnia
PEAK – wartość szczytowa
1F – jednofazowy
3F – trójfazowy

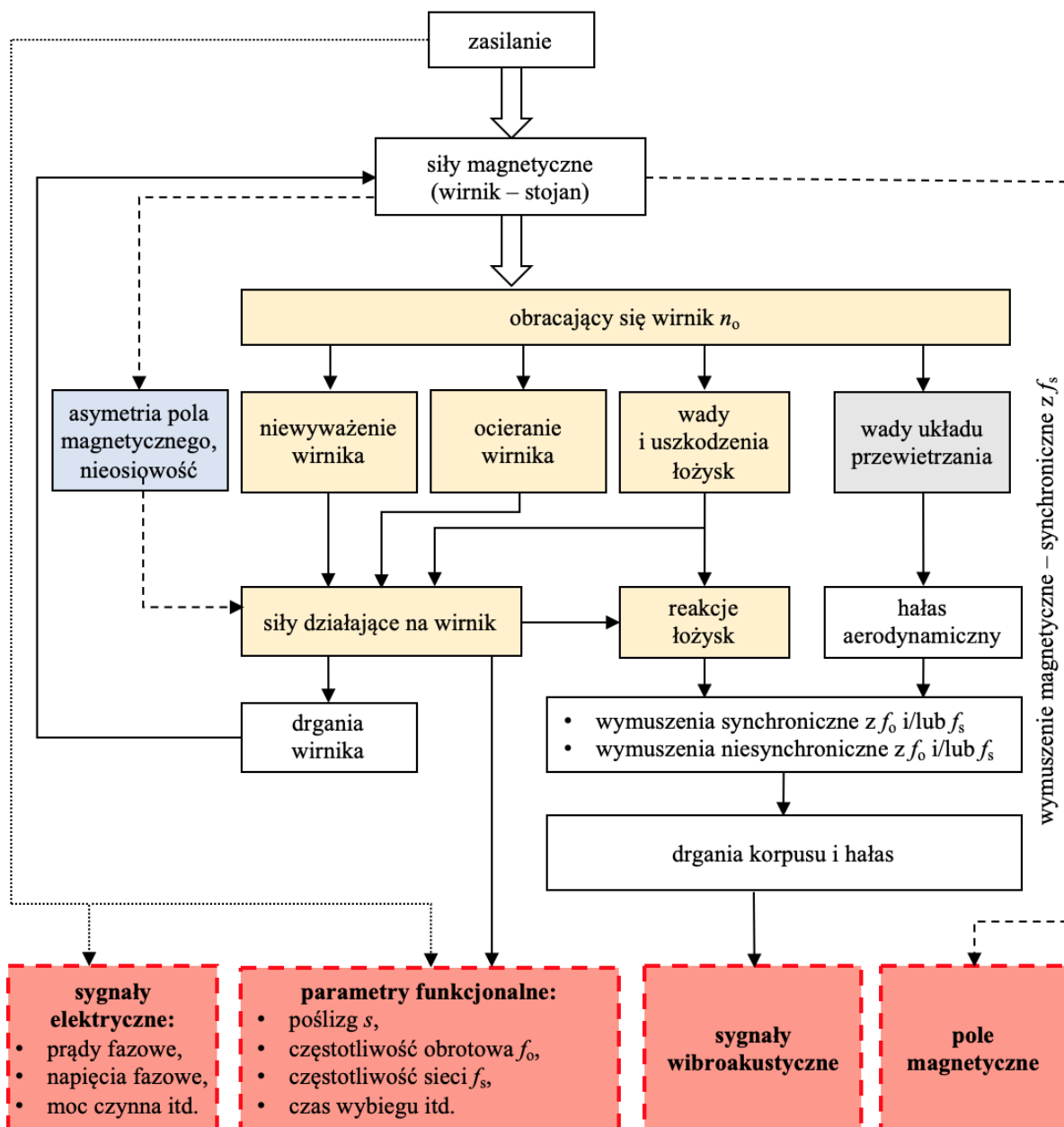
$x(t)$ – sygnał (dowolny)
 f – częstotliwość
 n_o – prędkość obrotowa
 f_o – częstotliwość obrotowa
 f_s – częstotliwość sieci zasilającej
 f_{RICE} – częstotliwość Rice'a
 a – przyspieszenia drgań
 v – prędkości drgań
 p – ciśnienie akustyczne
 i – prąd
 u – napięcie
 s – poślizg
 t – czas

1. WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Szacuje się, że elektryczne układy napędowe zużywają około 50% całkowitego światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Znaczną część tego zapotrzebowania (około 80%) stanowią układy, w których główną jednostką napędową są trójfazowe asynchroniczne silniki elektryczne (ASE) [1-3]. Powszechność zastosowania tego rodzaju napędów wynika z ich niezbyt skomplikowanej budowy, niezawodności (w przypadku poprawnej eksploatacji), łatwości sterowania, korzystnego stosunku mocy do masy oraz niskiej ceny [4]. Z powodu dużej popularności asynchronicznych silników elektrycznych od ich producentów wymagane jest dołożenie wszelkich starań, aby egzemplarze wypuszczane na rynek były jak najlepszej jakości oraz były wolne od wad produkcyjnych. Dlatego konieczne jest stosowanie przez producentów skutecznych metod testowania odbiorczego silników.

Uwzględniając konstrukcję, sposób działania oraz zastosowanie, można określić silniki elektryczne jako przetworniki elektro-mechaniczne. Podstawą działania tego typu urządzeń jest zamiana energii elektrycznej na ruch obrotowy wirnika w wyniku generowania momentu elektromagnetycznego [5]. Stąd można wnioskować, że wady i uszkodzenia silników elektrycznych mogą obejmować zarówno elementy mechaniczne jak i obwód elektromagnetyczny. Pracujący silnik elektryczny jest źródłem zjawisk wibroakustycznych (drgania i hałas) oraz pola magnetycznego. Intensywność tych zjawisk, a także wyniki parametryzacji i charakterystyki, mogą świadczyć o stanie technicznym (wadach i uszkodzeniach) całego silnika lub poszczególnych jego elementów składowych. Schemat zależności pomiędzy źródłami oddziaływań elektromagnetycznych i mechanicznych (dynamicznych), a drganiami i hałasem generowanym przez silniki elektryczne przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Zależności pomiędzy drganiami i hałasem, a wymuszeniami elektromechanicznymi silnika elektrycznego na podstawie C. Cempla [4].

Powszechność zastosowania asynchronicznych silników elektrycznych determinuje konieczność określania ich stanu technicznego, zarówno przez producenta jak i użytkownika. W związku z czym, diagnostykę silników elektrycznych można podzielić odpowiednio na:

- diagnostykę poprodukcyjną (testy odbiorcze) - producent,
- diagnostykę eksploatacyjną - użytkownik.

Testowanie odbiorcze asynchronicznych silników elektrycznych odbywa się w warunkach przemysłowych na końcowym etapie ich produkcji lub w przypadku oddania obiektu (silnika) po naprawie serwisowej. W ramach testów odbiorczych przeprowadzana jest finalna ocena jakości silników pod kątem poprawności ich wykonania, montażu i pracy (parametrów użytkowo-funkcjonalnych). Podstawą oceny stanu technicznego nowych silników są normy (np. PN-EN IEC 60034-14, ISO 20958 lub PN-73E-06020) określające zarówno warunki prowadzenia testów, miary i wielkości pomiarowe oraz wartości kryterialne niezbędne do klasyfikacji wyrobów jako zdatne lub niezdatne do sprzedaży [4].

Diagnostyka eksploatacyjna silników prowadzona jest w trakcie ich eksploatacji. Istnieją różnorodne metody badań i testowania umożliwiające określenie stanu technicznego silników. Bazują one na pomiarach drgań, hałasu emitowanego przez silnik czy też pomiarach prądów fazowych lub pola magnetycznego. W trakcie eksploatacji podwyższony poziom symptomów diagnostycznych odzwierciedlający stan techniczny silników wg. Blake'a [6] może wynikać z rezonansów lub luzów montażowych silnika (ok. 40%), uszkodzeń łożysk i układów przewietrzania (ok. 30%) oraz niewyważenia wirników (również ok. 30%). Rzadko spotykane na etapie eksploatacji silników są uszkodzenia obwodów elektrycznych. W przypadku pomiarów prowadzonych *in situ*, warunki ich prowadzenia oraz wartości kryterialne sprecyzowane są w normach (np. ISO 20813-1). Najczęściej wykorzystuje się do tego celu pomiary parametrów funkcjonalnych i wyniki parametryzacji i analiz procesów resztkowych zachodzących w silniku m.in. wspomnianych wcześniej drgań i hałasu, pomiary i analizy prądów fazowych, pomiary pola magnetycznego, a także pomiary mocy chwilowej, pomiary prędkości obrotowej, pomiary termiczne. Natomiast pomiary prowadzone na silnikach zdemontowanych z agregatów i naprawianych (testy poserwisowe) można prowadzić według zaleceń z tych samych norm, co w przypadku diagnostyki poprodukcyjnej [7, 8].

Aby utrzymać jak najdłuższy okres bezawaryjnej pracy silnika należy przestrzegać zaleceń producenta dotyczących warunków jego pracy oraz prowadzić odpowiednią politykę remontową. Do oceny stanu technicznego silnika na podstawie jego aktualnego stanu dynamicznego może służyć eksploatacyjna diagnostyka wibroakustyczna. Większość artykułów i prac naukowych dotyczących diagnostyki ASE skupia się właśnie na metodach detekcji uszkodzeń wynikających z naturalnego zużycia się elementów mechanicznych, czy też eksploatacji silników w sposób niepoprawny (nieodpowiednie lub niewystarczające smarowanie, zbyt duże obciążanie itp.) [9-11]. W wyniku tych procesów symptomy diagnostyczne niosące informacje dotyczące stanu technicznego obiektów przyjmują zwykle duże wartości (składowe wysokoenergetyczne w sygnałach

diagnostycznych). W warunkach produkcyjnych wady powstające w trakcie procesu produkcyjnego i wynikające z niedoskonałości tych procesów objawiają się głównie w postaci np. niskoenergetycznych składowych widma drgań, hałasu czy prądu. Wynika stąd konieczność stosowania precyzyjnych urządzeń pomiarowych lub dokładniejszych metod i technik przetwarzania sygnałów i ich parametryzacji. Z punktu widzenia klienta oczekiwane jest, aby dostarczane silniki miały jak najlepszą trwałość i niezawodność, wysoką sprawność, a w niektórych zastosowaniach charakteryzowały się cichą pracą. Stąd też uzasadnione jest udoskonalanie i rozwój technik i metod testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych, co stało się motywacją do podjęcia prac badawczych w tym obszarze.

1.2. Cel i zakres pracy

Przegląd literaturowy przeprowadzony w ramach niniejszej pracy (zamieszczony w rozdziale 2) pozwolił na konstatację, iż zagadnienie diagnostyki poprodukcyjnej, czy też testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych nie jest tak szeroko opisane jak pomiary i analizy wykonywane w ramach diagnostyki eksploatacyjnej ASE. Konstrukcja asynchronicznych silników elektrycznych, pomimo swojej prostoty, ma kilka kluczowych podzespołów, w których mogą powstawać wady na etapie produkcji. Powodują one skrócenie żywotności silników i wpływają niekorzystnie na parametry lub cechy funkcjonalne. Mogą być również przyczyną niedopuszczenia ich do sprzedaży (wybrakowania). Niektóre z wad produkcyjnych, od których powinny być wolne silniki (szczególnie te do specyficznych zastosowań, charakteryzujące się cichobieżnością, dużą sprawnością i małymi oporami ruchów), będą znacząco wpływała na wyniki pomiarów. Dotyczy to głównie metod i technik podstawowych (normowych), co stwarza wysokie prawdopodobieństwo błędnej oceny przydatności silnika do użytku, zwłaszcza w przypadku wymagających odbiorców. Stąd uzasadnione jest wprowadzenie zaawansowanych metod testowania odbiorczego w celu zwiększenia skuteczności kontroli poprodukcyjnej lub poserwisowej umożliwiając detekcję jak najszerszego spektrum wad w jak najkrótszym czasie oraz obejmującej jak największą partię silników (docelowo jest to 100% egzemplarzy). Na podstawie ww. założeń możliwe będzie zaprojektowanie oraz wykonanie zintegrowanego systemu diagnostycznego wspomagającego lub całkowicie zastępującego obecnie stosowane procesy testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych.

Celem niniejszej pracy było opracowanie i zaproponowanie nowej metodyki testowania, obejmującej sprecyzowanie warunków prowadzenia pomiarów i wskazanie ich

wpływu na wyniki testów oraz implementacji zaawansowanych metod i technik przetwarzania sygnałów diagnostycznych, pozwalających na uzyskanie kompleksowej informacji o jakości wykonania części mechanicznej jak i obwodów elektromagnetycznych silnika. Kolejnym celem było usprawnienie procesu testowania odbiorczego oraz poprawa skuteczności wykrywania wad produkcyjnych poprzez opracowanie nowych metody i techniki parametryzacji procesów resztkowych i parametrów funkcjonalnych towarzyszących pracy silników asynchronicznych oraz umożliwienie pozyskania uszkodzeniowo zorientowanych symptomów diagnostycznych (dyskryminant).

Zakres prac obejmował:

- przeprowadzenie przeglądu literaturowego dotyczącego obecnie stosowanych metod i technik testowania odbiorczego ASE,
- przeprowadzenie serii eksperymentów czynnych na silniku testowym (GUNT PT500.19) oraz silnikach produkowanych seryjnie (silniki BESEL Sh71-4A i 2SIEK 63-4A2 oraz SEW DFR63S2/TH) w celu sprecyzowania warunków prowadzenia testów oraz sprawdzenia przydatności proponowanych zaawansowanych metod i technik przetwarzania sygnałów do oceny stanu technicznego testowanych silników,
- zaproponowanie nowej metodyki testowania odbiorczego ASE,
- opracowanie prototypu stanowiska do prowadzenia testów odbiorczych wybranego modelu ASE.

2. ASYNCHRONICZNY SILNIK ELEKTRYCZNY - OBIEKT DIAGNOZOWANIA

2.1. Przestrzeń wad i uszkodzeń silników elektrycznych

Pojęcie obiektu, a dokładniej obiektu badań diagnostycznych, jest bardzo szerokie. Obiektem takim możemy nazwać zarówno cały system współpracujących ze sobą urządzeń, jak i pojedyncze urządzenie czy maszynę, mającą swoje przeznaczenie techniczne, wymagające obsługi, utrzymywania w dobrej kondycji i ulegającą uszkodzeniom. Każdy obiekt diagnostyczny będzie cechował jego stan techniczny wyjściowy lub który będzie wynikał z historii jego użytkowania i stanowi podstawę do określenia jego możliwego zachowania na późniejszym etapie eksploatacji [12]. Maszyną elektryczną natomiast możemy nazwać mechanizm, który umożliwia przetworzenie energii elektrycznej pobieranej z sieci lub źródła napięcia stałego, w inny rodzaj energii elektrycznej (transformatory) lub energię mechaniczną ruchu obrotowego lub liniowego (silniki) [5, 13]. Zatem, na podstawie powyższego można stwierdzić, że asynchroniczne silniki elektryczne od momentu projektowania do eksploatacji mogą być zaliczone do obiektów, które mogą, a wręcz powinny być diagnozowane. Stan techniczny ASE powinien obejmować zarówno stan techniczny układu mechanicznego wirnika - stojana jak i obwodów elektromagnetycznych, począwszy od przyłączy elektrycznych, po uzwojenia [14, 15].

Do tej pory przeprowadzono wiele badań dotyczących określenia stopnia niezawodności silników elektrycznych oraz przyczyn i procesów powstawania wad i uszkodzeń. Część badań było przeprowadzonych przy udziale organizacji EPRI (*Electric Power Research Institute*) [16]. Ich celem było określenie niezawodności silników elektrycznych pracujących w elektrowniach. Dane zostały opracowane dla 6312 silników pracujących w 168 zespołach generatorów. Analizowano silniki dużej mocy powyżej 100 HP¹ (ok. 74,6 kW). Podobne badania dotyczące urządzeń elektrycznych pracujących przy produkcji energii elektrycznej zostały przeprowadzone przez IEEE (*Institute of Electrical and Electronics*

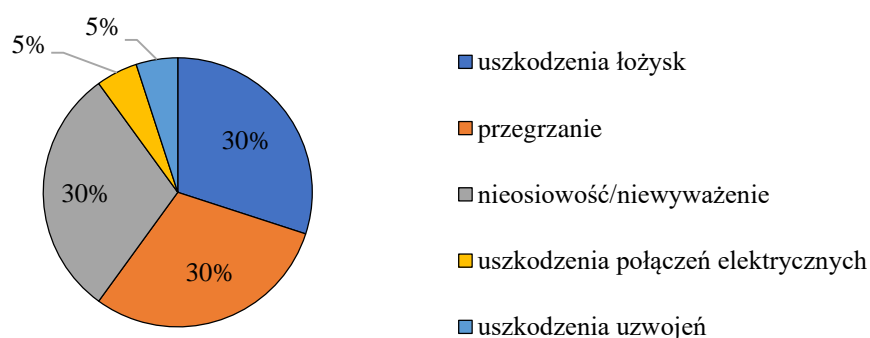
¹ HP - (ang. *horse power*) koń parowy, jednostka mocy używana w krajach anglosaskich, 1HP = 745,7 W

Engineers) [17]. W badaniach poddano analizie 222 silniki o mocy powyżej 50 HP (ok. 37,4 kW). W końcowych wnioskach sformułowanych na podstawie niniejszych badań zaprezentowano m.in. udziały procentowe poszczególnych rodzajów uszkodzeń w stosunku do całkowitej liczby przebadanych silników (Tab. 2.1).

Tab. 2.1. Udziały poszczególnych typów uszkodzeń silników elektrycznych wg. EPRI (*Electric Power Research Institute*) oraz IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [14, 18].

opracowanie	uszkodzenia łożysk (%)	uszkodzenia stojana (%)	uszkodzenia wirnika (%)	inne (%)
EPRI	41	36	9	14
IEEE	44	26	8	22

Dane dotyczące udziału uszkodzeń silników elektrycznych zostały również zawarte w *Handbook of Condition Monitoring* (Rao [19]). Największy udział uszkodzeń związany był z częścią mechaniczną silników. Dotyczył on m.in. uszkodzenia łożysk, nieosiowości oraz niewyważenia wirnika. Zdecydowanie mniejszy udział miały uszkodzenia części elektrycznej (Rys. 2.1).



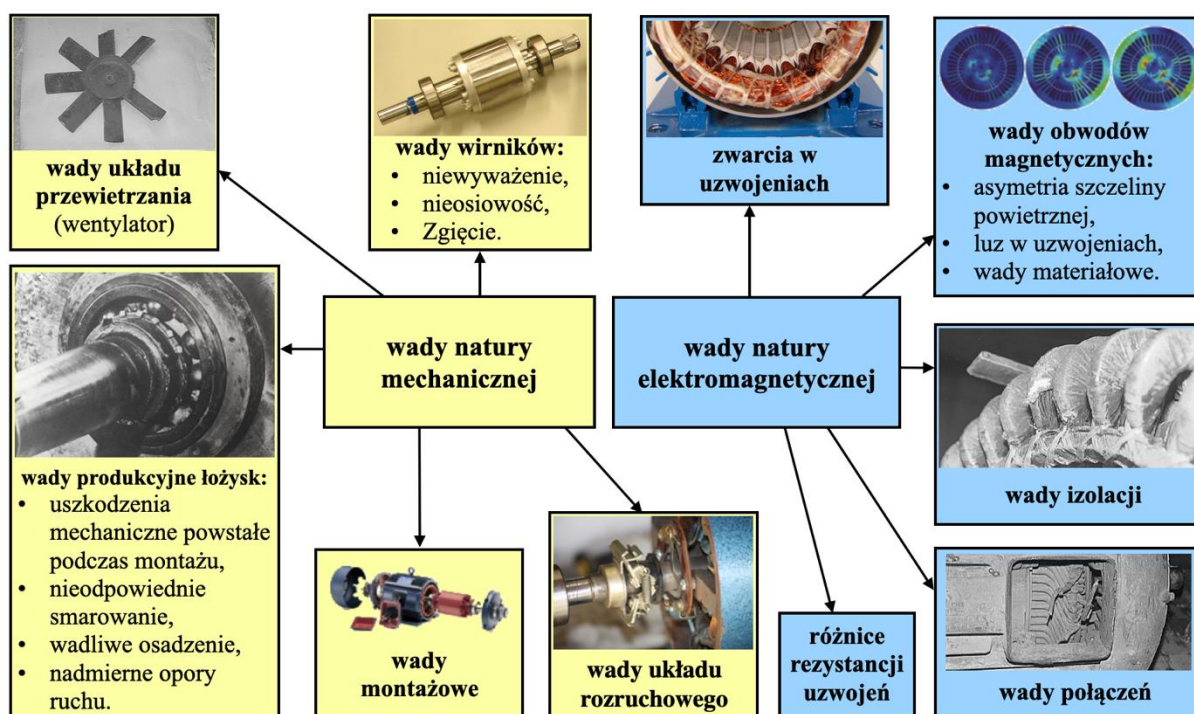
Rys. 2.1. Udziały typów uszkodzeń występujących w silnikach elektrycznych (na podstawie Rao [19]).

Zaprezentowane dane zostały pozyskane w fazie eksploatacji silników elektrycznych. Uszkodzenia eksploatacyjne silnika mogą wynikać z charakteru jego pracy, zużycia elementów mechanicznych lub elektrycznych oraz warunków pracy (w tym: temperatury, wielkości i rodzaju obciążenia, smarowania, warunków środowiskowych). W zdecydowanej większości przypadków publikacje dotyczące procesów i przyczyn powstawania uszkodzeń ASE skupiają się właśnie na etapie eksploatacji [9, 19-24].

Natomiast spektrum wad produkcyjnych znacznie różni się od uszkodzeń powstałych na etapie eksploatacji ASE. Wady produkcyjne można podzielić na dwie grupy:

- wady natury mechanicznej,
- wady natury elektromagnetycznej.

Do wad natury mechanicznej można zaliczyć wady m.in.: łożyskowania, wirników (niewyważenie, niecentryczność), układu przewietrzania (wentylatora) oraz montażowe. W przypadku wad natury elektromagnetycznej możemy wyróżnić: wady uzwojeń (zwarcia, rozzwarcia, różne rezystancje), wady obwodów elektromagnetycznych, wady izolacji, wady połączeń [25-27]. Przestrzeń wad asynchronicznych silników elektrycznych została przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Przestrzeń wad asynchronicznych silników elektrycznych na etapie produkcji.

Zarówno wady mechaniczne jak i elektromagnetyczne ASE powstałe w trakcie produkcji wynikają z niedoskonałości procesów produkcyjnych (np. obróbki, montażu) lub wadliwych komponentów użytych do ich wyprodukowania.

2.2. Metody diagnozowania i testowania silników elektrycznych

2.2.1. Standardowe (normowe) metody diagnozowania silników elektrycznych

Na przestrzeni lat zostały opracowane normy precyzujące metody testowania silników, w tym warunki prowadzenia testów, sposób posadowienia, obciążenia, wielkości i miary pomiarowe oraz wartości kryterialne niezbędne do przeprowadzenia oceny ich stanu technicznego. Metody te opierają się głównie na pomiarach procesów reszkowych (drgań,

hałasu i opcjonalnie temperatury), a także wielkości elektrycznych - najpowszechniej pomiarów prądów (tzw. sygnatur prądowych). Testy silników przeprowadzane na podstawie wyników parametryzacji procesów resztkowych mogą być realizowane na podstawie zaleceń normy PN-EN IEC 60034 pt. „Maszyny Elektryczne Wirujące” (ang. *Rotating Electrical Machines*). Norma ta składa się z 34 części, w których zostały opisane zagadnienia dotyczące konstrukcji, klasyfikacji, sterowania, testowania oraz napraw silników elektrycznych. W części 23 niniejszej normy zatytułowanej „Naprawa, przegląd i regeneracja” (ang. *Repair, overhaul and reclamation*) znaleźć można wymagania dotyczące prowadzenia tzw. testów końcowych (ang. *final tests*) [28]. Norma opisuje je jako testy wykonywane przed oddaniem obiektu docelowemu odbiorcy, domyślnie po dokonaniu naprawy, przeglądu lub regeneracji. Natomiast pojęcie testowania odbiorczego nie jest ograniczone wyłącznie do silników na końcowym etapie produkcji, ale również do tych po wykonaniu wszelkich prac serwisowych. Dlatego jest możliwe wykorzystanie metod opisanych w części 23 normy PN-EN IEC 60034 również do prowadzenia testów poprodukcyjnych asynchronicznych silników elektrycznych.

Rozdział 9 normy PN-EN IEC 60034-23 zawiera informacje dotyczące minimalnego programu prowadzenia testów końcowych silników elektrycznych z zastrzeżeniem, że program może być rozwinięty o dodatkowe pomiary i badania po uzgodnieniu z klientem. W ramach minimalnego programu testów dla silników asynchronicznych można wyróżnić takie pomiary jak [28]:

- pomiar rezystancji uzwojeń dla silnika wystudzonego,
- testy bez obciążenia (pomiary drgań, hałasu i prądów),
- test kierunku obrotów,
- próba wytrzymałości napięciowej (dla nowych uzwojeń lub uzwojeń przewijanych),
- pomiar napięcia indukowanego w obwodzie otwartym wirnika w trakcie postoju (tylko dla wirników uzwojonych).

W ramach testów odbiorczych asynchronicznych silników elektrycznych z wirnikami klatkowymi zasadniczo powinny być wykonywane tylko pierwsze 4 ww. pomiary. Przy czym najważniejszym z nich jest test bez obciążenia. Według niniejszej normy pomiary drgań silnika (v_{RMS} w paśmie 10-1000 Hz) dla pracy bez obciążenia zarejestrowane zgodnie z częścią 14 normy PN-EN IEC 60034 są podstawową informacją o jego ogólnym stanie technicznym. Taki pomiar nie daje jednak możliwości identyfikacji wad produkcyjnych. Test bez obciążenia powinien być przeprowadzony w warunkach nominalnego napięcia i częstotliwości sieci, z rejestracją prędkości obrotowej oraz prądów fazowych. Dodatkowo przewiduje się wyznaczenie poziomu mocy akustycznej ASE, którego celem jest jedynie deklaracja zgodności

wyprodukowanego ASE z normą PN-EN IEC 60034-9. Uzasadnione jest prowadzenie testów pod pełnym obciążeniem w przypadku, jeśli silnik jest uznany jako jednostka napędowa maszyn krytycznych².

2.2.1.1. Pomiary drgań

W normie PN-EN IEC 60034-14:2018 noszącej tytuł „Drgania mechaniczne określonych maszyn o wzniosach³ osi wału 56 mm i większych - Pomiar, ocena i wartości graniczne intensywności drgań” (ang. *Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher - Measurement, evaluation and limits of vibration severity*) zawarte są informacje dotyczące testowania silników elektrycznych z zastosowaniem pomiaru drgań [29].

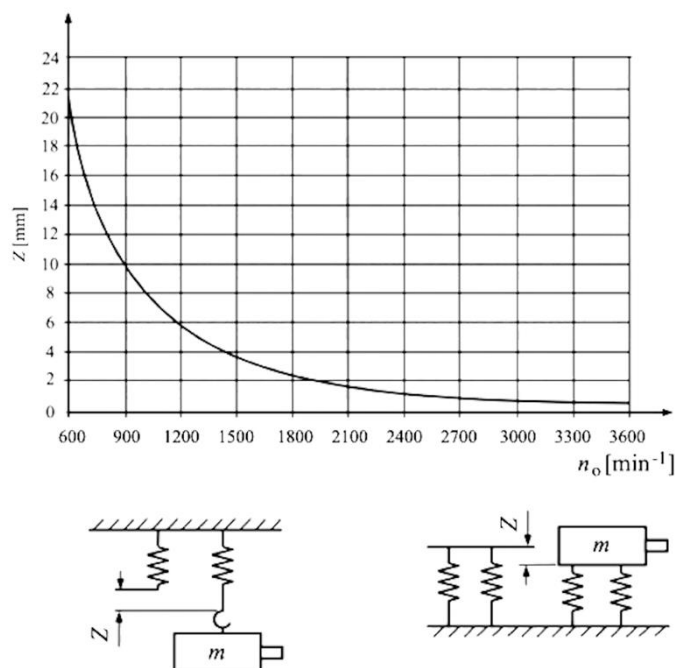
Podstawą do oceny stanu technicznego silników według normy PN-EN IEC 60034-14 są wartości skuteczne prędkości lub przemieszczeń drgań w paśmie 10-1000 Hz. Pomiary drgań powinny być realizowane na częściach niewirujących tj. tarczach łożyskowych lub podporach łożyskowych, w każdym z kierunków (osiowy, promieniowy i styczny). Główne wymagania dotyczące aparatury pomiarowej powinny być spełnione zgodnie z normą ISO 2954 *Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery — Requirements for instruments for measuring vibration severity*. Norma ta dopuszcza maksymalny błąd pomiaru, który nie może przekraczać 10%. Wymagania te w aspekcie testowania odbiorczego ASE są raczej mało restrykcyjne. W przypadku mocowania bezpośrednio do korpusu silnika masa czujnika nie powinna być większa niż 1/50 masy silnika, aby nie wpływać na jego stan drganiowy. Duża część normy dotyczy warunków prowadzenia testów, m.in. możliwych sposobów montażu/posadowienia silników w trakcie pomiarów drgań. Zgodnie z normą preferowane są dwa sposoby posadowienia: sztywnego i sprężystego.

Warunki posadowienia sprężystego mogą być spełnione poprzez podwieszenie lub osadzenie silnika na sprężynach lub elastycznym podłożu (np. guma, pianka). Przy czym częstotliwość drgań własnych układu silnik-posadownie nie może być większa niż 1/3 częstotliwości obrotowej silnika. Minimalną deformację podłoża, zawiesia lub sprężyn

² Maszyna krytyczna - wg. ORBIT Bently Nevada Sales Department, jest to maszyna niezbędna do kontynuacji produkcji i funkcjonowania przedsiębiorstwa, zwykle bez przewidzianej rezerwy [182].

³ Wznios wału - nazywany również „wielkością mechaniczną silnika”, jest to wysokość od podstawy silnika do jego osi.

Z (ugięcie statyczne), spowodowaną ciężarem silnika, można określić w funkcji prędkości obrotowej (Rys. 2.3).



Rys. 2.3. Minimalna deformacja podłoża, zawiesia lub sprężyn Z w zależności od prędkości obrotowej n_o testowanego silnika wg PN-EN IEC 60034-14 [29].

Powyższą zależność można również opisać wzorem [29]:

$$Z = \frac{c^2 g}{(2\pi n_o)^2}, \quad (2.1)$$

gdzie: Z – ugięcie/wyciągnięcie (statyczne) [mm],

c – stosunek częstotliwości obrotowej do częstotliwości drgań własnych (zależność z rysunku 2.3 wykreślona dla $c = 3$),

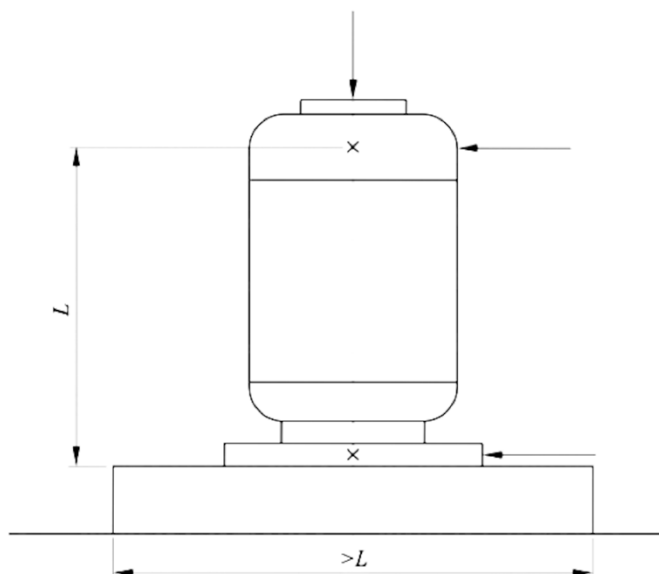
g – przyspieszenie ziemskie $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$,

n_o – prędkość obrotowa wirnika silnika [min^{-1}].

Norma dopuszcza również wykonywanie pomiarów na podłożu sztywnym w postaci ciężkiego fundamentu lub dedykowanego stanowiska testowego. W ogólnych założeniach odnośnie tych sposobów montażu/posadowienia określono, że częstotliwości drgań własnych układu stanowisko-silnik w kierunkach pionowym i poziomym nie powinny pokrywać się z:

- $\pm 10\%$ zakresem pierwszej składowej harmonicznej częstotliwości obrotowej f_o oraz $\pm 5\%$ zakresem drugiej składowej harmonicznej częstotliwości obrotowej $2f_o$,
- $\pm 5\%$ zakresem pierwszej i drugiej składowej harmonicznej częstotliwości sieciowej f_s .

W przypadku posadowienia na masywnym fundamencie, sztywność układu jest względna i określa się ją jako stosunek drgań zmierzonych na łożyskach do drgań fundamentu (te nie powinny przekraczać 30% drgań zmierzonych na łożyskach). Stanowisko testowe przewidziane dla silników łapowych nie jest obarczone dodatkowymi wymaganiami oprócz głównych założeń konstrukcyjnych. Silniki z montażem kołnierzowym powinny być montowane na specjalnej płycie, dla której zalecane zależności wymiarowe zostały pokazane na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Zależności wymiarowe podstawy stanowiska testowego dla silników kołnierzowych [29].

Silniki powinny być testowane bez obciążenia, na biegu jałowym. Drgania zmierzone we wszystkich punktach i kierunkach pomiarowych nie powinny przekraczać wartości przedstawionych w tabeli 2.2.

Tab. 2.2. Wartości kryterialne (dopuszczalne) pomiarów drgań wg normy PN-EN IEC ISO 60034-14 [29].

zastosowanie	sposób montażu	wznios wału od 56 do 132 mm		wznios wału powyżej 132 mm	
		x_{RMS} [μm]	v_{RMS} [mm/s]	x_{RMS} [μm]	v_{RMS} [mm/s]
silniki standardowe	sprężysty	45	2,8	45	2,8
	sztywny	-	-	37	2,3 (2,8 ⁴)
silniki specjalnego przeznaczenia	sprężysty	18	1,1	29	1,8
	sztywny	-	-	24	1,5 (1,8 ¹)

⁴ Wartość przyjmowana dla silników z dwiema parami biegunów

Jak widać pomiary wykonywane wg normy PN-EN IEC 60034-14 niosą ze sobą pewne ograniczenia chociażby odnośnie wielkości pomiarowych, pasma pomiarowego, czy też sposobu montażu/posadowienia silników w trakcie testów. W przypadku silników o małych wzniosach do 132 mm nie jest zalecane mocowanie na sztywnym fundamencie lub stanowisku testowym. Mogą to być zalecenia wystarczające w kontekście diagnostyki eksploatacyjnej lub podstawowej, dwustanowej klasyfikacji odbiorczej w kategoriach dobry/wadliwy. Ten sposób oceny /klasyfikacji raczej nie będzie wystarczający do oceny rozszerzonej. Ponadto na podstawie szerokopasmowych pomiarów wartości skutecznych prędkości drgań nie będzie możliwa identyfikacja wad produkcyjnych silników.

2.2.1.2. Pomiary hałasu

W normie PN-EN IEC 60034 zawarta jest również część 9 dotycząca dopuszczalnych poziomów hałasu silników elektrycznych. Metodyka pomiaru oparta jest o wyznaczanie poziomu mocy akustycznej urządzeń metodami dokładnymi i technicznymi (zgodnie z ISO 3741, ISO 4743-1, ISO 3743-2, ISO 3745, ISO 9614-1 oraz ISO 9614-2) lub metodami orientacyjnymi z niższą dokładnością (ISO 3746, ISO 3747, ISO 3744) przy konieczności stosowania poprawek korekcyjnych związanych z wpływem poziomu tła akustycznego oraz wpływem dźwięków odbitych w pomieszczeniu badawczym (na powierzchni pomiarowej). Same warunki prowadzenia testów, włączając sposób montażu czy obciążenia, są podobne do tych sprecyzowanych w normie PN-EN IEC 60034-14 dotyczącej pomiarów drgań. Podczas pomiarów akustycznych dodatkowo trzeba zadbać o minimalizację przenoszenia się hałasu strukturalnego z i do podłoża i elementów montażowych.

Należy nadmienić, że wyznaczanie poziomu mocy akustycznej L_{WA} w warunkach *in situ* (np. na hali montażowej) może być ograniczone, a czasami niemożliwe do zrealizowania. Istotnym czynnikiem ograniczającym wyznaczanie L_{WA} może być poziom tła akustycznego w miejscu wykonywania pomiarów. Badania prowadzone w ramach niniejszej pracy na grupie silników produkowanych seryjnie o mocy 0,18 kW (BESEL 2SIEK 63-4A2) wykazały, że poziom mocy akustycznej nie przekracza 58 dB, a poziom dźwięku A na powierzchni pomiarowej ok. 47 dB. Mając na uwadze powyższy fakt, a także wymagania normowe dotyczące wyznaczania poziomu mocy akustycznej, poziom tła akustycznego na powierzchni pomiarowej powinien być niższy o co najmniej 3 dB, czyli (dla silnika BESEL 2SIEK 63-4A2) nie przekraczać 44 dB. W przypadku hal produkcyjnych warunek ten może być trudny do spełnienia. W produkcji seryjnej lub masowej dodatkowym problemem może

być ograniczony czas na przeprowadzenie badań akustycznych. Należy tutaj dodać, że podobnie jak w przypadku szerokopasmowych pomiarów wartości skutecznych przemieszczeń i prędkości drgań, poziom mocy akustycznej nie pozwoli zidentyfikować wad produkcyjnych.

Wartości kryterialne uzależnione są od prędkości obrotowej silnika, jego mocy oraz sposobu chłodzenia. Dopuszczalne poziomy mocy akustycznej L_{WA} , dla ASE z dwiema parami biegunów, zawierają się w przedziale od 77 dB dla silników małej mocy (np. 1 kW) do 115 dB dla silników dużej mocy (2-5 MW) [30].

2.2.1.3. Pomiary parametrów elektrycznych

W ramach pomiarów elektrycznych ASE możliwe są do zrealizowania pomiary napięć i prądów fazowych. W normie PN-EN EIC 60034-26 pt. „Wpływ napięć asymetrycznych na parametry trójfazowych silników indukcyjnych” (ang. *Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors*) opisano możliwe efekty różnic w wartościach napięć zasilających (asymetria napięć zasilających fazy). Wymienione są takie skutki jak: 6-10 krotny wzrost asymetrii prądów fazowych w porównaniu z asymetrią napięć, nadmierny przyrost temperatury obserwowany w fazie stabilizacji termalnej po uruchomieniu silnika, zmniejszenie momentu obrotowego oraz obniżenie prędkości obrotowej. W przypadku zbyt dużej asymetrii napięć zasilających, powstałej w wyniku np. uszkodzonego lub skorodowanego przyłącza zasilania, parametry te mogą przyjmować wartości niedopuszczalne.

Jak wcześniej wspomniano asymetria napięć będzie skutkować powstaniem zwielokrotnionej asymetrii prądów fazowych. Z tego powodu pomiar prądów silnika na biegu jałowym jest istotną częścią prowadzenia testów odbiorczych. Wskazówki i zalecenia dotyczące analiz sygnatur elektrycznych silników elektrycznych (ang. *Electrical Signature Analysis*) sprecyzowane są w normie ISO 20958: 2013 [31].

Analiza prądów fazowych pozwala na detekcję uszkodzeń silnika zarówno natury mechanicznej i elektromagnetycznej. Jedną z podstawowych metod jest metoda analizy sygnatury prądowej CSA (ang. *Current Signature Analysis*). Metoda ta pozwala na detekcję uszkodzeń takich jak:

- wady/uszkodzenia klatki wirnika (pęknięte pręty, wady/uszkodzenia pierścieni),
- uszkodzenia uzwojeń wirników uzwojonych,
- nieosiowość wirnika względem stojana (niecentryczność szczeliny powietrznej),
- wady/uszkodzenia łożysk.

Metoda CSA jest zalecana w diagnostyce *on-line* silników elektrycznych. Przewidziana jest głównie dla silników w fazie eksploatacji, pracujących pod obciążeniem nominalnym lub będącym zbliżonym do nominalnego. Jest to uzasadnione ze względu na możliwość pojawienia się w widmie prądu uszkodzeniowo zorientowanych składowych.

Wady i uszkodzenia klatki wirnika będą objawiały się podwyższonymi amplitudami wstęp bocznych (ang. *sidebands*) o częstotliwościach związanych z częstotliwością sieci zasilającej f_s . Częstotliwości tych dodatkowych składowych są wyrażone wzorem:

$$f_{sb} = (1 \pm 2ks)f_s, \quad (2.2)$$

gdzie: s – poślizg [-],

f_s – częstotliwość sieci zasilającej [Hz],

k – kolejna liczba całkowita np. 1, 2, 3 ...

Natomiast w przypadku pojawienia się niesymetryczności prądu wirnika wywołanej pękniętymi prętami klatki lub uszkodzeniami pierścieni wzór 2.2 przyjmie postać:

$$f = (1 \pm 2s)f_s, \quad (2.3)$$

Wstęgi boczne składowej sieciowej f_s pojawiające się w wyniku uszkodzeń klatki wirnika oddalone są one od niej na widmie o 0,3 - 3 Hz, a ich amplituda jest niższa 100 - 1000 krotnie od amplitudy składowej f_s . Z powodu niskich energii wstęp bocznych niezbędne jest stosowanie zarówno precyzyjnych urządzeń pomiarowych, a także dokładnych metod i technik przetwarzania sygnałów.

Nadmierna niecentryczność (nierównomierność) szczeliny powietrznej może zostać zidentyfikowana przy pomocy składowych widmowych związanych z częstotliwością żłobkową wirnika (ang. *rotor slots frequency*):

$$f_{rs} = \left(R_s \frac{1-s}{p} \pm \eta_{ws} \right) f_s, \quad (2.4)$$

gdzie: R_s – liczba żłobków wirnika (równa liczbie prętów klatki wirnika),

η_{ws} – nieparzyste składowe siły magnetomotorycznej, $\eta_{ws} = (1, 3, 5, \dots)$,

p – liczba par biegunów silnika,

oraz częstotliwością obrotową wirnika:

$$f_o = \left(\frac{1-s}{p} \right) f_s, \quad (2.5)$$

Zatem uwzględniając wzory 2.4 i 2.5 składowe charakterystyczne związane z niecentrycznością szczeliny powietrznej będą finalnie definiowane wzorem:

$$f_{ecc} = \left[\left(R_s \frac{1-s}{p} \pm \eta_{ws} \right) \pm \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] f_s \quad (2.6)$$

W praktyce do określenia rozmiaru niecentryczności wirnika stosuje się średnią różnicę wartości składowej częstotliwości obrotowej f_o i żłobkowej wirnika f_{rs} . Im bardziej wartości tych składowych widma są wyrównane tym większa jest niecentryczność szczeliny powietrznej.

Analiza sygnatur prądowych silnika pozwala również na detekcję zwarcień międzyzwojowych stojana. Częstotliwości składowych związanych z tym typem uszkodzeń można obliczyć zgodnie ze wzorem:

$$f_{st} = \left[\frac{k(1-s)}{p} \pm l \right] f_s, \quad (2.7)$$

gdzie l – kolejna nieparzysta liczba całkowita np. 1, 3, 5 ...

Uszkodzenia (lokalne) łożysk, takie jak uszkodzenia bieżni wewnętrznej i zewnętrznej, a także uszkodzenia elementów tocznych, również będą widoczne na widmie prądów fazowych jako podwyższone amplitudy ich charakterystycznych składowych. W zależności od uszkodzonego elementu łożyska częstotliwości charakterystyczne będą opisane wzorami:

– elementy toczne – $f_{rb} = \left(\frac{D}{d} \right) f_o \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right], \quad (2.8)$

– bieżnia zewnętrzna – $f_{ro} = \left(\frac{z}{2} \right) f_o \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right) \right], \quad (2.9)$

– bieżnia wewnętrzna – $f_{ri} = \left(\frac{z}{2} \right) f_o \left[1 + \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right) \right], \quad (2.10)$

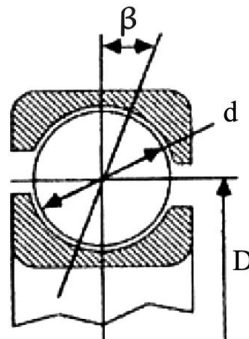
gdzie: z – liczba elementów tocznych [-],

β – kąt działania łożyska [$^\circ$],

D – średnica podziałowa łożyska [mm],

d – średnica elementu tocznego [mm].

Wymiary charakterystyczne łożyska zostały przedstawione na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Wymiary charakterystyczne łożyska kulkowego [31].

W przypadku łożysk kulkowych, dla których liczba elementów tocznych wynosi od 6 do 19, a także dla łożysk wałeczkowych o liczbie elementów tocznych 12 - 18, częstotliwości składowych związanych z uszkodzeniami bieżni zewnętrznej i wewnętrznej można orientacyjnie oszacować jako:

$$f_{ro} \cong 0,4 \cdot z \cdot f_o, \quad (2.11)$$

$$f_{ri} \cong 0,6 \cdot z \cdot f_o. \quad (2.12)$$

Metoda CSA pozwala zatem na kompleksową analizę stanu technicznego silnika, zarówno najczęściej spotykanych uszkodzeń części mechanicznej, jak i elektromagnetycznej. W celu czytelnej reprezentacji wyników zalecane jest zastosowanie tzw. wektora Parka jako wskaźnika/parametru opisującego stan techniczny silnika. Metoda została dokładniej przedstawiona w rozdziale 2.2.2. Nie jest ona często stosowana w przemyśle ze względu na uproszczenia związane z założeniem równości prądów fazowych, co w przypadku rzeczywistych parametrów sieci oraz konstrukcji urządzeń nie występuje [32].

2.2.2. Rozwijane metody badawcze

Z powodu szerokiego zastosowania silników elektrycznych diagnostyka eksploatacyjna tych obiektów, a w szczególności silników asynchronicznych, jest tematem powszechnie znanym i wciąż rozwijanym pod kątem implementacji nowych metod i technik wykrywania uszkodzeń. Najbardziej popularne są metody bazujące na pomiarach elektrycznych. Atutem stosowania tego typu pomiarów jest brak konieczności montowania czujników na obudowie silnika, co jest ich niewątpliwą zaletą. Pomiary mogą być wykonywane przy pomocy układów pomiarowych wpiętych w linię zasilania silnika tj. układy pomiaru napięć, prądów czy mocy. Analiza pozyskanych sygnałów elektrycznych może być przeprowadzona z zastosowaniem różnych metod i technik przetwarzania.

Jedną z najbardziej popularnych metod jest analiza widmowa prądów fazowych MCSA (ang. *Motor Current Signature Analysis*). Metoda polega na rejestracji prądu stojana przy pomocy przekładnika prądowego lub miernika cęgowego oraz transformacji tego sygnału z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości (i tworzenie widm) [33]. Dzięki temu zabiegowi możliwe jest zapisanie sygnału ciągłego i okresowego jako superpozycji składowych. Transformację sygnału z dziedziny czasu do częstotliwości realizuje się stosując teoretycznie transformację Fouriere'a (FT - ang. *Fourier Transform*), definiowaną jako:

$$X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi ift} dt, \quad (2.13)$$

gdzie i – jednostka urojona ($i = \sqrt{-1}$).

W ujęciu aplikacyjnym sygnały są konwertowane w ADC⁵ do postaci dyskretnej (próbkowanie i kwantyzacja), a następnie poddane są przetwarzaniu cyfrowemu opartemu na dyskretnej transformacji Fouriere'a (DFT - ang. *Discrete Fourier Transform*):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (2.14)$$

gdzie: X_k – widmo dyskretne,

x_n – szereg czasowy (sygnał w postaci dyskretnej)

N – liczba próbek sygnału.

Natomiast w praktyce analiza widmowa realizowana jest z zastosowaniem algorytmu FFT (ang. *Fast Fourier Transform*) czyli szybkiej transformacji Fouriere'a, który znacząco przyspiesza proces obliczeniowy. Algorytm FFT wymaga jednak przetwarzania sekwencji sygnału zawierającego 2^n próbek. Reprezentacja graficzna przekształcenia sygnału dyskretnego z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości z zastosowaniem transformacji Fouriere'a nazywana jest widmem sygnału. Ten sposób analizy sygnałów jest polecany do analiz sygnałów stacjonarnych, ze względu na uśrednianie wartości poszczególnych składowych sygnałów w analizowanym przedziale czasowym. Informacje o niestacjonarnych składowych sygnałów w ujęciu częstotliwościowym pozostają rozmyte lub mogą przyjmować postać szumu pasmowego [34-36].

Analizy widmowe prądów fazowych (MCSA) bazują głównie na wysokorozdzielczych widmach wąskopasmowych. Takie podejście umożliwia detekcję szerokiego spektrum wad i uszkodzeń takich jak:

- niecentryczności statycznej, gdzie lokalizacja najmniejszej szczeliny powietrznej nie ulega zmianie w przestrzeni [37, 38],
- niecentryczności dynamicznej, gdzie najmniejszy wymiar szczeliny powietrznej przemieszcza się wzdłuż obwodu stojana [39, 40],
- niecentryczności mieszanej [41],
- wady i uszkodzenia łożysk [42-44],
- ocena stanu klatki wirnika [45],
- wady i uszkodzenia uzwojeń stojana [47-49].

Detekcja pierwszych trzech rodzajów wad i uszkodzeń silników asynchronicznych może być możliwa z zastosowaniem pasma pomiarowego ograniczono do ok. 1 kHz, co zwykle nie wymaga stosowania specjalnych technik zwiększania rozdzielczości widma. Wady

⁵ ADC - (ang. *Analog-Digital Converter*) przetwornik analogowo-cyfrowy

i uszkodzenia natury elektrycznej tj. pęknięte pręty klatki wirnika, zwarcia międzyzwojowe itp. mogą być wyraźnie zauważone w paśmie do 100 Hz i będą bezpośrednio związane z pierwszą składową prądu zasilającego (dla sieci europejskiej 50 Hz). Metoda została szczegółowo opisana w normie ISO 20958. MCSA z wykorzystaniem FFT może być z powodzeniem stosowana w przemyśle do detekcji uszkodzeń silników elektrycznych nawet we wczesnych fazach ich powstawania. Główną jej zaletą jest możliwość prowadzenia analiz na podstawie pomiaru tylko jednej z faz silnika, co jest kluczowe w przypadku silników jednofazowych lub silników, gdzie dostęp do przyłączy lub przewodów zasilających jest utrudniony [49].

Równie popularnym podejściem do analizy prądów fazowych jest wspomniane w rozdziale 2.2.1.3. rozszerzenie metody MCSA o pomiar prądów na wszystkich fazach silnika i zastosowanie do oceny jego stanu technicznego wektora Parka. Metoda polega na transformacji trójwymiarowej przestrzeni prądów fazowych do układu dwuwymiarowego. Metoda pozwala na wyznaczenie dwóch składowych i_d oraz i_q , będących funkcją prądów fazowych stojana i_{L1} , i_{L2} oraz i_{L3} :

$$i_d = \frac{2}{\sqrt{6}} \cdot i_{L1} - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot i_{L2} - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot i_{L3}, \quad (2.15)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{L2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{L3}, \quad (2.16)$$

Dla podstawowych harmonicznych prądowych o częstotliwości sieciowej f_s (i braku uszkodzeń/wad) zależności 2.14 i 2.15 można uprościć do postaci [32]:

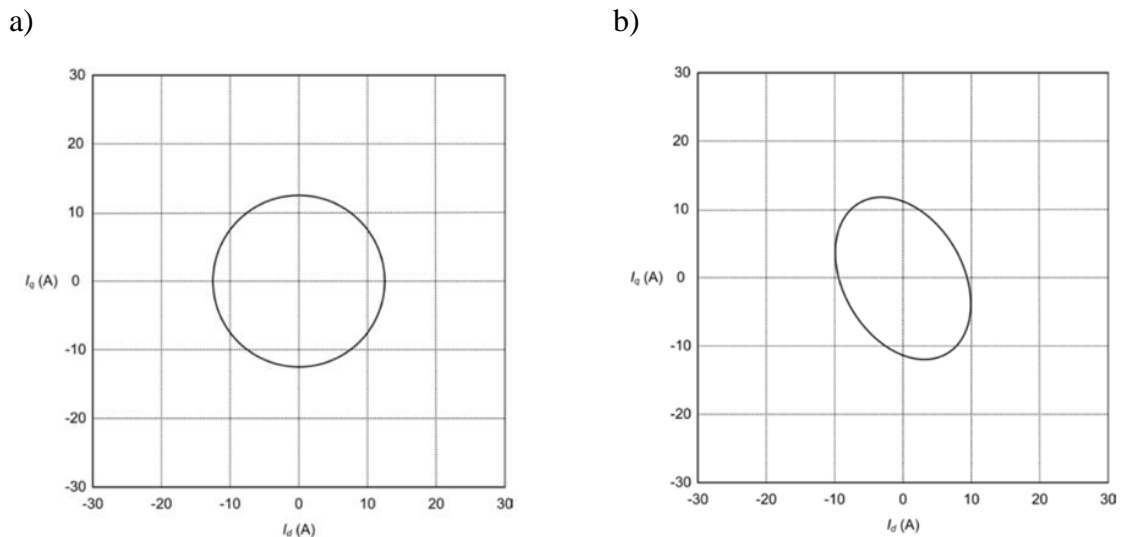
$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot I_m \sin(\omega t), \quad (2.17)$$

$$i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} \cdot I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (2.18)$$

gdzie: I_m – amplituda prądu fazowego [A],

ω – pulsacja napięcia zasilającego silnik, $\omega = 2\pi f$ [rad/s].

Podstawą analizy stanu technicznego obiektu jest wykres prezentujący tzw. okrąg Parka, który przyjmuje formę regularną dla nieuszkodzonego silnika. Każda zmiana w rejestrowanych prądach fazowych wynikająca z powstawania uszkodzeń silnika asynchronicznego będzie powodowała zmianę kształtu okręgu Parka (Rys. 2.6) [49, 50].



Rys. 2.6. Przykładowe formy graficzne okręgu Parka dla silników bez uszkodzeń oraz z uszkodzeniami (formy okręgu Parka silnika a) nieuszkodzonego, b) uszkodzonego) [49].

Kształty mogą się różnić w zależności od powstałej wady/uszkodzenia, choć nie są one jednoznaczne. W praktyce stosowane są rozszerzone analizy wektora Parka oparte o analizę widma modułu tego wektora. Wady i uszkodzenia silników będą powodowały powstawanie składowych dla nich charakterystycznych f_F , modulujących podstawową składową sieciową f_s o $\pm f_F$. Wprowadzenie modułu wektora Parka oraz jego analizy widmowej spowoduje zlikwidowanie pierwszej składowej sieciowej z widma sygnału prądowego, a także wyeksponowanie składowych zorientowanych uszkodzeniowo aż 3-krotnie. Dzięki temu, identyfikacja wad i uszkodzeń jest łatwiejsza oraz jednoznaczna. Wadą tej metody jest konieczność wykonania dużej liczby obliczeń oraz pojawianie się błędów związanych m.in. z założeniem symetrii prądów stojana, co nie jest dokładnym odzwierciedleniem rzeczywistych warunków pracy silnika [32, 52, 53].

Do detekcji wad i uszkodzeń na podstawie widma prądu stojana stosuje się również dyskretną transformację falkową widma DWT (ang. *Discrete Wavelet Transform*). W odróżnieniu do podstawowej analizy FFT transformacja falkowa pozwala na obserwowanie sygnału zarówno w sposób globalny, jak i lokalny. Sygnał poddawany transformacji falkowej zostaje zdekomponowany na część deterministyczną i część losową. Składowe deterministyczne będą wykazywały się podobieństwem do wybranej w procedurze falki (ang. *wavelet*), czyli wzorca oznaczanego jako $\Psi(t)$. Żeby dany rodzaj falki mógł zostać zastosowany w metodzie musi posiadać następujące cechy:

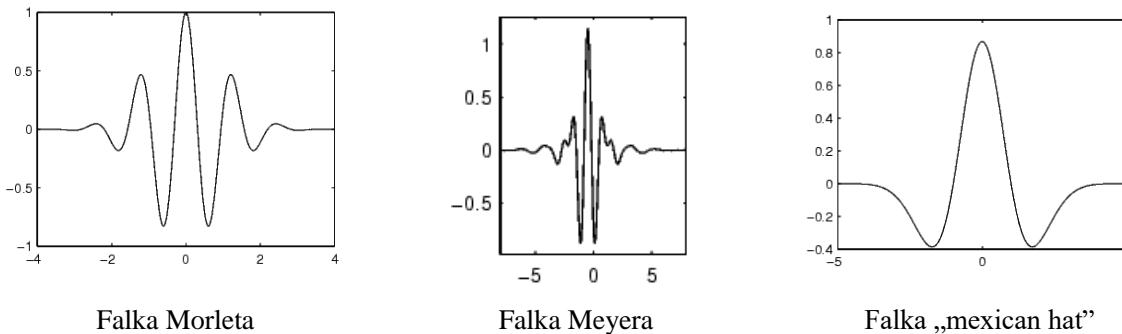
– jej całka musi być równa zero:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0, \quad (2.19)$$

– ma skończoną energię:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty. \quad (2.20)$$

Przykłady graficzne podstawowych falek przedstawiono na rysunku 2.7:



Rys. 2.7. Przykłady falek - funkcje bazowe (ang. *mother functions*) [53].

Forma ciągła przekształcenia falkowego CWT (ang. *Continuous Wavelet Transform*) przyjmuje formę:

$$\text{CWT}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (2.21)$$

gdzie: a – parametr skali związany z lokalizacją w dziedzinie częstotliwości ($a > 0$),

b – parametr lokalizacji falki w czasie t rozpatrywanego sygnału.

Natomiast postać dyskretną transformacji falkowej DWT (ang. *Discrete Wavelet Transform*) można zapisać w formie [54-57]:

$$\text{DWT}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x(k) \Psi \left(\frac{k - na_0^m b_0}{a_0^m} \right), \quad (2.22)$$

gdzie: k, m, n – kolejne liczby całkowite,

a_0 – parametr przesunięcia w dziedzinie częstotliwości ($a > 0$),

b_0 – parametr lokalizacji w dziedzinie czasu ($b > 0$).

Dyskretna transformacja falkowa z powodzeniem jest stosowana w detekcji uszkodzeń silników elektrycznych zwłaszcza pod kątem oceny stanu technicznego wirników [58, 59] oraz łożysk [60-62]. Natomiast reprezentacja wyników przekształceń falkowych nie jest intuicyjna i może sprawiać problemy w ich interpretacji przez osoby niedoświadczone. Wyniki mogą być przedstawione jako wartość podobieństwa falki do sygnału analizowanego na skali czas-częstotliwość, co nie jest dogodną formą do prowadzenia analiz. Może to być również przyczyną trudności w implementacji w automatycznych systemach diagnostycznych [63]. Duży problem może stanowić również dobór odpowiedniego rodzaju falki do zagadnienia

diagnostycznego. Z powodu właściwie nieograniczonej liczby falek zagadnienie optymalizacji praktycznie nie istnieje [64].

Ocena stanu technicznego asynchronicznych silników elektrycznych może być przeprowadzona również z zastosowaniem operatora energetycznego Teagera-Kaisera TKEO (ang. *Teager-Kaiser Energy Operator*). Metoda z powodzeniem była stosowana do wykrywania uszkodzeń łożysk w maszynach wirujących [65-67]. Łożyska toczne są elementem układu mechanicznego silnika elektrycznego, zatem zastosowanie TKEO w diagnostyce silników elektrycznych jest możliwe. Postać ciągła operatora energetycznego Teagera-Kaisera definiowana jest następującym równaniem:

$$\psi_c[x(t)] = [\dot{x}(t)]^2 - x(t), \quad (2.23)$$

gdzie:

$$\dot{x}(t) = \frac{dv}{dt}. \quad (2.24)$$

Natomiast postać dyskretna TKEO przyjmuje postać:

$$\psi[x(n)] = x^2(n) - x(n-1)x(n+1), \quad (2.25)$$

gdzie: $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ – sygnał i jego pochodne,

n – numer próbki.

Można zatem powiedzieć, że TKEO przy tak niewielkiej ilości operacji wchodzących w skład postaci dyskretny oraz jedynie 3 kolejnych próbek jest operatorem efektywnym w kontekście czasowym. Metodyka analizy prądu i z zastosowaniem TKEO opiera się na analizie sygnału $i_{TK}(t)$ powstałego w wyniku transformacji [68]:

$$i_{TK}(t) = \frac{\psi[i(t)] - \overline{\psi[i(t)]}}{\overline{\psi[i(t)]}}, \quad (2.26)$$

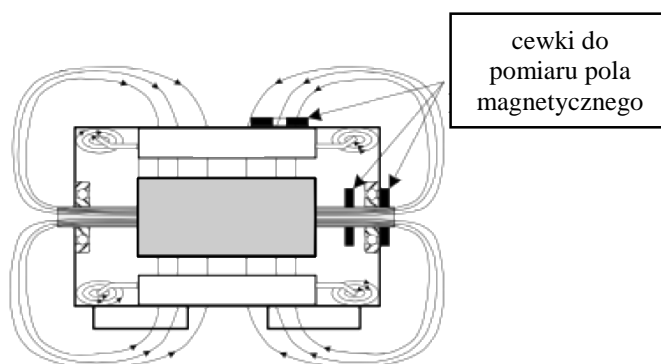
gdzie $i_{TK}(t)$ jest składową funkcji $\psi[i(t)]$, podzielonej przez jej własną składową stałą. Następnie powstały sygnał $i_{TK}(t)$ poddawany jest transformacji w dziedzinie częstotliwości z zastosowaniem algorytmu FFT. Widmo $i_{TK}(f)$ pozbawione jest składowych podstawowych, podobnie do metody z wykorzystaniem wektora Parka, a zawiera tylko składowe sygnału pochodzące od uszkodzonych elementów silnika tj. pęknięte pręty klatki, niecentryczność mieszana, uszkodzenia bieżni łożysk. Zdecydowaną wadą metody jest fakt powstawania w widmie sygnału po zastosowaniu TKEO nowych, niezidentyfikowanych składowych, które nie są związane z uszkodzeniami (artefaktów). Może to wpływać na błędną diagnozę wad i uszkodzeń silników asynchronicznych [68-71].

W ramach pomiarów elektrycznych wykonywanych w ramach diagnozowania asynchronicznych silników elektrycznych stosowane są także pomiary mocy czynnej. Analiza widma mocy chwilowej umożliwia również detekcję wad i uszkodzeń silników elektrycznych

w podobnym zakresie co analizy prądów fazowych [72-75]. W porównaniu z MCSA widmo mocy będzie zawierało składowe zorientowane uszkodzeniowo o stosunkowo wyższych amplitudach. Oznacza to, że ta metoda może być bardziej czuły na wady i uszkodzenia, szczególnie we wczesnej fazie ich rozwoju. Wadą tego rozwiązania jest konieczność dołączenia oprócz układu pomiaru prądu dodatkowego układu pomiaru napięcia fazowego [76-78].

Silniki elektryczne w trakcie pracy generują wokół siebie pole magnetyczne, które w miarę pogarszania się stanu technicznego silnika będzie ulegało zmianom. Zatem możliwa jest ocena stanu technicznego silnika na podstawie pomiarów pola magnetycznego. W praktyce stosowane są w tym celu dwie metody pomiarowe: pomiar strumienia poosiowego oraz pomiar tzw. „aury magnetycznej” silnika [87].

Do pomiaru strumienia poosiowego stosuje się cewki zamontowane osiowo na jednej z tarcz łożyskowych silnika, tak by strumień magnetyczny generowany w trakcie pracy silnika mógł wyindukować w cewce pomiarowej napięcie proporcjonalne do tego strumienia (Rys. 2.8).



Rys. 2.8. Widok uproszczonego przekroju silnika indukcyjnego z zaznaczonymi liniami generowanego pola magnetycznego oraz proponowanymi ustawieniami cewek pomiarowych [79].

Dla silnika idealnego (bez wad) strumień poosiowy powinien teoretycznie przyjmować wartość zerową, natomiast w praktyce nowe silniki będą emitowały strumień o bardzo niskich wartościach ze względu na nieidealną geometrię, mikrowady itp. [79-84].

Pomiar zewnętrznego pola magnetycznego może być realizowany przy użyciu czujników pola magnetycznego (czujniki hallotronowe lub rezystancyjne), których zadaniem jest pomiar natężenia pola magnetycznego wokół silnika [85-87]. Analizy wyników obu metod pomiarowych mogą być przeprowadzane w podobnym zakresie co pomiary drgań i pomiary elektryczne.

Oprócz pomiarów elektrycznych i magnetycznych jedną z fundamentalnych metod diagnostyki asynchronicznych silników elektrycznych są pomiary i analizy drgań.

Do najczęściej stosowanych metod analizy drgań służących do oceny stanu technicznego silników elektrycznych należą m.in.:

- podstawowe metody parametryzacji drgań - bazujące na wyznaczaniu miar (estymat) np. wartości skuteczne przyspieszeń i prędkości drgań, kurtozy itp. [29, 30, 88],
- analizy widm drgań silnika, polegające na identyfikacji charakterystycznych składowych widma związanych z uszkodzeniami tj. niewyważenie czy uszkodzenia łożysk [89-92],
- analizy widma obwiedni sygnału drgań [93],
- analiza falkowa [94, 95],
- operator energetyczny Teagera-Kaisera [96].

O ile miary sygnału drganiowego (estymaty - np. wartości skuteczne prędkości drgań) będą wskazywały jedynie na ogólny stan techniczny silników, to pozostałe metody mogą posłużyć do dokładnej detekcji i identyfikacji wad lub uszkodzeń powstałych w silniku [97].

Wspomniana w poprzednim akapicie analiza widma obwiedni sygnału może dotyczyć zarówno rejestrowanych drgań jak i prądów fazowych, podobnie jak zastosowanie analizy falkowej czy TKEO [93, 98, 99]. Widmo obwiedni sygnału drganiowego uzyskuje się poprzez poddanie szybkiej transformacie Fouriera chwilowej amplitudy sygnału $X(t)$:

$$X(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)}, \quad (2.27)$$

gdzie $\hat{x}(t)$ jest transformatą Hilberta analizowanego sygnału, która w formie ciągłej przyjmując formę [35]:

$$\mathcal{H}[x(t)] = \hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (2.28)$$

gdzie: $x(t)$ – sygnał w dziedzinie czasu,

τ – zmienna czasowa (opóźnienie).

Analiza obwiedni może być pomocna w detekcji zjawisk wprowadzających tzw. modulację amplitudową sygnału drganiowego. Do zjawisk tego typu należy m.in. poślizg [100, 101].

Analiza poślizgu może być jedną z form wyznaczania strat mechanicznych np. w wyniku nadmiernego tarcia lub oporów ruchu w łożyskach. W przypadku silników asynchronicznych dokonuje się jej na podstawie widma prądu bądź też na podstawie widma drgań. W przypadku widma prądu do estymacji poślizgu stosuje się harmoniczne żłobkowe określane wzorem (2.4) [102-105]. W przypadku oszacowania poślizgu na podstawie drgań wystarczająca jest znajomość częstotliwości składowej obrotowej [106]. Można stwierdzić, że zwiększenie poślizgu silnika względem prędkości synchronicznej będzie bezpośrednią miarą powiększenia się oporów wewnętrznych układu mechanicznego, a tym samym obniżenia

sprawności i jakości silnika. Warto jednak nadmienić, że takie uproszczenie może mieć zastosowanie dla znamionowo obciążonego silnika. Dla nowych silników testowanych bez obciążenia taka metoda może nie być wystarczająca, co wykazano w dalszej części pracy.

Hałas emitowany przez silniki jest w dużej mierze związany z generowanymi podczas pracy drganiami (różnej natury - Rys. 1.1). Można zatem stwierdzić, że może on być jednym ze źródeł diagnostycznych świadczących o stanie technicznym lub jakości wykonania silnika. Hałas emitowany przez silnik można podzielić na: hałas aerodynamiczny, elektromagnetyczny (niesymetryczność prądów i napięć, zaburzenia pola elektromagnetycznego) i mechaniczny (związany z uszkodzeniami łożysk, niecentrycznością lub niewyważeniem) [107]. Pomiar hałasu są często stosowane w diagnostyce asynchronicznych silników elektrycznych. Jedną z metod pomiaru hałasu jest wyznaczenie poziomu dźwięku A (skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A), wyrażonego wzorem [108-112]:

$$L_A = 10 \log_{10} \left(\frac{p_A^2}{p_0^2} \right), \quad (2.29)$$

gdzie: p_A – wartość skuteczna ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką korekcyjną A [Pa],

p_0 – wartość ciśnienia odniesienia ($p_0 = 0,00002$ Pa).

Wykonywane są również analizy widmowe oktauwowe i/lub tercjowe [113] oraz wąskopasmowe hałasu [114-118] oraz wyznaczany jest poziom mocy akustycznej silników [30]. Prowadzenie pomiarów hałasu może być problematyczne w warunkach przemysłowych ze względu na wysoki poziom tła akustycznego panujący na halach produkcyjnych [119]. Pomiar i analizy hałasu często są jednym z elementów diagnostyki wielosymptomowej, w ramach której realizowane są także pomiary i analizy elektryczne oraz drganiowe [107, 113, 114, 120]. Wprowadzenie diagnostyki wielosymptomowej może prowadzić do skuteczniejszej detekcji i identyfikacji wad oraz uszkodzeń silników elektrycznych.

W diagnostyce silników stosowane są również pomiary i analizy termalne. Pomiar wykonywane są najczęściej przy pomocy kamer termowizyjnych. Jednak prowadzenie pomiarów termalnych w środowisku przemysłowym może być problematyczne ze względu na możliwe odbicia cieplne, problemy z doбором współczynnika emisyjności oraz dokładności samych urządzeń pomiarowych. Pomiar te mogą być stosowane do wspomagania diagnozy silników, a nie jako pojedyncza metoda identyfikacji wad i uszkodzeń [122-124].

2.3. Stanowiska i systemy testowe opracowane w literaturze

Koncepcje oraz prototypy stanowisk do testowania silników elektrycznych dostępne w literaturze, często dotyczą stanowisk do wyznaczania ich charakterystyk elektromechanicznych, najczęściej na podstawie pomiarów prądów i napięć fazowych [133-144]. Rzadziej stosowane są układy, które wykorzystują czujniki momentu do określenia charakterystyki silnika [145, 146]. Pomimo tego, że charakterystyka elektromechaniczna silnika będzie ulegała zmianie proporcjonalnie do powstałych uszkodzeń, wymienione stanowiska testowe raczej nie są systemami dedykowanymi do diagnostyki silników. Mogą być jedynie systemami pozwalającymi na zgrubne i bardzo ogólne oszacowanie stanu technicznego silnika. Stanowiska te zazwyczaj nie posiadają precyzyjnych układów pomiarowych oraz w znacznej większości przypadków nie są przystosowane do silników małej mocy. Stanowiska prezentowane jako systemy diagnostyczne bardzo często bazują również na pomiarach prądów [147, 148], rzadziej na pomiarach drgań [145, 146]. Występują również stanowiska przeznaczone do badań zmęczeniowych [149, 150]. Wspólną cechą wszystkich systemów diagnostycznych jest pomiar i analiza prądów stojana oraz prowadzenie testów pod obciążeniem. Rozwiązanie to jest zgodne z podejściem prezentowanym przez normę ISO-20958. Z tego względu nie jest wymagane zastosowanie specjalnego sposobu montażu silnika do stanowiska, kluczowego w prowadzeniu pomiarów drgań i hałasu. Stanowi to w przypadku prowadzenia prób pod obciążeniem duże ułatwienie w projektowaniu tego typu stanowisk. W kontekście testowania poprodukcyjnego/odbiorczego jakość wykonania silnika (szczególnie silników specjalnego przeznaczenia o niskim poziomie emitowanego hałasu) jest głównie determinowana przez jego parametry wibroakustyczne. Stąd zastosowanie tylko pomiarów i analiz parametrów elektrycznych może nie być wystarczające.

2.4. Podsumowanie metod diagnozowania silników elektrycznych

Ze względu na budowę i sposób działania asynchronicznych silników elektrycznych, diagnostyka tych obiektów może być prowadzona na podstawie pomiarów elektrycznych (pomiar prądów, napięć i mocy), magnetycznych oraz mechanicznych (pomiar drgań i hałasu, pomiar termiczne) z zastosowaniem różnych metod i technik przetwarzania sygnałów. Większość pomiarów może być realizowana w sposób nieinwazyjny tzn. nie wymagający ingerencji w konstrukcję silnika oraz montażu czujników bezpośrednio na obudowie, co stanowi niewątpliwą zaletę. Pomiar i analizy parametrów elektrycznych silnika wymagają zastosowania aparatury umożliwiającej rejestrację prądów i napięć zasilających

silnik. Wady i uszkodzenia powstałe w wyniku niedoskonałości procesów produkcyjnych lub eksploatacji silnika takie jak: wady i uszkodzenia łożyskowania, niecentryczność, niewyważenie, wady i uszkodzenia uzwojeń i przyłączy zasilających, mogą być wykrywane tą metodą nawet we wczesnych stadiach rozwoju. Niestety same pomiary elektryczne nie będą pomocne w wyznaczeniu stopnia jakości wykonania silnika, co jest możliwe z zastosowaniem pomiaru drgań czy hałasu. Metody magnetyczne również pozwalają na detekcję szerokiego spektrum wad i uszkodzeń, podobnie jak w przypadku pomiarów elektrycznych. Wynika to z bezpośredniego powiązania strumienia magnetycznego generowanego w trakcie pracy silnika i prądu zasilającego uzwojenia stojana. Podobnie jak w przypadku pomiarów drgań niezbędny jest jednak bezpośredni dostęp do badanego obiektu, co nie jest wymagane w przypadku pomiaru i analiz prądów czy mocy. W ramach diagnostyki poprodukcyjnej nie stanowi to dużego problemu, natomiast w diagnostyce eksploatacyjnej dostęp bezpośredni jest niekiedy utrudniony. Diagnostyka silników z użyciem pomiarów hałasu realizowana na halach produkcyjnych lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie może nie być efektywna ze względu na wysokie poziomy tła akustycznego. Jednak zarówno hałas jak i drgania są podstawą do tworzenia symptomów pozwalających na określenie jakości wykonania silnika pod kątem np. cichobieżności. Do zgrubnej oceny stanu technicznego silnika mogą posłużyć metody termograficzne - jednak nie są one na tyle precyzyjne, aby jednoznacznie stwierdzić powstawanie konkretnych wad i uszkodzeń, szczególnie we wczesnych etapach ich rozwoju. Ponadto bazują one na zjawiskach termalnych, które w swej naturze są procesami semistatycznymi, zatem raczej nie będą one adekwatne do prowadzenia szybkiego testowania silników np. na linii produkcyjnej.

Ze względu na powyższe cechy (zalety, ograniczenia i wady badań diagnostycznych zestawionych w Tab. 2.3) należałoby rozważyć prowadzenie testowania odbiorczego silników asynchronicznych w sposób wielowariantowy w oparciu o wiele sygnałów.

Tab. 2.3. Porównanie metod diagnozowania asynchronicznych silników elektrycznych pod kątem zalet i wad.

rodzaj pomiaru/analizy	zalety	wady
pomiary i analizy wielkości elektrycznych	<ul style="list-style-type: none"> - pomiar bezinwazyjny - nie wymaga bezpośredniego dostępu do badanego obiektu - szerokie spektrum identyfikacji wad i uszkodzeń, zarówno części mechanicznej jak i elektromagnetycznej silnika - szeroki zakres możliwych do zastosowania metod i technik przetwarzania sygnałów 	<ul style="list-style-type: none"> - brak możliwości oceny silnika pod kątem ogólnej jakości wykonania
pomiary i analizy pola magnetycznego	<ul style="list-style-type: none"> - pomiar bezinwazyjny - szerokie spektrum identyfikacji wad i uszkodzeń, zarówno części mechanicznej jak i elektromagnetycznej silnika - szeroki zakres możliwych do zastosowania metod i technik przetwarzania sygnałów 	<ul style="list-style-type: none"> - wymaga bezpośredniego dostępu do badanego obiektu - brak możliwości oceny silnika pod kątem ogólnej jakości wykonania - informatywność sygnału uzależniona jest od lokalizacji przetwornika pola magnetycznego - konieczne jest mapowanie pola magnetycznego wokół silnika (aura magnetyczna)
pomiary i analizy drgań	<ul style="list-style-type: none"> - szerokie spektrum identyfikacji wad i uszkodzeń, zarówno części mechanicznej jak i elektromagnetycznej silnika - szeroki zakres możliwych do zastosowania metod i technik przetwarzania sygnałów - możliwa ocena jakości wykonania silnika 	<ul style="list-style-type: none"> - wynik pomiaru jest uzależniony od lokalizacji i sposobu mocowania przetwornika drgań na korpusie silnika - wymagany bezpośredni dostęp do obiektu - sposób posadowienia/montażu silnika może mieć istotny wpływ na wyniki pomiarów
pomiary i analizy hałasu	<ul style="list-style-type: none"> - pomiar nieinwazyjny - szerokie spektrum identyfikacji wad i uszkodzeń, zarówno części mechanicznej jak i elektromagnetycznej silnika - szeroki zakres możliwych do zastosowania metod i technik przetwarzania sygnałów - możliwa ocena jakości wykonania silnika 	<ul style="list-style-type: none"> - wymagany bezpośredni dostęp do obiektu - wysoki wpływ tła akustycznego na wynik pomiaru (wymagana jest jak najlepsza izolacja akustyczna obiektu od hałasu otoczenia)
pomiary i analizy temperatury	<ul style="list-style-type: none"> - pomiar nieinwazyjny - wyniki łatwe w interpretacji (rozkład gradientu temperatur korpusu silnika) 	<ul style="list-style-type: none"> - niska dokładność - wysoki wpływ otoczenia i parametrów rejestracji obrazów termicznych na wyniki - procesy semistatyczne

W niniejszym rozdziale opisano metody diagnozowania ASE stosowane najczęściej. Ponadto do detekcji i identyfikacji wad i uszkodzeń silników na podstawie sygnałów diagnostycznych stosowane są takie metody jak:

- transformata Hilberta i Hilberta-Huanga [184, 185],
- analizy bazujące na składowej $2f_s$ widma drgań [186],
- analiza obwiedni transformacji Hilberta [187],
- widma wyższego rzędu [188],
- analizy napięć indukowanych w uzwojeniach stojana po odłączeniu silnika od sieci elektrycznej [189].

Jednak metody te nie znalazły szerszego zastosowania w diagnozowaniu asynchronicznych silników elektrycznych.

3. PROPONOWANA METODYKA TESTOWANIA ASE

3.1. Symptomy diagnostyczne i metody testowania

W ramach niniejszej pracy zaproponowano i opracowano metodykę testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych, obejmujący sposób pozyskiwania sygnałów diagnostycznych, metody testowania, symptomy diagnostyczne, warunki prowadzenia testów oraz sposoby identyfikacji wad produkcyjnych oraz klasyfikacji silników (Tab. 3.1). Prezentowana nowa metodyka testowania odbiorczego i ocena stanu technicznego silnika oparta jest głównie na niskoenergetycznych składowych rejestrowanych sygnałów diagnostycznych związanych z parametrami funkcjonalnymi: częstotliwość obrotowa f_o , częstotliwość sieci zasilającej f_s poślizg s , prądy fazowe i_{L1} , i_{L2} oraz i_{L3} oraz procesami resztkowymi takimi jak: drgania, hałas, pole magnetyczne. Tryb pracy silnika podczas testowania jest zgodny z określonymi w normie PN-EN IEC 60034 warunkami prowadzenia testów typu *final tests* (prowadzenie pomiarów na biegu jałowym, bez obciążenia) [28]. W takim trybie prowadzenia testów jedyny możliwy sposób obciążenia silnika to obciążenie grawitacyjne np. przez ciężar wirnika (również poprzez pionowe położenie jego osi obrotu). Z tego powodu informatywne składowe (związane z wadami) pojawiające się w sygnale lub widmie wybranego sygnału diagnostycznego mogą się charakteryzować niską energią lub nieznacznymi zmianami w ujęciu amplitudowym. Może to powodować problemy z ich detekcją i identyfikacją zarówno w kontekście amplitud jak i częstotliwości. Aby sygnały mogły charakteryzować się jak najlepszym stosunkiem sygnału użytecznego do szumu (SNR) niezbędne jest również prowadzenie badań w specjalnych warunkach. Pomieszczenie, w którym wykonywane są testy lub stanowisko testowe powinny być w jak największym stopniu odizolowane od zakłóceń zewnętrznych tj. drgania i hałas powodowane przez inne maszyny w bezpośrednim sąsiedztwie stanowiska testowego. Aparatura pomiarowa powinna cechować się jak najmniejszym poziomem szumów własnych, a metody i techniki przetwarzania sygnałów powinny pozwolić na wyznaczenie pożądanego symptomów diagnostycznych z bardzo wysoką precyzją. Z uwagi na brak obciążenia zdecydowaną zaletą tego typu testów jest brak konieczności sprzęgania silnika z odbiornikiem energii mechanicznej, co mogłoby skutkować dodatkowymi zakłóceniami. Dzięki temu możliwe jest uniknięcie

zarejestrowania w sygnałach składowych nie pochodzących bezpośrednio od testowanego obiektu - silnika, mogących zarówno wpływać na składowe charakterystyczne dla badanego obiektu, jak również wprowadzać zakłócenia w rejestrowanych sygnałach [31].

Tab. 3.1. Obszar działań związany z opracowaniem proponowanej metodyki testowania odbiorczego ASE.

obszar	cechy i zakres zadań
symptomy diagnostyczne i metody testowania	<p>zastosowanie głównie niskoenergetycznych składowych sygnałów związanych z parametrami funkcjonalnymi oraz procesami resztkowymi, odzwierciedlających jakość wykonania silnika.</p> <p>ZADANIA:</p> <ul style="list-style-type: none"> - opracowanie nowych metod przetwarzania sygnałów i pozyskiwania symptomów, - zdefiniowanie symptomów i wartości kryterialnych, - określanie wrażliwości symptomów na warunki przeprowadzania testu.
warunki prowadzenia testów i badań	<ul style="list-style-type: none"> - współbieżne prowadzenie testów, - optymalizacja lokalizacji punktów pomiarowych z przyjętym kryterium uzyskania największej informatywności lokalnej i globalnej), - zastosowanie macierzy czujników i synchroniczna wielokanałowa rejestracja sygnałów diagnostycznych z tzw. pola zjawiskowego, - zdefiniowanie warunków i wariantów prowadzenia testów: <ul style="list-style-type: none"> - obciążenie, - sposób zasilania, - czas trwania testu, - stany ustalone i nieustalone. - opracowanie założeń do budowy zintegrowanego stanowiska badawczego,
weryfikacja i walidacja metod testowania	<p>wykonana na podstawie eksperymentu czynnego prowadzonego na silniku badawczym oraz grupie silników produkowanych seryjnie (bez wad) oraz silniku testowym z możliwością wprowadzania wybranych wad produkcyjnych.</p>
detekcja wad	<p>próba identyfikacji wad produkcyjnych na podstawie wyników parametryzacji analiz pozyskanych sygnałów diagnostycznych</p>

Niezmiernie istotnym jest również określenie wrażliwości wielkości i miar sygnałów diagnostycznych na wady produkcyjne. Jako symptomy stanu technicznego powinny one wykazywać się jak najwyższą wrażliwością na pojawienie się wad (właściwości detekcyjne) oraz współzmienniczością z rozmiarem lub stopniem rozwoju uszkodzenia lub wady oszacowaną w ujęciu ilościowym i/lub jakościowym. Ważnym aspektem jest sprawdzenie wrażliwości symptomów diagnostycznych, miar i wielkości pomiarowych na warunki prowadzenia testów tj. sposób montażu obiektu na stanowisku badawczym, sposób zasilania silnika, wpływ obciążenia oraz zakłócenia zewnętrzne. Kluczowy jest również dobór odpowiednich technik/metod przetwarzania sygnałów. W ramach niniejszej pracy

zaproponowano metodę opartą o klasyczną analizę widmową sygnałów, separację widmową składowych oraz technikę uśredniania multisynchronicznego MSA (ang. *Multisynchronous Averaging*) sygnałów resztkowych [158]. Dobór technik i metod przetwarzania sygnałów był ukierunkowany na uzyskanie wyników pozwalających na ocenę jakości wykonania silników w kontekście mechanicznym jak i elektromagnetycznym, a także w pewnym zakresie na detekcję i wartościowanie wad produkcyjnych. Po dokonaniu oceny wykonania silnika dysponując dużą liczbą obiektów (silników) tego samego typu uzasadnione byłoby określenie wartości progowych podstawowej (dwustanowej - dobry/wadliwy) lub rozszerzonej klasyfikacji. W tym celu byłoby uzasadnione zastosowanie metod sztucznej inteligencji - sieci neuronowych, logiki rozmytej, drzew decyzyjnych. Wartości kryterialne niezbędne do sklasyfikowania silnika w odpowiedniej grupie powinny zostać określone na podstawie eksperymentu bierno-czynnego [182] przy ścisłej współpracy z producentem silników oraz zastosowaniu jak największej grupy wcześniej przebadanych i sklasyfikowanych wcześniej silników i (o ile to możliwe) zidentyfikowanymi alternatywnymi metodami wadami (zestaw danych uczących).

3.2. Wpływ warunków prowadzenia testów

Warunki prowadzenia testów mogą istotnie wpływać na wyniki pomiarów. Dobór warunków testowania nowych silników powinien być warunkowany uzyskaniem jak największej ilości informacji użytecznych w aspekcie diagnostycznym w rejestrowanym sygnałach i jak najmniejszą zawartością składowych nie związanych z testowanym obiektem tj. szumy własne układów pomiarowych, zakłócenia pochodzące z otoczenia np. hałas i drgania generowane na hali produkcyjnej, artefaktów itp. Dane diagnostyczne pozyskiwane podczas testowania silników w możliwie najlepszych (optymalnych) warunkach będą przyczyniały się w dużej mierze do jednoznacznego sklasyfikowania silników do odpowiedniej grupy.

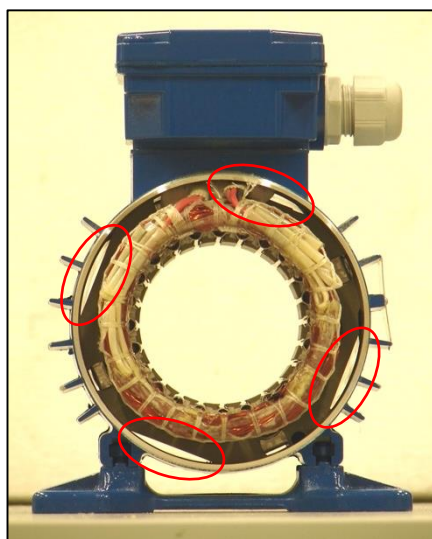
W ramach pracy sprawdzono wpływy poszczególnych czynników/warunków prowadzenia testów na wyniki przeprowadzonych pomiarów i analiz:

- lokalizacja przetwornika drgań oraz mikrofonu (analiza informatywności globalnej i lokalnej sygnałów drganiowych i hałasu),
- sposób montażu/posadowienia silnika w trakcie testów,
- sposób zasilania silnika w trakcie testów,
- wpływ wprowadzenia obciążenia testowego,

- sposób prowadzenia rejestracji (zastosowanie takich stanów pracy silnika jak: rozruch, praca ustalona, wybieg).

WPLYW LOKALIZACJI PRZETWORNIKÓW

Wnętrza korpusów silnikowych nie są przestrzeniami jednorodnymi, tzn. nie posiadają jednolitej konstrukcji. Wewnątrz korpusu znajdują się uzwojenia oraz inne elementy montażowe, które w zależności od materiału, lokalizacji oraz powierzchni kontaktu z korpusem, będą miały wpływ na postacie częstotliwości drgań własnych korpusu i tarcz łożyskowych.



Rys. 3.1. Widok wnętrza silnika asynchronicznego po zdjęciu przedniej i tylnej tarczy łożyskowej.

Na rysunku 3.1 przedstawiono widok wnętrza silnika po demontażu wirnika oraz przedniej i tylnej tarczy łożyskowej. Widoczne przerwy w konstrukcji korpusu zaznaczone kolorem czerwonym mogą być hipotetycznymi obszarami generacji drgań o większych amplitudach lub hałasu niż miejsca zespolone na stałe z uzwojonym rdzeniem. Również elementy obudowy silnika znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie łożysk tj. oprawy czy podpór łożyskowych mogą być miejscami wykazującymi się wyższą wibroaktywności. Uzasadnione będzie zatem sprawdzenie informatywności sygnałów diagnostycznych w kontekście globalnym (stosunek mocy sygnału użytecznego diagnostycznie do całkowitej mocy sygnału) oraz lokalnym (stosunek mocy składowych sygnału powiązanego ze zjawiskiem lub elementem/podzespołem silnika do całkowitej mocy sygnału) przynajmniej w kluczowych lub preferowanych miejscach i kierunkach pomiarowych [125].

WPLYW SPOSÓB MONTAŻU/POSADOWIENIA SILNIKA

Jak opisano w rozdziale 2.2.1.1. dotyczącym pomiarów mechanicznych wykonywanych zgodnie z normą PN-EN IEC 60034-14 sposób montażu/posadowienia silnika

na stanowisku testowym ma duże znaczenie. Norma zaleca dwa rodzaje montażu: sprężysty oraz sztywny. W żadnym z tych przypadków częstotliwości drgań własnych układu silnik-stanowisko testowe nie powinny pokrywać się z charakterystycznymi składowymi towarzyszącymi pracy silnika tj. składowej obrotowej f_o oraz składowej sieciowej f_s [29]. Rezonanse stanowiska testowego w tych zakresach częstotliwości mogłyby spowodować lokalne wzmocnienia składowych sygnałów lub globalny wzrost wartości mierzonych parametrów diagnostycznych mogących wpłynąć na trafność klasyfikacji i kwalifikacji silników. Z punktu widzenia producenta błędna kwalifikacja lub małą wiarygodność określenia jakości wykonania silnika nie jest dopuszczalna.

WPLYW SPOSOBU ZASILANIA SILNIKA

Trójfazowe silniki asynchroniczne mogą być połączone z siecią elektryczną w trzech układach pracy w zależności od przeznaczenia: bezpośrednio przyłączenie do sieci trójfazowej, podłączenie do sieci jednofazowej (z kondensatorem pracy lub układem rozruchowym) oraz przyłączenie do sieci z możliwością regulacji prędkości obrotowej przy pomocy falownika. Połączenie z siecią trójfazową w sposób bezpośredni w topologii uzwojeń stojana typu gwiazda czy trójkąt będzie gwarantowało osiągnięcie możliwie najlepszych parametrów (m.in. sprawności), a także niezawodnej pracy. W przypadku zasilania jednofazowego mamy do czynienia ze znacznym spadkiem nominalnych parametrów pracy silnika oraz efektem nadmiernego nagrzewania się silnika [126]. Przemienne częstotliwości, zwane również falownikami, są stosowane w celu sterowania prędkością obrotową silników elektrycznych przy pomocy zmiany częstotliwości prądu zasilającego. Charakter pracy falownika jest impulsowy (regulacja PWM⁶) co nie pozostaje bez wpływu na charakterystykę pracy silników elektrycznych [5, 13, 127-130].

WPLYW OBCIĄŻENIA TESTOWEGO

Istotne jest rozważenie wpływu obciążania silnika w trakcie prowadzenia testów. Normy nie deklarują jednoznacznie tego zagadnienia. Pomiar drgań i hałasu powinny być wykonywane w większości przypadków na biegu jałowym (prowadzenie testów pod obciążeniem jest uzależnione od wymagań klienta/odbiorcy). Testowanie bez obciążenia przyczyni się do tego, że otrzymane wyniki będą wskazywać na stan techniczny badanego obiektu i nie będą obciążone oddziaływaniem układu obciążającego. Natomiast wprowadzenie obciążenia testowego może ułatwić identyfikację składowych sygnałów związanych

⁶ PWM (ang. *Pulse Width Modulation*) - modulacja szerokości impulsu sterującego

z niektórymi wadami i uszkodzeniami podczas testów elektrycznych i elektromagnetycznych [29, 31]. Testy prowadzone pod obciążeniem są głównie wykonywane do określenia strat oraz sprawności silników [28, 131]. Nie jest jednak niezbędne wykonywanie tego typu badań dla wszystkich egzemplarzy produkowanego typu silnika. Zwykle tego typu testy prowadzi się na reprezentatywnej grupie egzemplarzy w celu deklarowania przez producenta wybranych parametrów silnika.

WPLYW STANU/REŻIMU PRACY

Warto zauważyć, że praca silnika nie wiąże się tylko z pracą ustaloną. Oprócz stanów ustalonych można wyróżnić także stany nieustalone m.in. rozruch, hamowanie (wybieg), zmiana obciążenia, prędkości obrotowej czy parametrów zasilania. W każdym z tych stanów będzie występować intensyfikacja innej natury zjawisk. W trakcie rozruchu silnika asynchronicznego będzie występował wzrost prądu zasilającego (niekiedy nawet 5-8 krotnie). W tym momencie nastąpi zwiększenie udziału energetycznego składowych sygnałów oraz informatywności sygnałów związanych ze zjawiskami elektromagnetycznymi w porównaniu ze zjawiskami natury mechanicznej. W fazie pracy ustalonej stosunek informatywności ww. sygnałów będzie stały, natomiast po odłączeniu zasilania podczas wybiegu silnika można pozyskać informacje dotyczące tylko układu mechanicznego (np. oddziaływań dynamicznych). Prowadzenie testów z uwzględnieniem stanów/reżimów pracy może być pomocne w jednoznacznym określeniu stanu technicznego części elektromagnetycznej i mechanicznej silników asynchronicznych [4, 132].

4. METODYKA TESTOWANIA ASE - WYBRANE METODY I TECHNIKI PRZETWARZANIA I ANALIZOWANIA SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH

4.1. Dekompozycja multisynchroniczna (MSA) jako narzędzie diagnostyczne

W pracy jako jedną z metod parametryzacji sygnałów WA, która ma być zaimplementowana do testowania odbiorczego ASE zaproponowano metodę dekompozycji multisynchronicznej. Umożliwia ona wyodrębnianie z sygnału diagnostycznego składowych związanych (synchronicznych) ze zjawiskami natury mechanicznej, elektrycznej oraz określenie udziału energetycznego składowych niesynchronicznych oraz szumu. Technika uśredniania multisynchronicznego MSA (ang. *Multisynchronous Averaging*) bazuje na klasycznym uśrednianiu synchronicznym sygnału w dziedzinie czasu TSA (ang. *Time Synchronous Averaging*), w którym wykorzystywany jest jeden sygnał synchronizujący proces uśredniania. Procedura TSA polega na uśrednieniu odpowiednio długiej sekwencji sygnału po aktywacji np. sygnałem tachometrycznym. Tworzenie sygnału uśrednionego synchronicznie $\bar{x}(t)$ z sygnału wyjściowego $x(t)$ wymaga zastosowania sygnału synchronizującego o częstotliwości f_{tach} . Operację tę można wyrazić jako splot funkcji w postaci [35, 151]:

$$\bar{x}(t) = x(t) * g(t), \quad (4.1)$$

gdzie $g(t)$ definiuje się jako ciąg N impulsów synchronizujących o okresie występowania $T_{sync} = 1/f_{sync}$:

$$g(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(t + kT_{sync}). \quad (4.2)$$

Operację 4.1 można również zapisać jako iloczyn transformat Fouriere'a tych sygnałów:

$$\bar{X}(f) = X(f) \cdot G(f), \quad (4.3)$$

gdzie $G(f)$ przyjmuje formę filtru grzebieniowego o charakterystyce definiowanej zależnością:

$$G(f) = \frac{1}{N} \frac{\sin(\pi N T_{sync} f)}{\sin(\pi T_{sync} f)}. \quad (4.4)$$

Zwiększenie ilości sekwencji uśredniania synchronicznego N powoduje zwężenie pasma przepustowego filtru grzebieniowego i lepsze uśrednianie składowych synchronicznych z f_{sync} oraz zmniejszenie udziału energetycznego składowych w pasmach zaporowych. Przy odpowiednio dużej ilości sekwencji uśredniania N możliwe jest zredukowanie składu widmowego sygnału do składowych tylko synchronicznych z sygnałem synchronizującym f_{sync} [151-153]. Do tej pory metodę uśredniania synchronicznego z powodzeniem stosowano m.in. do analizy drgań przekładni zębatych [154-157], detekcji uszkodzeń łożysk tocznych [151], a także próbowano zaaplikować w diagnostyce silników elektrycznych [158-160].

Technika MSA natomiast umożliwia simultaneousne, wielowątkowe dekomponowanie sygnału poliokresowego (np. drgań lub hałasu) na sygnały monookresowe poliharmoniczne, zsynchronizowane z użytymi w procesie dekompozycji wieloma sygnałami synchronizującymi. W kontekście silników elektrycznych, pozyskane sygnały diagnostyczne mogą zostać zdekomponowane na sygnały bezpośrednio związane ze zjawiskami natury mechanicznej (synchronizacja z częstotliwością obrotową f_o - sygnał tachometryczny) oraz zjawiskami natury elektromagnetycznej (synchronizacja z częstotliwością sieci zasilającej f_s). Uproszczony schemat procesu dekompozycji multisynchronicznej przedstawiono na rysunku 4.1 [161, 162].

Sygnał diagnostyczny (wibroakustyczny: drgania, hałas) rejestrowany w otoczeniu silnika elektrycznego można interpretować jako superpozycję sygnałów związanych ze zjawiskami mechanicznymi (synchronicznymi z f_o), elektromagnetycznymi (synchronicznymi z f_s), składowymi niesynchronicznymi f_o i f_s oraz szumem (sygnał rezydualny). Zatem zgodnie z tym założeniem sygnał przyspieszeń drgań przyjmuje można zapisać jako:

$$a(t) = a^M(t) + a^E(t) + a^R(t), \quad (4.5)$$

gdzie: $a(t)$ – rejestrowany sygnał przyspieszeń drgań,

$a^M(t)$ – składowe sygnału synchroniczne z f_o ,

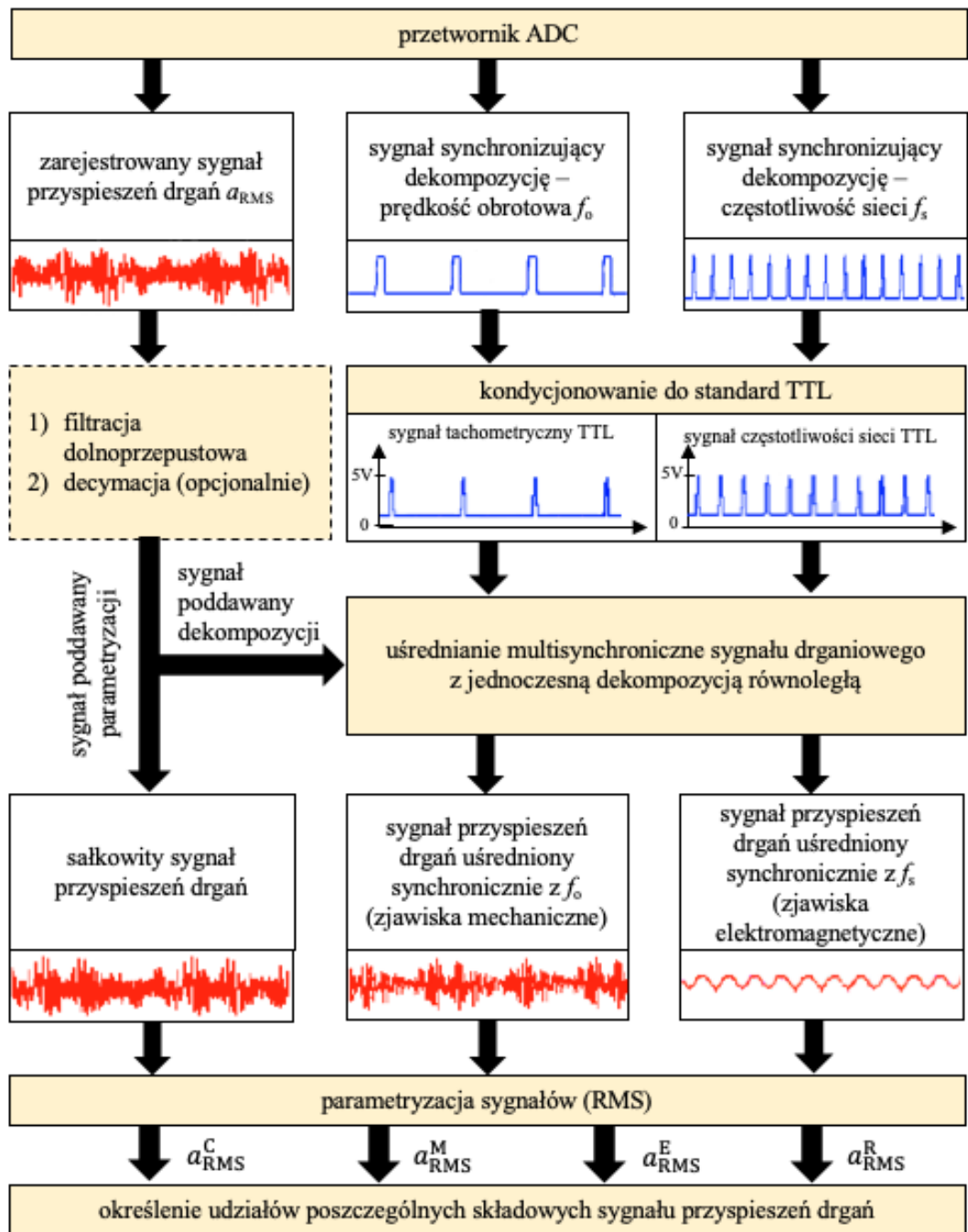
$a^E(t)$ – składowe sygnału synchroniczne z f_s ,

$a^R(t)$ – składowe niesynchroniczne z f_s i f_o oraz szum.

Sygnał $a(t)$ poddany dyskretyzacji można zapisać w formie szeregów czasowych:

$$a_i = a_i^M + a_i^E + a_i^R, \quad (4.6)$$

gdzie: i – numer kolejnej próbki szeregu czasowego.



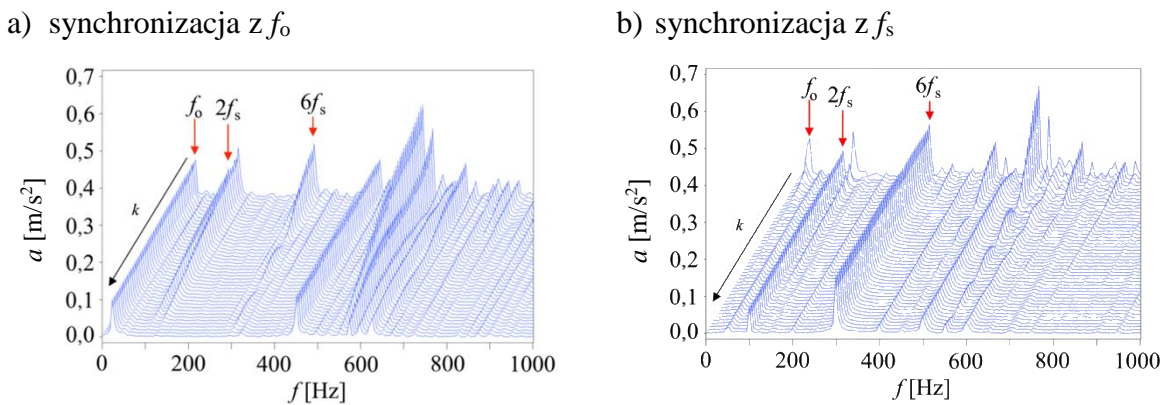
Rys. 4.1. Uproszczony schemat procesu uśredniania multisynchronicznego (MSA) zastosowanego przykładowo do dekompozycji sygnału przyspieszeń drgań a_{RMS} rejestrowanego na obudowie ASE [162].

Z kolei sygnały a_i^M oraz a_i^E po uśrednieniu synchronicznym przyjmują postać składowych \bar{a}_j^M i \bar{a}_j^E , jako szeregów czasowych o skończonej ilości próbek $j = 0, 1, \dots, N-1$:

$$\bar{a}_j^M = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_{k,j}^M ; \bar{a}_j^E = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_{k,j}^E , \quad (4.7)$$

gdzie: k – kolejny numer sekwencji uśredniania ($k = 1, 2, \dots, K$),
 j – numer próbki w danej sekwencji uśredniania ($j = 0, 1, \dots, N - 1$),
 N – liczba próbek poddanych uśrednieniu w danej sekwencji.

Przykładowy proces uśredniania synchronicznego (dekompozycji sygnału drganiowego) na składowe synchroniczne z częstotliwością obrotową f_o oraz częstotliwością sieci f_s przedstawiono na rysunku 4.2. Dla lepszego zilustrowania składowych synchronicznych z f_o (Rys. 4.2a) oraz synchronicznych z f_s (Rys. 4.2b) proces taki przedstawiono w postaci widm kaskadowych, w których każde kolejne widmo zostało wykonane po k uśrednieniach sygnału.



Rys. 4.2. Zmiany w składzie widmowym uśrednionego synchronicznie sygnału przyspieszeń drgań (k - kolejne sekwencje uśredniania multisynchronicznego).

Podstawową parametryzację sygnałów w postaci dyskretnej (szeregów czasowych): wyjściowego a_i oraz uzyskanych w wyniku uśredniania synchronicznego \bar{a}^M i \bar{a}^E można w pierwszym podejściu ograniczyć do wyznaczenia wartości skutecznych (RMS):

$$a_{\text{RMS}}^C = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} a_i^2}, \quad (4.8)$$

$$a_{\text{RMS}}^M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (\bar{a}_j^M)^2}, \quad (4.9)$$

$$a_{\text{RMS}}^E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (\bar{a}_j^E)^2}, \quad (4.10)$$

gdzie: a_i – postać dyskretna sygnału wejściowego,
 \bar{a}^M – postać dyskretna sygnału uśrednionego synchronicznie (synchronizacja z f_o),
 \bar{a}^E – postać dyskretna sygnału uśrednionego synchronicznie (synchronizacja z f_s)
 L – całkowita liczba próbek sygnału poddawana dekompozycji ($L \geq N \cdot K$),
 N – liczba próbek w sygnale,
 K – całkowita liczba sekwencji uśredniania.

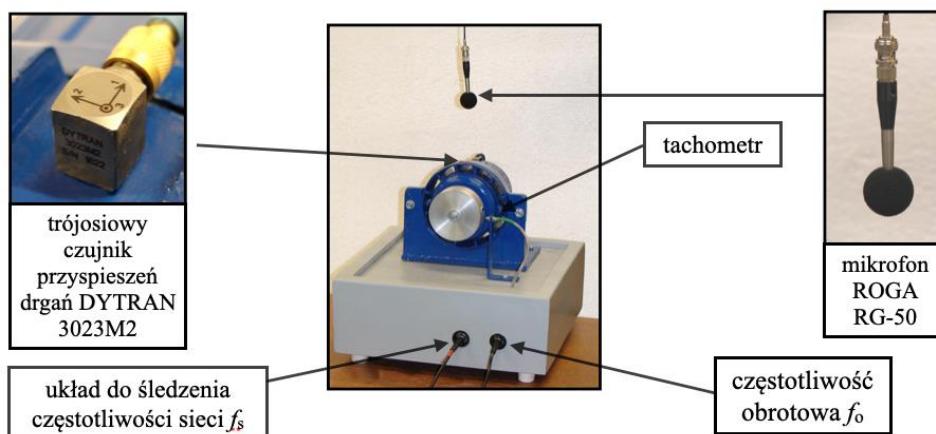
Wartość skuteczną sygnału rezydualnego (nie będącego synchronicznym z f_o oraz z f_s oraz szumu) można obliczyć zgodnie ze wzorem:

$$a_{\text{RMS}}^{\text{R}} \cong \sqrt{(a_{\text{RMS}}^{\text{C}})^2 - (a_{\text{RMS}}^{\text{M}})^2 - (a_{\text{RMS}}^{\text{E}})^2}. \quad (4.11)$$

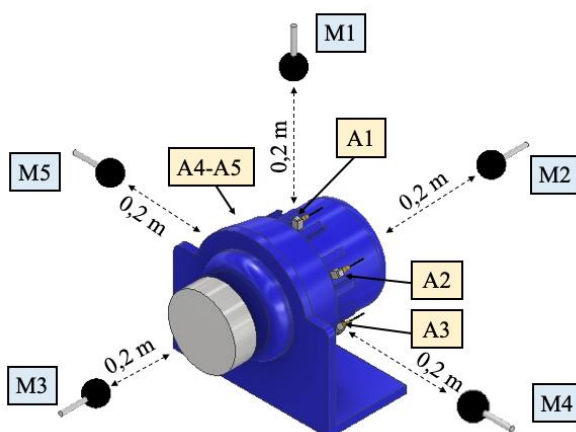
Mając powyższe na uwadze dekompozycja sygnału drganiowego na składowe związane ze zjawiskami natury mechanicznej, elektromagnetycznej oraz pozostały sygnał resztkowy (rezydualny) i wyznaczone z nich wartości skuteczne stanowią podstawę do przeprowadzenia analizy informatywności globalnej i lokalnej [125, 158, 161, 162].

4.2. Analiza informatywności sygnałów wibroakustycznych

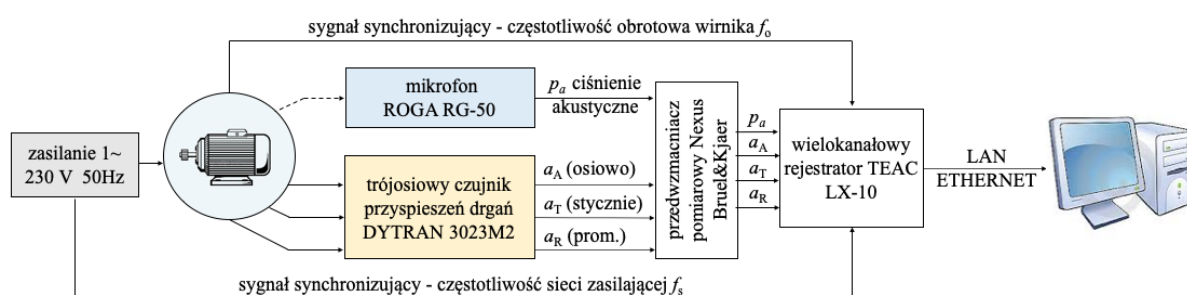
Jak wspomniano w rozdziale 3 wybór punktów i kierunków pomiaru/rejestracji sygnałów wibroakustycznych powinien być poprzedzony analizą informatywności. Jako docelowe powinno się wyznaczyć miejsca na silniku (np. korpusie, tarczach łożyskowych) charakteryzujących się jak największym stosunkiem sygnału niosącego informację diagnostyczną, do szumów lub największym udziałem energetycznym sygnału użytecznego w odniesieniu do całkowitej energii sygnału. Dobór miejsca pozyskiwania sygnałów diagnostycznych z obiektu jest jednym z kluczowych aspektów, które należy brać pod uwagę na etapie opracowywania systemu pomiarowego stosowanego do testowania ASE. Pierwsze badania w tym zakresie przeprowadzono z użyciem jednofazowego asynchronicznego silnika elektrycznego ASE-1F. Silnik zamontowany był sztywno na betonowej podstawie. Pomiar drgań realizowano przy pomocy trójosiowego przetwornika przyspieszeń DYTRAN 3023M2. Zastosowanie przetwornika trójosiowego umożliwiło jednoczesną rejestrację w trzech kierunkach: stycznym, promieniowym i osiowym. Przetwornik zamontowano na korpusie silnika w 6 reprezentatywnych punktach. Natomiast hałas rejestrowano w 5 punktach pomiarowych rozmieszczonych w przestrzeni pomiarowej wokół silnika 200 mm od jego korpusu. Hałas rejestrowano przy pomocy mikrofonu ROGA RG-50. Lokalizację punktów rejestracji drgań i hałasu przedstawiono na rysunkach 4.3 i 4.4.



Rys. 4.3. Stanowisko badawcze, przetwornik przyspieszeń drgań, mikrofon oraz wyjścia sygnałów synchronizujących MSA.



Rys. 4.4. Lokalizacja punktów pomiaru drgań i hałasu jednofazowego silnika elektrycznego ASE-1F (M1-M5 - lokalizacje mikrofonu, A1-A6 - lokalizacje (miejsca zamocowania) przetwornika przyspieszeń drgań).



Rys. 4.5. Uproszczony schemat toru pomiarowego zastosowanego w badaniach ASE-1F [179].

W ramach badań określono informatywność globalną i lokalną dla poszczególnych lokalizacji odbioru sygnałów wibroakustycznych z silnika ASE-1F. Ogólnie informatywność globalna jest definiowana jako stosunek mocy składowych użytecznych diagnostycznie (w rozpatrywanym przypadku ograniczono je do wszystkich składowych okresowych badanego sygnału) do całkowitej mocy tego sygnału [125]:

$$I_G = \frac{P_U}{P_C} = \frac{P_O}{P_C}, \quad (4.12)$$

gdzie: P_U – moc sygnałów użytecznych diagnostycznie,

P_C – moc całkowita sygnału,

P_O – zsumowana moc sygnałów okresowych, zarówno mono jak i poliharmonicznych.

W analizowanym przypadku sygnałów wibroakustycznych generowanych przez ASE-1F P_o można wyrazić wzorem:

$$P_o = P_M + P_E, \quad (4.13)$$

gdzie: P_M – moc sygnału uśrednionego synchronicznie związanego ze zjawiskami natury mechanicznej - synchronizacja z f_o ,

P_E – moc sygnału uśrednionego synchronicznie związanego ze zjawiskami natury elektromagnetycznej - synchronizacja z f_s .

Zatem zależność 4.12 można zapisać jako:

$$I_G = \frac{P_M + P_E}{P_C}. \quad (4.14)$$

Biorąc pod uwagę przyspieszenia drgań $a(t)$, to w ujęciu wartości skutecznych wzór 4.14 przyjmie formę [4]:

$$I_G = \frac{(a_{RMS}^M)^2 + (a_{RMS}^E)^2}{(a_{RMS}^C)^2}, \quad (4.15)$$

gdzie: a_{RMS}^M , a_{RMS}^E , a_{RMS}^C – wartości skuteczne przyspieszeń drgań odpowiednio: sygnału uśrednionego synchronicznie z f_o (zjawiska natury mechanicznej „M”), sygnału uśrednionego synchronicznie z f_s (zjawiska natury elektromagnetycznej „E”), sygnału wejściowego (nie poddanego uśrednianiu synchronicznemu).

Natomiast informatywność lokalna I_L sygnału jest definiowana jako stosunek mocy wyodrębnionego i -tego sygnału poliharmonicznego (poliharmoniki) uzyskanego w wyniku uśredniania synchronicznego do całkowitej mocy rejestrowanego sygnału [125, 161]:

$$I_{L,i} = \frac{P_{Ui}}{P_C} = \frac{P_{Oi}}{P_C}, \quad (4.16)$$

gdzie: P_{Oi} – moc wyodrębnionego metodą TSA i -tego sygnału poliharmonicznego.

Informatywność lokalną sygnałów związanych ze zjawiskami natury mechanicznej $I_{L,M}$ i elektromagnetycznej $I_{L,E}$ można wyrazić wzorami:

$$I_{L,M} = \frac{P_M}{P_C}, \quad (4.17)$$

$$I_{L,E} = \frac{P_E}{P_C}, \quad (4.18)$$

lub w ujęciu wartości skutecznych sygnałów tej natury uzyskanych w wyniku zastosowania MSA jako:

$$I_{L,M} = \frac{(a_{RMS}^M)^2}{(a_{RMS}^C)^2}, \quad (4.19)$$

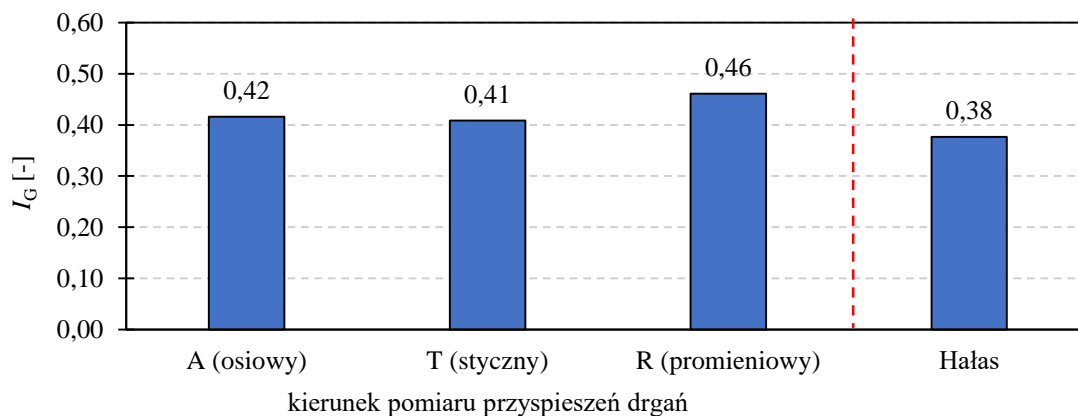
$$I_{L,E} = \frac{(a_{RMS}^E)^2}{(a_{RMS}^C)^2}. \quad (4.20)$$

Dla sygnału rezydualnego (składowych niesynchronicznych z f_o i f_s oraz szumu) informatywność lokalną można wyznaczyć ze wzoru:

$$I_{L,R} = \frac{P_R}{P_c} = \frac{(a_{RMS}^C)^2 - (a_{RMS}^M)^2 - (a_{RMS}^E)^2}{(a_{RMS}^C)^2}, \quad (4.21)$$

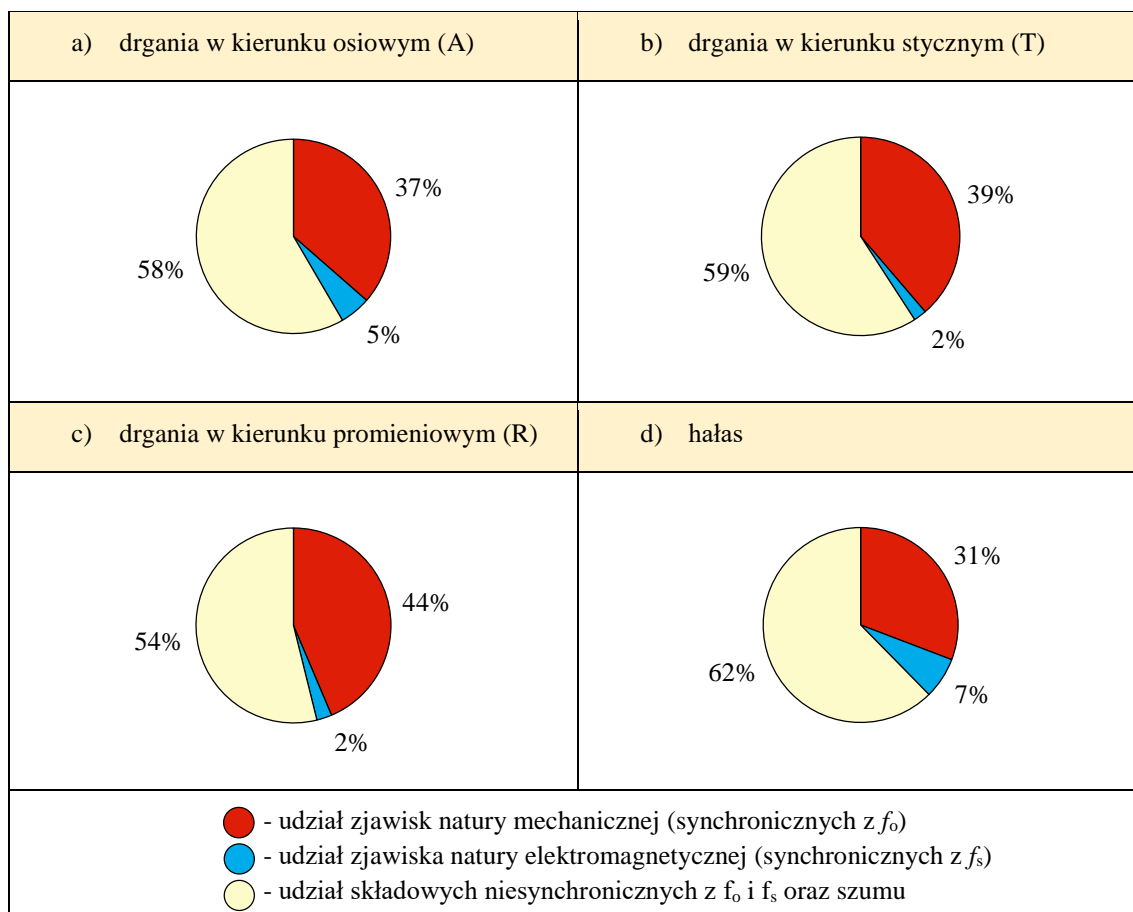
gdzie: P_R – moc sygnałów niesynchronicznych z f_o i f_s oraz szumu.

Wyniki przetwarzania sygnałów przyspieszeń drgań i hałasu metodą MSA i obliczenie informatywności I_G zgodnie ze wzorem 4.15 pozwoliły stwierdzić, że dla silnika ASE-1F, największą informatywność globalną (uśredniona ze wszystkich punktów pomiarowych) odnotowano dla pomiarów przyspieszeń drgań w kierunku promieniowym do korpusu i wynosiła ona 46%. Porównanie wyznaczonych wartości informatywności globalnych dla wszystkich kierunków pomiarów przyspieszeń drgań oraz pomiaru hałasu zaprezentowano na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Porównanie średnich informatywności globalnych I_G wyznaczonych dla jednofazowego silnika asynchronicznego ASE-1F [179].

Udziały składowych związanych ze zjawiskami natury mechanicznej i elektromagnetycznej oraz składowych rezydualnych wyznaczone na podstawie uzyskanych wyników informatywności lokalnych sygnałów $I_{L,M}$, $I_{L,E}$ oraz $I_{L,R}$ pokazano na rysunku 4.7.



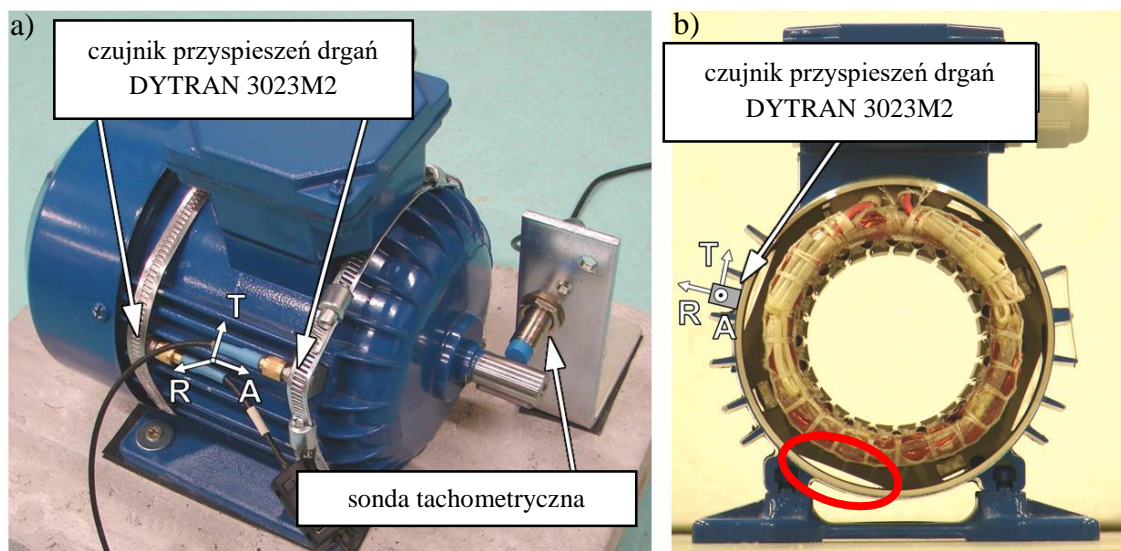
Rys. 4.7. Udziały energetyczne składowych związanych ze zjawiskami natury mechanicznej, elektromagnetycznej oraz składowych rezydualnych sygnałów WA jednofazowego asynchronicznego silnika elektrycznego ASE-1F [179].

Przeprowadzone badania potwierdziły, że technika uśredniania multisynchronicznego jest skutecznym narzędziem dekompozycji sygnałów wibroakustycznych generowanych przez pracujący asynchroniczny silnik elektryczny. Największą średnią informatywność lokalną składowych sygnałów natury mechanicznej odnotowano dla pomiarów drgań wykonywanych w kierunku promieniowym (Rys. 4.7c). Składowe sygnału natury elektromagnetycznej najlepiej były widoczne w hałasie (Rys. 4.7d). Zdecydowanie największy udział w każdym z rozpatrywanych kierunków pomiarów drgań i hałasu miały składowe niesynchroniczne z f_0 i f_s oraz szumy. Udziały poszczególnych zjawisk są zbliżone dla każdego wariantu pomiaru. Trzeba zaznaczyć, że silnik był podłączony do sieci jednofazowej. Ten sposób zasilania nie jest optymalny i wpływa negatywnie na parametry elektromechaniczne silnika [179].

Analiza informatywności sygnałów przyspieszeń drgań (dla różnych punktów i kierunków pomiaru) została przeprowadzona dla trójfazowego silnika BESEL Sh71-4A. Podstawowe parametry silnika zostały przedstawione w tabeli 4.2.

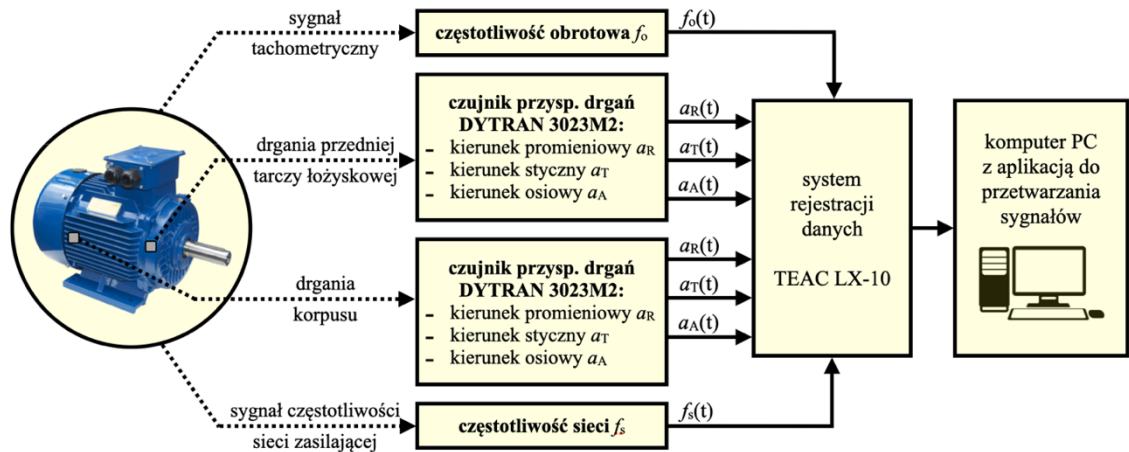
Tab. 4.1. Podstawowe parametry silnika BESEL Sh71-4A [163].

parametr [jednostka]	wartość
moc znamionowa [kW]	0,25
napięcie zasilania (Δ / Y) [V]	230 / 400
prędkość obrotowa n_o [min^{-1}]	1380
sprawność [%]	66



Rys. 4.8. Widok silnika BESEL Sh71-4A w trakcie badań informatywności sygnałów przyspieszeń drgań (a) oraz widok z przodu silnika ze zdemonstrowanymi pokrywami łożyskowymi oraz wirnikiem (b) [162].

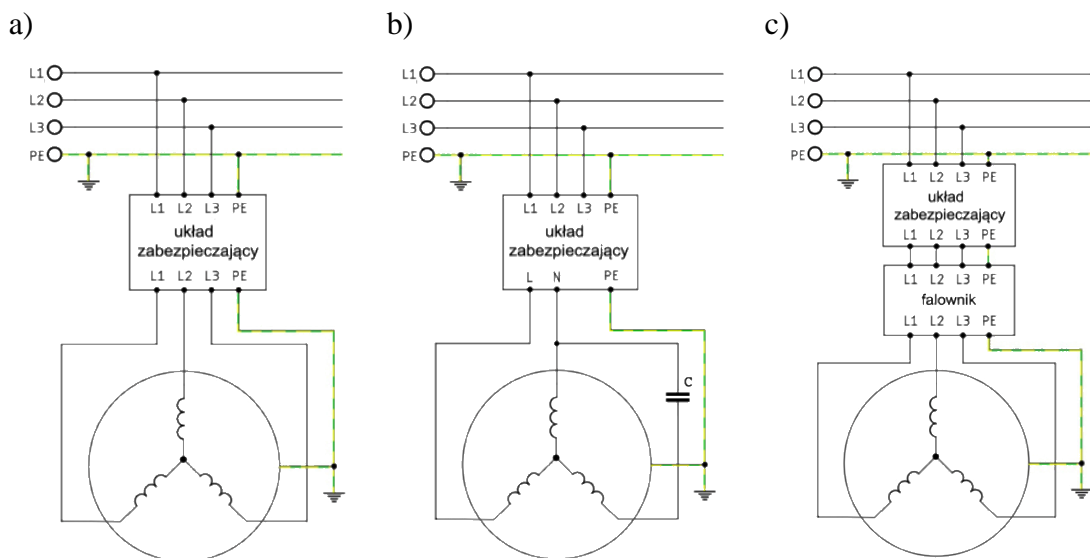
W trakcie badań rejestrowano sygnały przyspieszeń drgań przedniej pokrywy łożyskowej silnika oraz korpusu (Rys. 4.8). Obydwie lokalizacje pomiarów porównano pod kątem informatywności sygnałów drganiowych. Na rysunku 3.1 (rozdział 3.2) oraz 4.8b na czerwono zaznaczono puste przestrzenie pomiędzy aluminiowym korpusem silnika, a rdzeniem uzwojeń stojana. Taka konstrukcja może dodatkowo powodować zmianę charakteru w ujęciu jakościowym i ilościowym drgań korpusu silnika względem przedniej tarczy łożyskowej i tym samym wpływać na udział użytecznych diagnostycznie składowych sygnału całkowitym sygnale drganiowy. Schemat torów rejestracji przyspieszeń drgań przedstawiono na rysunku 4.9



Rys. 4.9. Schemat toru rejestracji sygnałów drganiowych silnika BESEL Sh71-4A podczas badania informatywności sygnałów przyspieszeń drgań [162].

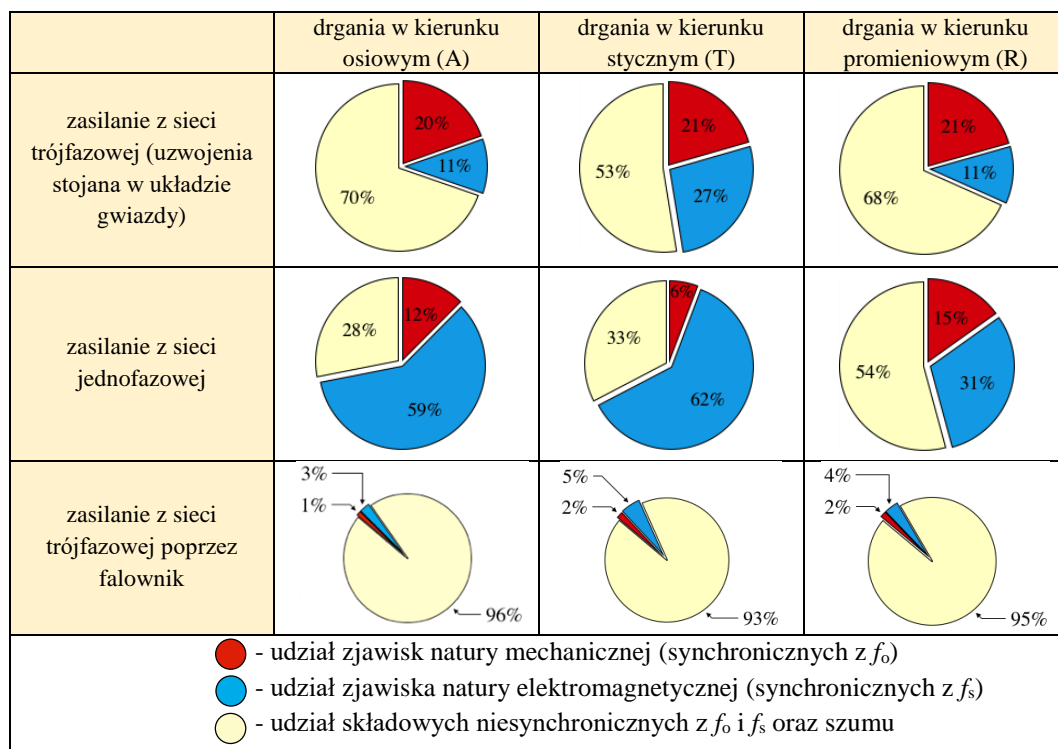
Badania informatywności sygnałów drganiowych rejestrowanych na przedniej pokrywie łożyskowej oraz na korpusie asynchronicznego silnika elektrycznego BESEL Sh71-4A w trzech różnych sposobach zasilania (Rys. 4.10):

- bezpośrednie zasilanie z sieci trójfazowej (uzwojenia stojana połączone w układ gwiazdy),
- połączenie z siecią jednofazową z kondensatorem pracy - w tym typie połączenia występuje nadmierne nagrzewanie się silnika oraz niesymetryczności pola magnetycznego,
- połączenie z siecią trójfazową poprzez falownik.

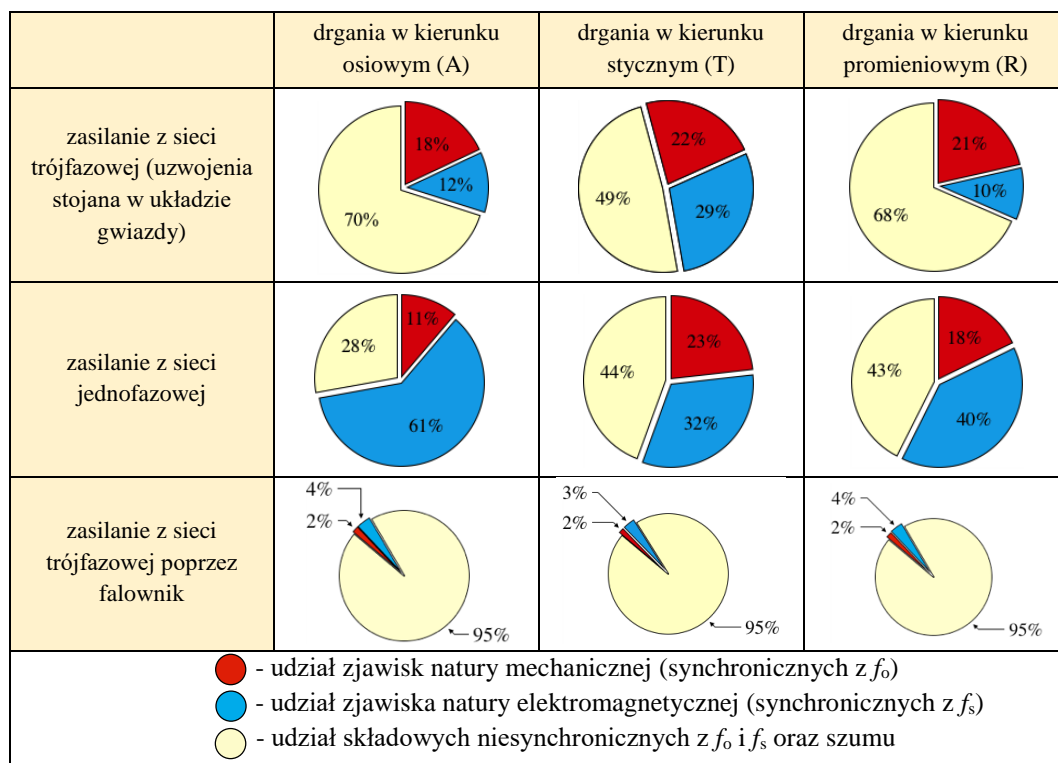


Rys. 4.10. Schematy elektryczne połączeń silnika z siecią zasilającą: a) bezpośrednie połączenie z siecią trójfazową, b) połączenie z siecią jednofazową z kondensatorem pracy, c) połączenie z siecią trójfazową poprzez falownik [162].

Wyniki analizy informatywności lokalnej przyspieszeń drgań w ujęciu wartości średniej przedstawiono na rysunkach 4.11 i 4.12.



Rys. 4.11. Informatywność lokalna przyspieszeń drgań rejestrowanych na przedniej tarczy łożyskowej silnika dla różnych opcji zasilania i kierunków pomiaru drgań (silnik BESEL Sh71-4A) [162].



Rys. 4.12. Informatywność lokalna przyspieszeń drgań rejestrowanych na korpusie silnika dla różnych opcji zasilania i kierunków pomiaru drgań (silnik BESEL Sh71-4A) [162].

Jak można zauważyć dla zasilania trójfazowego, zarówno dla pomiarów na korpusie i tarczy łożyskowej, największy udział mają składowe synchroniczne z częstotliwością obrotową f_0 i częstotliwością sieciową f_s uzyskano dla kierunku stycznego. W tym kierunku uzyskano również najlepszy stosunek sygnału użytecznego diagnostycznie do części niesynchronicznej i szumu (ponad 50%). Przy zasilaniu z sieci jednofazowej wykazano wzrost udziału zjawisk natury mechanicznej, w niektórych przypadkach aż do ok. 60%. Przy zasilaniu silnika z falownika ponad 90% sygnału to składowe niesynchroniczne z f_0 i f_s oraz szum. Można stwierdzić, że pod kątem średnich udziałów składowych sygnałów użytecznych diagnostycznie najlepszym (najbardziej informatywnym) kierunkiem do rejestracji drgań silnika jest kierunek styczny (zarówno na korpusie jak i na tarczy łożyskowej).

4.3. Wpływ warunków prowadzenia testów ASE na hałas, drgania i pole magnetyczne

4.3.1. Pomiary hałasu

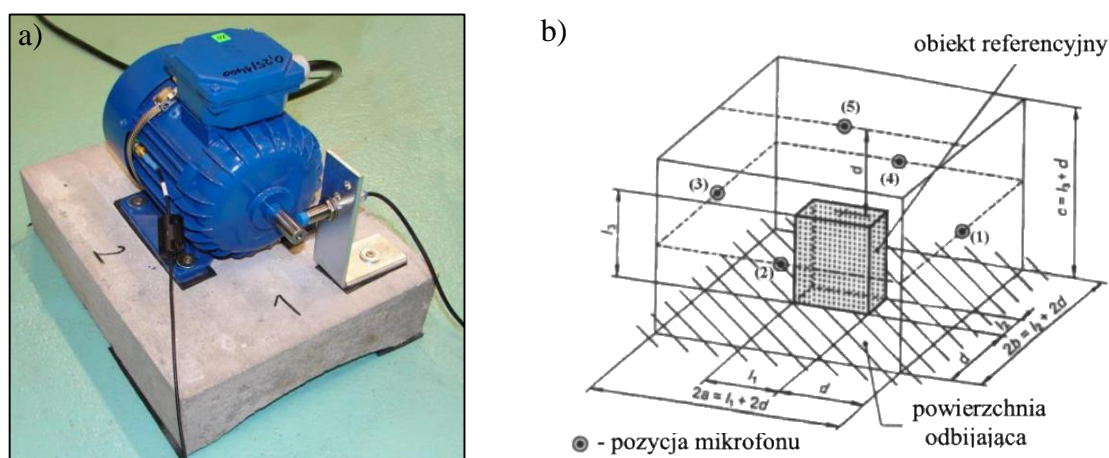
Hałas jest zaliczany do podstawowych źródeł informacji diagnostycznych świadczących o stanie technicznym oraz jakości wykonania silników elektrycznych. Wyniki parametryzacja hałasu rejestrowanego w trakcie testowania odbiorczego mogą być podstawą do określenia klasy silnika ze względu na poziom emitowanego hałasu. Niestety w praktyce pomiary hałasu realizowane na halach produkcyjnych często są niewiarygodne (lub obarczone błędem) ze względu na wysoki poziom tła akustycznego. Wynika to głównie z wysokiego poziomu dźwięku emitowanego przez inne maszyny/urządzenia znajdujące się na hali fabrycznej w porównaniu z zwykle niskim poziomem hałasu emitowanego przez testowany silnik. Często hałas generowany przez maszyny na halach produkcyjny przekracza 90 dB, co może być dużą przeszkodą w prowadzeniu pomiarów akustycznych wyprodukowanych silników na hali oraz w bezpośrednim jej otoczeniu [164, 165]. Mając to na uwadze można rozważyć prowadzenie pomiarów hałasu z zastosowaniem:

- komór bezechowych lub izolowanej i adaptowanej akustycznie przestrzeni - takie rozwiązanie jest możliwe np. w przypadku lokalizacji takiej komory w pobliżu linii produkcyjnej, jednak koszt takiej komory często jest bardzo wysoki, ze względu na złożoność konstrukcji pozwalającej na całkowitą redukcję hałasu pochodzącego z hali; takie rozwiązanie może być jednak kłopotliwe ze względów organizacyjnych w przypadku testowania silników produkowanych masowo lub seryjnie;
- laboratoriów nie będących w bezpośrednim sąsiedztwie hal produkcyjnych - warunki prowadzenia testów mogą być wystarczające do prowadzenia pomiarów hałasu

nowych silników asynchronicznych, jednak pełna kontrola może być problematyczna ze względu na konieczność transportu silników z hali do laboratorium;

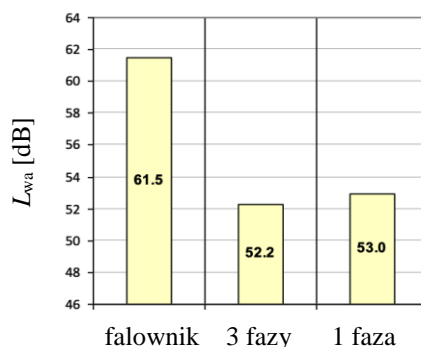
- zaawansowanych metod i technik przetwarzania sygnałów - głównie metod pozwalających na aktywną redukcję szumu otoczenia lub/i wyodrębnienie z pozyskanego sygnału użytecznej informacji diagnostycznej [166].

Pomiar hałasu w trakcie testowania odbiorczego powinien być realizowany dla określonych (normowych) parametrów pracy silnika. W ramach badań sprawdzono wpływ sposobu zasilania ASE na emitowany przez niego hałas. Badania przeprowadzono dla nowego silnika BESEL Sh71-4A posadzonego na betonowym fundamencie (Rys. 4.13a). Silnik był oddzielony od betonowego bloku gumowymi przekładkami oraz podłączany do sieci elektrycznej tak samo jak w ramach analizy informatywności prowadzonej dla przyspieszeń drgań (Rys. 4.10). Pomiary hałasu przeprowadzono zgodnie z normą ISO 3746:2011 służącej do wyznaczania mocy akustycznej urządzeń metodą orientacyjną. Hałas rejestrowano w 5 punktach pomiarowych rozmieszczonych w przestrzeni pomiarowej w odległości 0,25 m od korpusu silnika. Widok testowanego silnika oraz lokalizacja punktów pomiarowych na przestrzeni pomiarowej przedstawiono na rysunku 4.13.



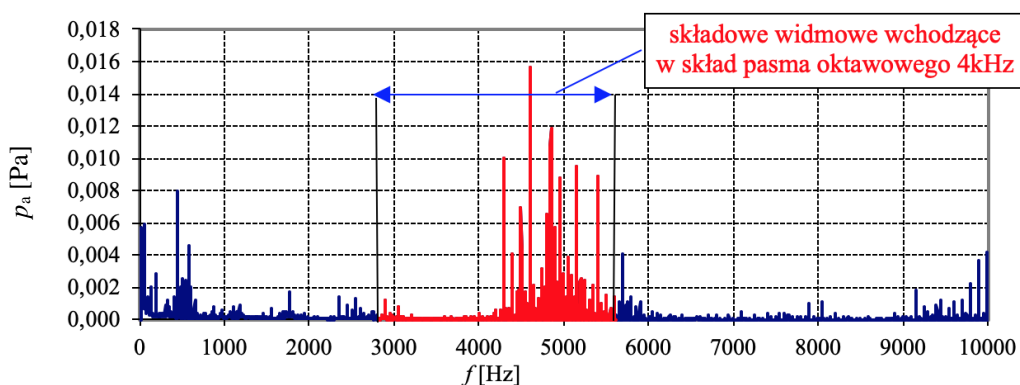
Rys. 4.13. Sposób posadwienia silnika BESEL Sh71-4A w trakcie badań hałasu (a) oraz lokalizacja punktów pomiarowych na powierzchni pomiarowej podczas wyznaczania poziomu mocy akustycznej zgodnie z ISO 3746:2011 [167].

Porównanie poziomów mocy akustycznej pozwoliło stwierdzić, że zasilanie silnika poprzez falownik jest niekorzystne ze względu na zdecydowanie większy poziom mocy akustycznej w porównaniu do zasilania jedno lub trójfazowego.

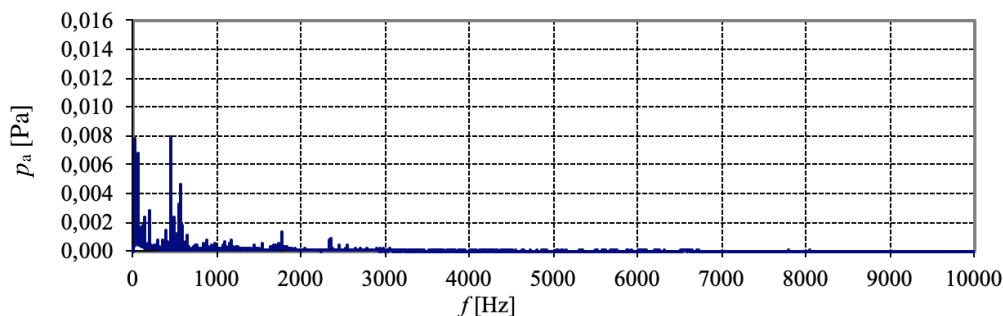


Rys. 4.14. Poziomy mocy akustycznej silnika BESEL Sh71-4A w różnych opcjach zasilania [168].

Przyczyną podwyższonego poziomu mocy akustycznej silnika zasilanego z falownika mogą być pojawiające się w tej opcji zasilania dodatkowe składowe zaznaczone kolorem czerwonym na widmie ciśnienia akustycznego (Rys. 4.15). Składowe te występują w okolicy częstotliwości ok. 5 kHz i są związane prawdopodobnie z częstotliwością impulsowania falownika. Są one znacząco większe (dominujące) w porównaniu z pozostałymi składowymi widma ciśnienia akustycznego. Należy dodać, że w widmie wąskopasmowym ciśnienia akustycznego silnika zasilanego bezpośrednio z sieci trójfazowej nie są widoczne żadne składowe powyżej 3 kHz (Rys. 4.16).

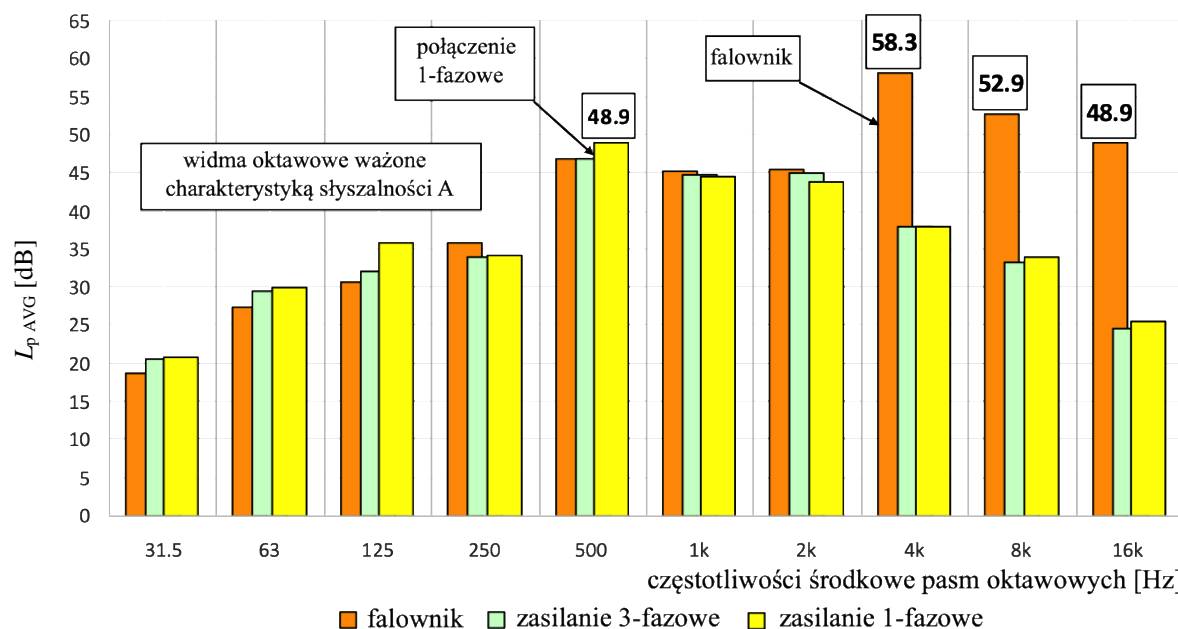


Rys. 4.15. Widmo wąskopasmowe ciśnienia akustycznego silnika BESEL Sh71-4A zasilanego poprzez falownik [168].



Rys. 4.16. Widmo wąskopasmowe ciśnienia akustycznego silnika BESEL Sh71-4A zasilanego bezpośrednio z sieci trójfazowej [168].

Porównano również widma oktauwowe dla poszczególnych sposobów zasilania silnika w trakcie testów (Rys. 4.17). Jednoznacznie stwierdzono wzrost uśrednionych wartości poziomów ciśnienia akustycznego w oktawach 4, 8 i 16 kHz dla zasilania poprzez falownik. Najwyższe wartości uzyskano dla oktawy 4 kHz.



Rys. 4.17. Porównanie widm oktauwowych ważonych charakterystyką A dla różnych sposobów zasilania silnika BESEL Sh71-4A [168].

Przeprowadzone badania pozwoliły jednoznacznie stwierdzić, że preferowanym sposobem zasilania ASE w trakcie pomiarów hałasu jest zasilanie z sieci trójfazowej. Jest to podstawowy sposób zasilania silnika, do którego są one przystosowane. Zasilenie silnika z sieci jednofazowej powoduje niewielki wzrost poziomu mocy akustycznej silnika. Nie jest polecane testowanie silników w aspekcie emisji hałasu przy zasilaniu silnika poprzez falownik

4.3.2. Pomiary i analizy widmowe drgań

Drgania są źródłem niosącym informacje o stanie technicznym ASE, głównie w aspekcie oddziaływań dynamicznych części mechanicznych oraz obwodów elektromagnetycznych np. magnetostrykcja. Oprócz podstawowych metod parametryzacji drgań najczęstszym sposobem analizy drgań jest analiza widmowa wykonywana z wykorzystaniem algorytmu FFT. Wady i uszkodzenia powstałe zarówno w układzie mechanicznym, jak i elektromagnetycznym silnika będą widoczne w widmie drgań jako składowe o częstotliwościach charakterystycznych dla poszczególnych defektów (Tab. 4.2).

Tab. 4.2. Częstotliwości charakterystyczne wad i uszkodzeń ASE [19].

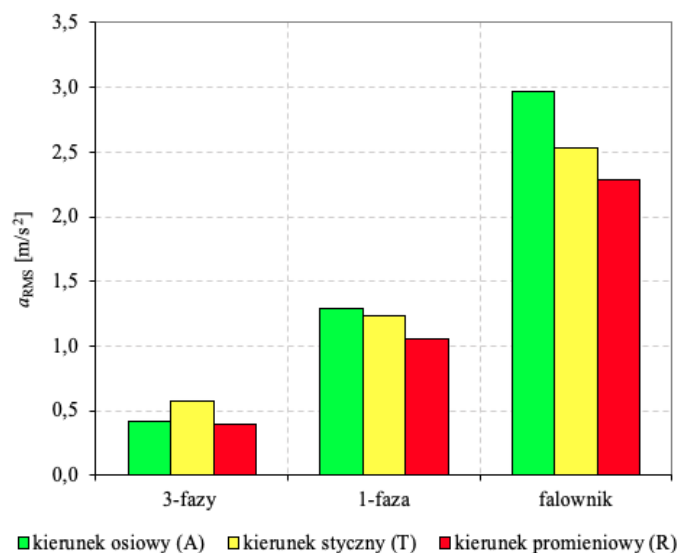
rodzaj wady lub uszkodzenia	częstotliwość charakterystyczna	komentarz
niewyważenie wirnika	f_o	drgania w kierunku promieniowym
zgięcie wału		drgania promieniowe i osiowe
luzy w układzie mechanicznym	$2 \cdot f_o, 3 \cdot f_o$	-
wady/uszkodzenia łożysk	sygnał o charakterze impulsowym na tle szumu wysokoczęstotliwościowego	częstotliwości charakterystyczne defektów łożysk opisano w rozdziale 2.2.1.3
niecentryczność wirnika względem stojana	f_o, f_{rs}	mogą pojawiać się wstęgi boczne wokół tych składowych
pęknięte pręty klatki	$f_o \pm 2 \cdot s \cdot f_s$	niskie amplitudy - trudne w obserwacji
wady/uszkodzenia w układzie elektrycznym	$n_h \cdot f_o, n_h \cdot f_s$	składowe w tych częstotliwościach zanikają w trakcie wybiegu silnika
wady/uszkodzenia uzwojeń	$f_s, 2 \cdot f_s, 4 \cdot f_s$	trudne w odróżnieniu od innych defektów współistniejących

n_h - kolejne składowe harmoniczne ($n_h = 1, 2, \dots$),

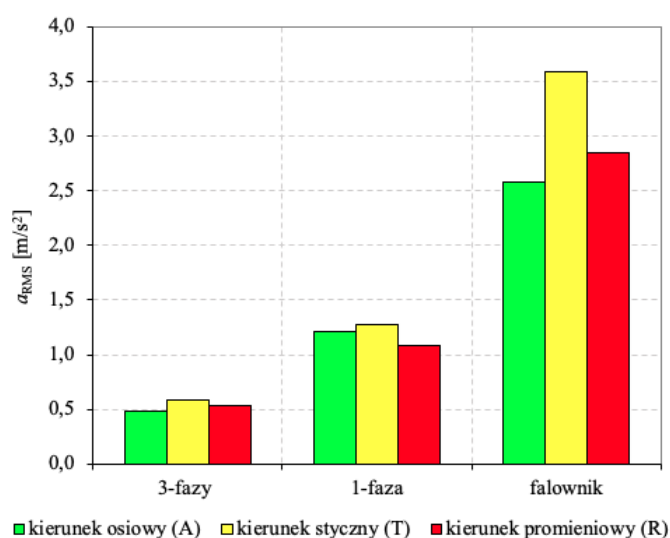
f_{rs} - częstotliwość żłobkowa (p. rozdział 2.2.1.3)

Znajomość tych zależności (częstotliwości charakterystycznych zamieszczonych w tabeli 4.2 może być pomocna w identyfikacji wad i uszkodzeń silników elektrycznych na podstawie widma drgań. Sygnał poddany analizie widmowej powinien mieć jak najlepszy stosunek sygnału użytecznego do szumu (SNR). W tym celu sprawdzono w jakim stopniu sposób zasilania silnika wpływa na składowe widma sygnału niosące informacje diagnostyczne zawarte w sygnale drganiowym.

Obiektem badań był asynchroniczny silnik elektryczny BESEL Sh71-4A opisany w rozdziale 4.3.1 Silnik posadowiono na betonowej podstawie oraz odseparowano gumowymi podkładkami w celu zredukowania wpływu drgań strukturalnych otoczenia. Pomiary drgań realizowano przy pomocy trójosiowych czujników przyspieszeń drgań DYTRAN 3023M2. Sygnały przyspieszeń drgań rejestrowano w dwóch punktach pomiarowych: na przedniej pokrywie łożyskowej silnika oraz na aluminiowym korpusie (Rys. 4.8a). Oprócz analiz widmowych sygnałów przyspieszeń drgań wykonano widma sygnałów uzyskanych w wyniku uśredniania multisynchronicznego (metodą MSA). W rezultacie zastosowania MSA wyodrębniono z pierwotnego sygnału drganiowego sygnały związane ze zjawiskami mechanicznymi i elektromagnetycznymi zachodzącymi w silniku. Wyniki pomiarów wartości skutecznych przyspieszeń drgań a_{RMS} przedstawiono na rysunku 4.18.

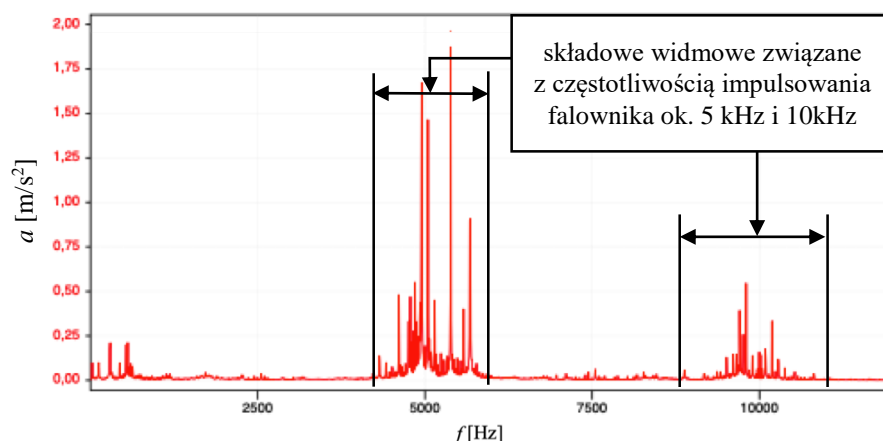


Rys. 4.18. Porównanie wartości skutecznych przyspieszeń drgań a_{RMS} (w paśmie 10-10000 Hz) mierzonych na korpusie silnika BESEL Sh71-4A dla różnych sposobów jego zasilania [162].



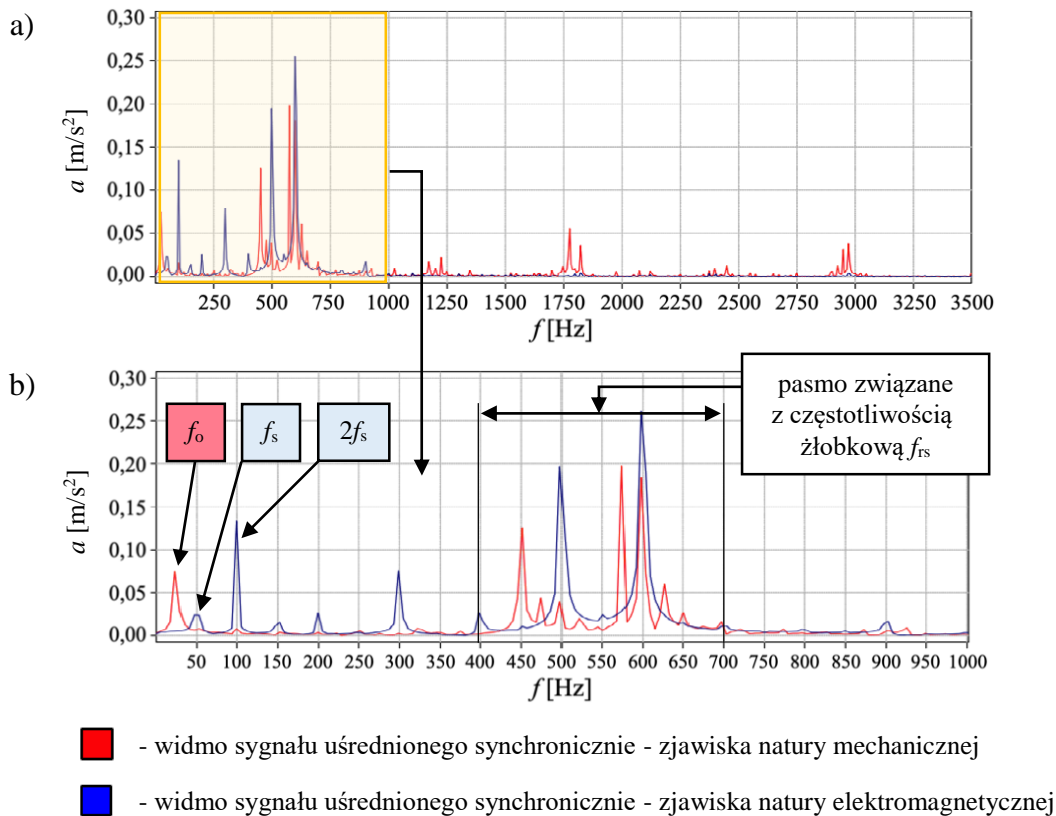
Rys. 4.19. Porównanie wartości skutecznych przyspieszeń drgań a_{RMS} (w paśmie 10-10000 Hz) mierzonych na przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL Sh71-4A dla różnych sposobów jego zasilania [162].

Na rysunku 4.20 pokazano widmo przyspieszeń drgań korpusu silnika BESEL Sh71-4A zasilanego przez falownik. Widoczne jest duże podobieństwo składu widmowego sygnału przyspieszeń drgań i ciśnienia akustycznego pokazanego na rysunku 4.15. Zasilanie ASE przy pomocy falownika zdecydowanie zwiększa drgania całego silnika, szczególnie w pasmach wyróżnionych na rysunku 4.20 od 4 kHz do 6 kHz oraz od 9 kHz do 10 kHz. Trzeba tutaj zaznaczyć, że w widmach przyspieszeń drgań silnika zasilanego jedno lub trójfazowo składowe te nie występują.

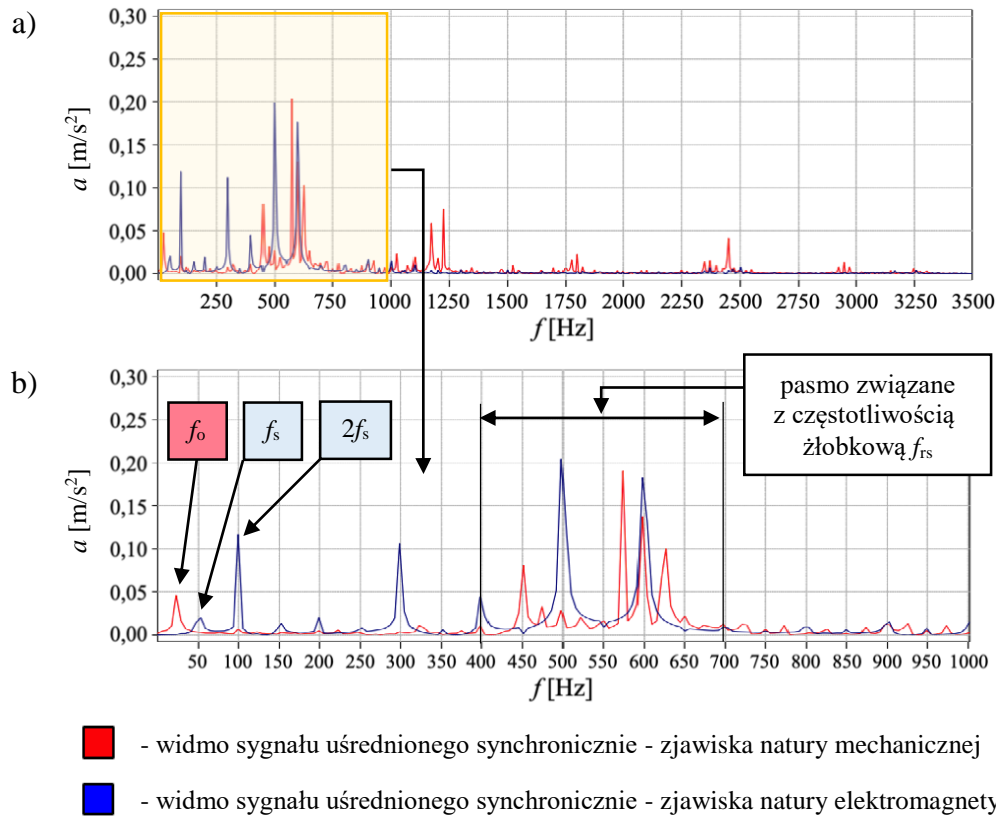


Rys. 4.20. Widmo przyspieszeń drgań osiowych korpusu silnika BESEL Sh71-4A zasilanego z falownika [162].

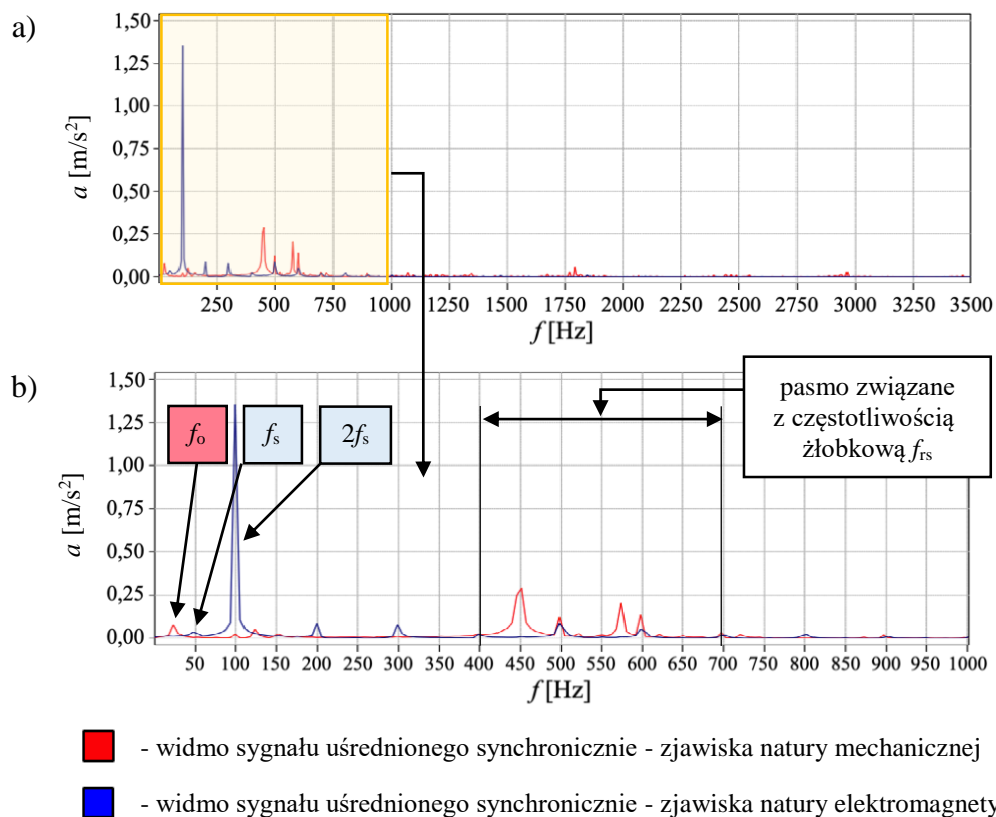
Porównanie widm sygnałów przyspieszeń drgań i hałasu pozwala stwierdzić wysokie podobieństwo pomiędzy drganiami, a hałasem (Rys. 4.15 i 4.20). Kolejny pakiet analiz widmowych wykonano dla sygnałów uśrednionych synchronicznie (techniką MSA) z częstotliwością obrotową f_o oraz częstotliwością sieci zasilającej f_s . Widma przyspieszeń drgań uzyskane w wyniku dekompozycji multisynchronicznej dla kierunku stycznego (T) korpusu i przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL Sh71-4A oraz zasilania trójfazowego i jednofazowego przedstawiono na rysunkach 4.21-4.24.



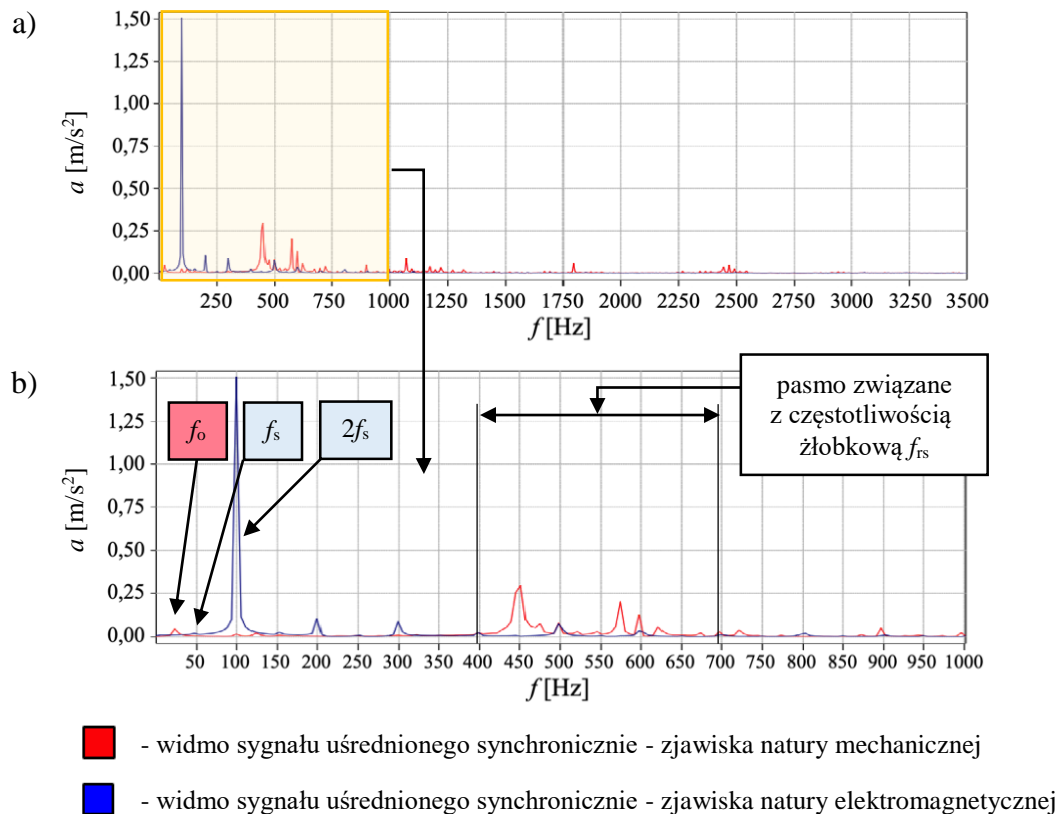
Rys. 4.21. Porównanie widm przyspieszeń drgań w kierunku stycznym korpusu ASE (zasilanie trójfazowe) po dekompozycji multisynchronicznej a) w paśmie do 3,5 kHz, b) w paśmie do 1 kHz.



Rys. 4.22. Porównanie widm przyspieszeń drgań w kierunku stycznym przedniej tarczy łożyskowej ASE (zasilanie trójfazowe) po dekompozycji multisynchronicznej a) w paśmie do 3,5 kHz, b) w paśmie do 1 kHz.



Rys. 4.23. Porównanie widm przyspieszeń drgań w kierunku stycznym korpusu ASE (zasilanie jednofazowe) po dekompozycji multisynchronicznej a) w paśmie do 3,5 kHz, b) w paśmie do 1 kHz.



Rys. 4.24. Porównanie widm przyspieszeń drgań w kierunku stycznym przedniej tarczy łożyskowej ASE (zasilanie jednofazowe) po dekompozycji multisynchronicznej a) w paśmie do 3,5 kHz, b) w paśmie do 1 kHz.

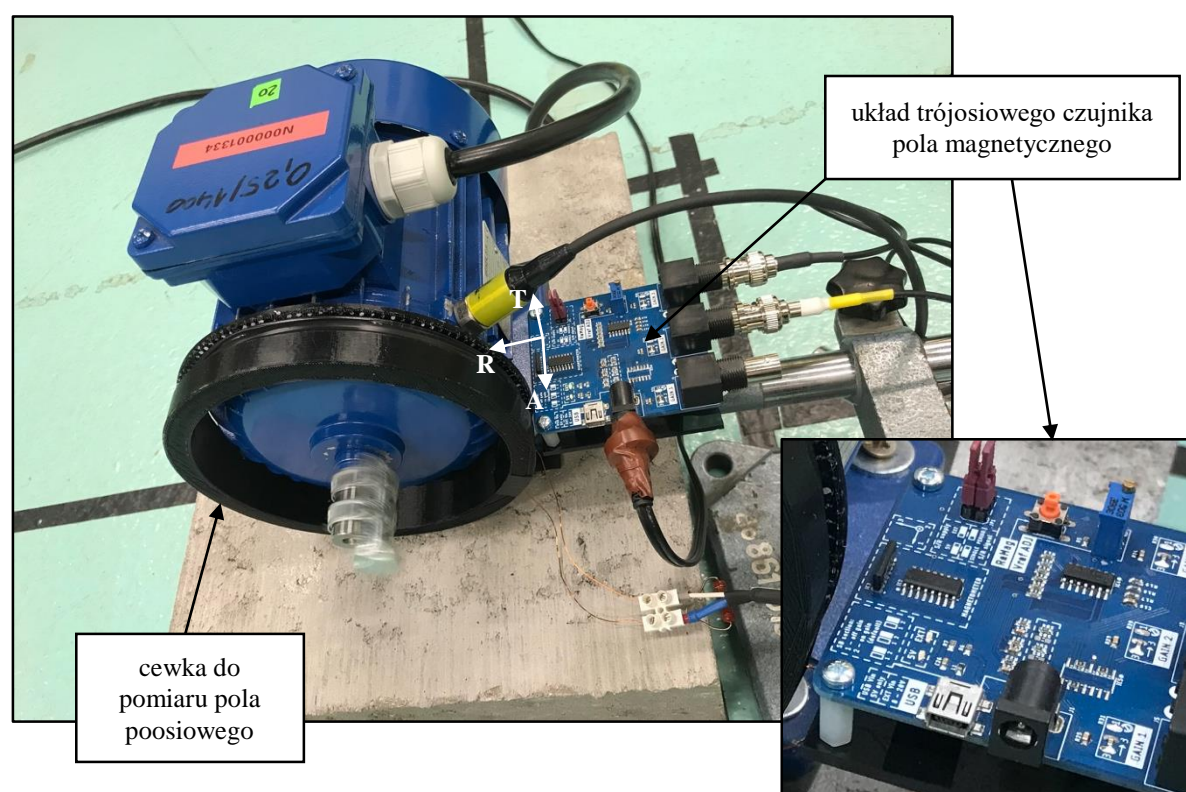
Jak można zauważyć zmiana zasilania silnika asynchronicznego z połączenia trójfazowego na jednofazowe, powoduje ok. 10-krotny wzrost wartości składowej o częstotliwości $2f_s$ (100 Hz) związanej ze zjawiskiem magnetostrykcji. Wzrost ten można zaobserwować w drganiach korpusu i tarczy łożyskowej (porównaj rysunki 4.21 i 4.23 - wzrost z $0,14 \text{ m/s}^2$ do $1,3 \text{ m/s}^2$, a także rysunki 4.22 i 4.24 - wzrost z $0,12 \text{ m/s}^2$ do $1,5 \text{ m/s}^2$). Występują również niewielkie różnice w składzie widmowym przyspieszeń drgań w paśmie 400-700 Hz (pasma związane z częstotliwością żłobkową f_{ts}). W przypadku zasilania jednofazowego wyraźnie rośnie udział składowych sygnałów związanych ze zjawiskami elektromagnetycznymi. Wzrost składowych w tym paśmie jest głównie związany z efektem wzrostu asymetrii pola magnetycznego stojana (w przypadku zasilania jednofazowego).

4.3.3. Pomiary i analizy pola magnetycznego

Pole magnetyczne wokół silnika (auta magnetyczna) może być również źródłem informacji diagnostycznych. Miary i charakterystyki pola magnetycznego uzyskane w wyniku jego parametryzacji i analizy mogą być zastosowane do prowadzenia testów odbiorczych

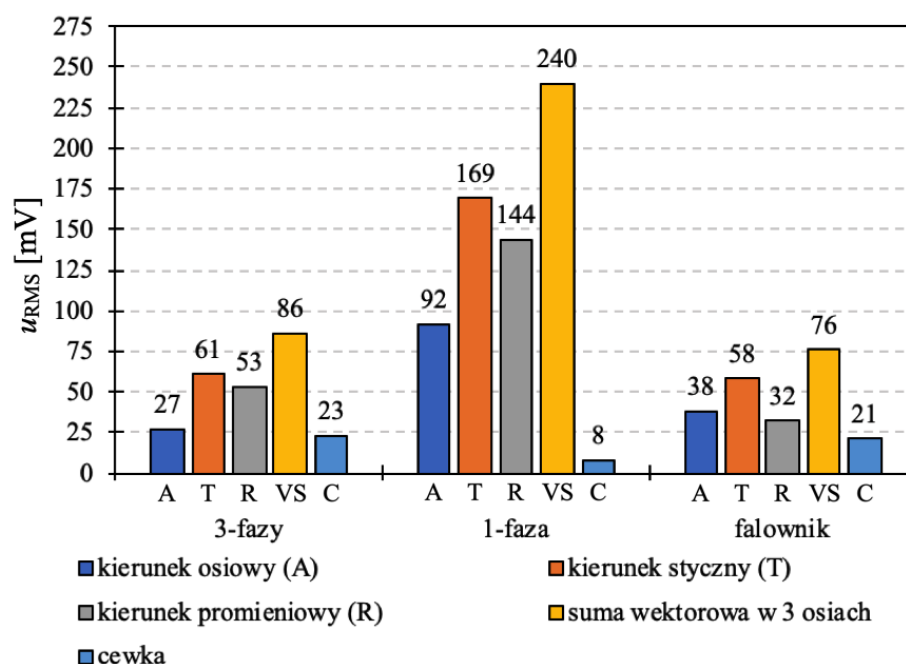
i oceny jakości wykonania ASE. Pomiar pola magnetycznego na halach produkcyjnych może okazać się mniej wrażliwy na zakłócenia w porównaniu z np. pomiarami akustycznymi.

Analizy pola magnetycznego w zależności od sposobu zasilania ASE przeprowadzono dla silnika BESEL Sh71-4A (Tab. 4.1) dla trzech sposobów zasilania silnika z sieci elektrycznej (Rys. 4.10) [180]. Pomiary aury magnetycznej (korpusu) silnika realizowano przy pomocy układu pomiarowego pola magnetycznego opracowanego przez autora pracy - nazwanego UPM-01. Układ ten bazuje na magnetorezystywnych przetwornikach pola magnetycznego HMC1022 i HMC1021Z. Natomiast pomiary pola poosiowego prowadzono za pomocą opracowanej i wykonanej cewki zamocowanej od strony przedniej tarczy łożyskowej (Rys. 4.25).



Rys. 4.25. Widok silnika BESEL Sh71-4A wraz z lokalizacją trójosiowego czujnika pola magnetycznego i cewki pola poosiowego.

W ramach przeprowadzonych badań porównano wartości skuteczne napięć układu UPM-01, które są proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego wokół silnika. Pomiary prowadzono w trzech kierunkach (promieniowym (R), stycznym (T) i osiowym (A) do korpusu silnika oraz wyznaczono sumy wektorowe (VS) napięć z tych trzech kierunków). Uzyskane wyniki pomiarów pokazano na rysunku 4.26. W uzupełnieniu na rysunku 4.26 przedstawiono wartości skuteczne napięcia wyindukowanego w cewce pola poosiowego.



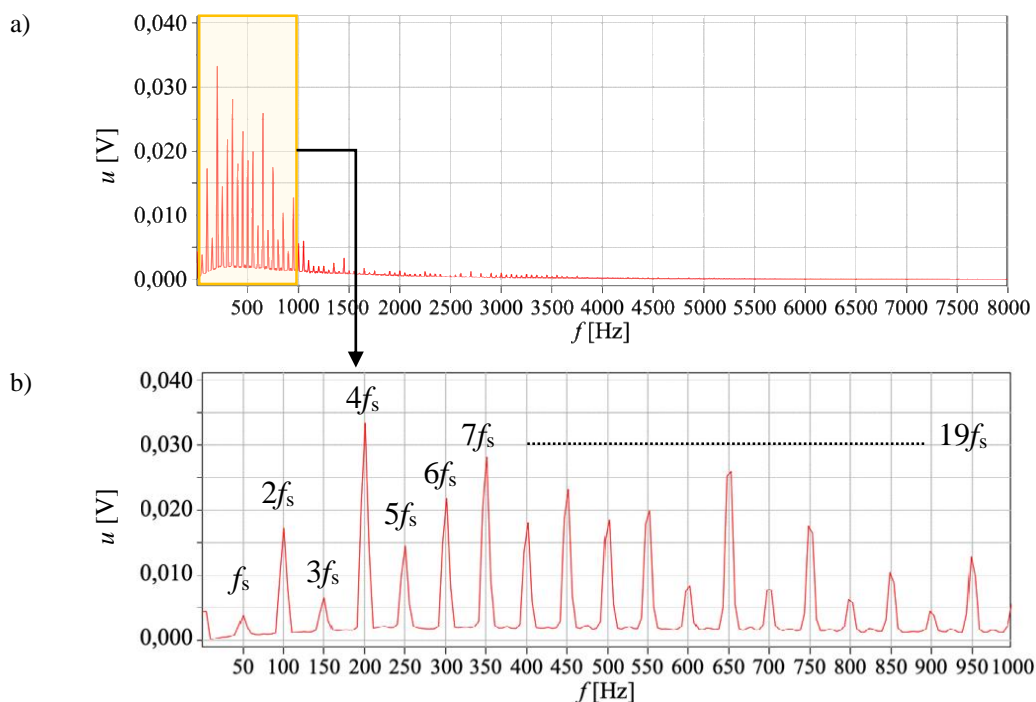
Rys. 4.26. Porównanie wyników parametryzacji pola magnetycznego silnika BESEL Sh71-4A; wartości skuteczne napięć z układu UPM-01 (kierunki A, T, R i suma wektorowa) oraz napięcia indukowanego w cewce pola poosiowego dla różnych sposobów zasilania ASE.

Na podstawie porównania wyników (w ujęciu ilościowym) można sformułować niżej wymienione wnioski i spostrzeżenia dotyczące pola magnetycznego (aury magnetycznej) wokół silnika:

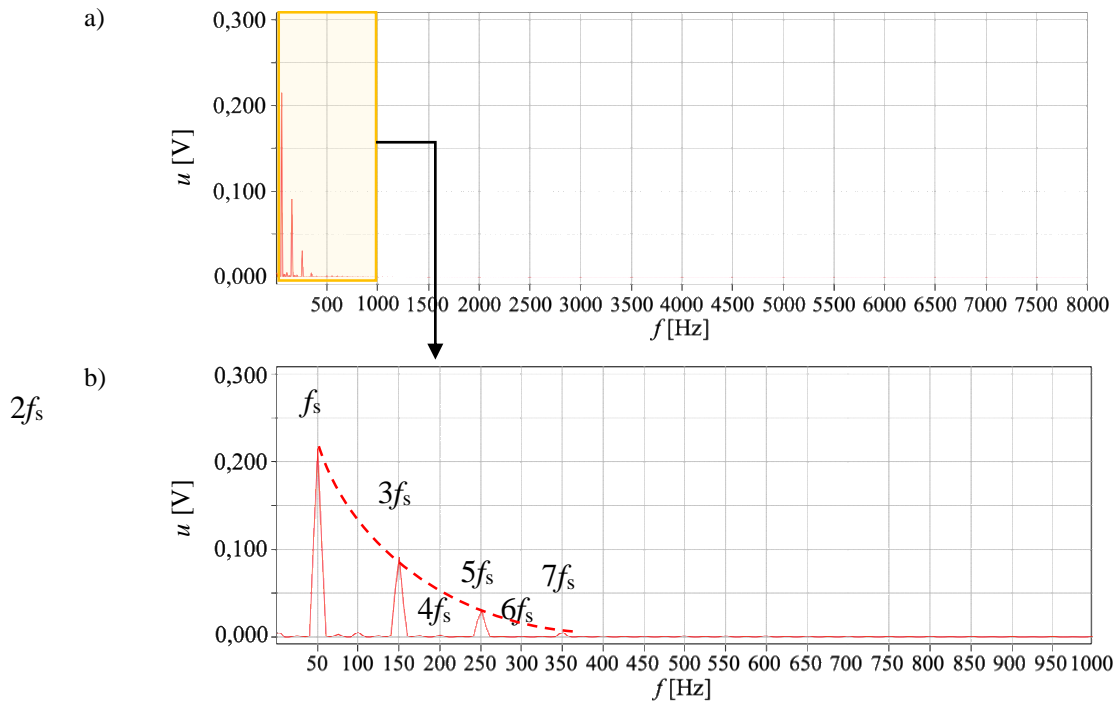
- w punkcie pomiarowym zlokalizowanym w odległości 25 mm od przedniej tarczy łożyskowej silnika natężenie pola magnetycznego:
 - (oszacowane na podstawie sumy wektorowej napięć z kierunków A, T i R - układ UPM-01) jest ok. 3-krotnie wyższe w przypadku zasilania jednofazowego silnika (w porównaniu do zasilania trójfazowego),
 - niezależnie od opcji zasilania silnika najwyższe wartości uzyskano dla pomiarów pola magnetycznego w kierunku stycznym (T); można zatem przyjąć, że w przypadku pomiarów realizowanych przetwornikiem jednoosiowym pomiar w kierunku stycznym można uznać za preferowany,
 - porównując natężenie pola magnetycznego dla opcji zasilania trójfazowego bezpośrednio z sieci i z zastosowaniem falownika nie odnotowano znaczących zmian (spadek u_{RMS} dla sumy wektorowej ok. 12% po zastosowaniu falownika)
- pomiary pola poosiowego (z zastosowaniem pomiaru napięcia indukowanego w cewce) wykazały, że:

- w przypadku zasilania jednofazowego odnotowano ok. 3-krotny spadek natężenia poosiowego pola magnetycznego w porównaniu z opcją zasilania trójfazowego (odwrotnie niż wykazał to pomiar przy pomocy układu UPM-01),
- podobnie jak w przypadku pomiaru w otoczeniu przedniej tarczy łożyskowej wprowadzenie w układ zasilania trójfazowego falownika nie powoduje znacznych zmian natężenia pola magnetycznego (spadek napięcia u_{RMS} na cewce ok. 10% dla opcji zasilania z falownikiem).

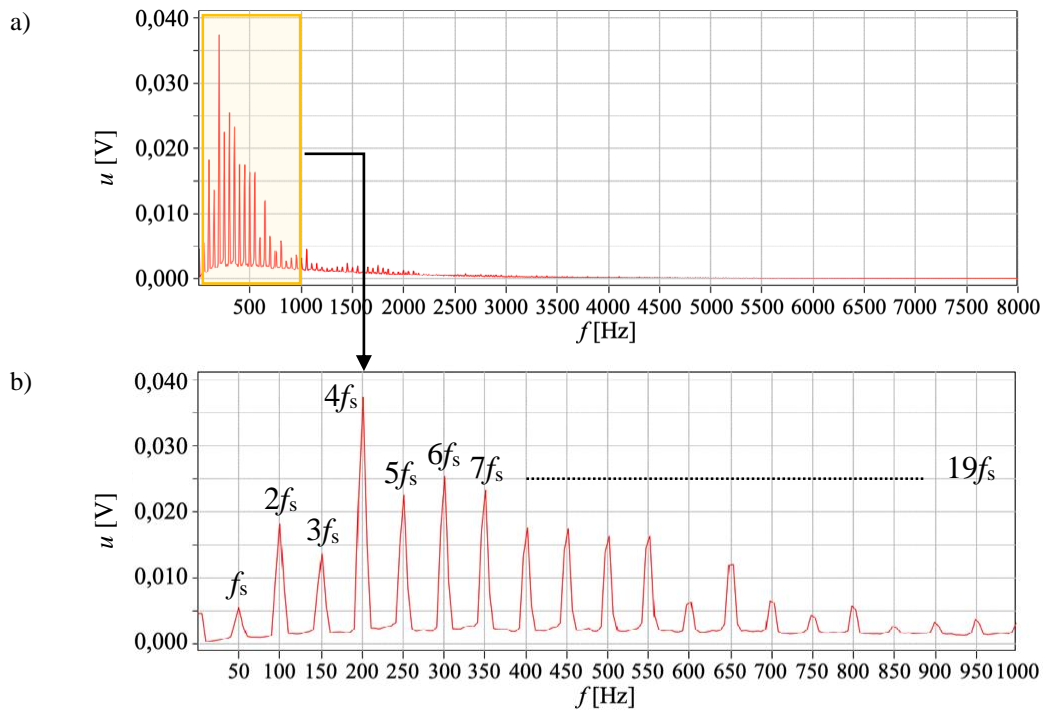
Analizy widmowe sygnałów napięciowych z układu UPM-01 pozwoliły na porównanie wpływu opcji zasilania silnika BESEL Sh71-4A na pole magnetyczne w ujęciu jakościowym (zmiany składu widmowego). Z uwagi na wskazanie kierunku stycznego (T) jako preferowanego do pomiarów pola magnetycznego na rysunkach 4.27-4.31 zamieszczono wyniki analiz dla tego kierunku.



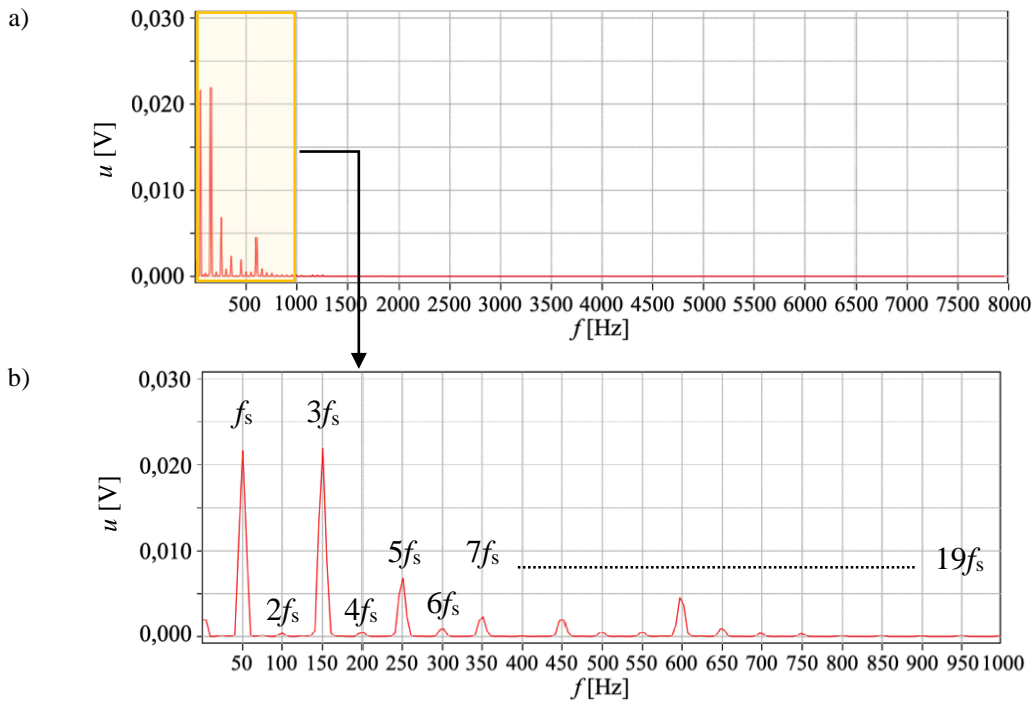
Rys. 4.27. Badanie pola magnetycznego silnika BESEL Sh71-4A - widmo napięcia wyjściowego z układu UPM-01 w kierunku stycznym (25 mm od korpusu), zasilanie trójfazowe: a) w paśmie do 8 kHz, b) w paśmie do 1 kHz).



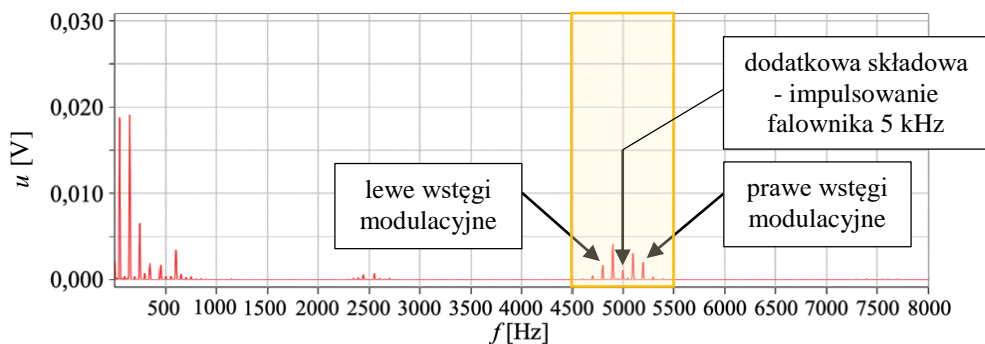
Rys. 4.28. Badanie pola magnetycznego silnika BESEL Sh71-4A - widmo napięcia wyjściowego z układu UPM-01 w kierunku stycznym (25 mm od korpusu), zasilanie jednofazowe: a) w paśmie do 8 kHz, b) w paśmie do 1 kHz).



Rys. 4.29. Badanie pola magnetycznego silnika BESEL Sh71-4A - widmo napięcia wyjściowego z układu UPM-01 w kierunku stycznym (25 mm od korpusu), zasilanie przez falownik: a) w paśmie do 8 kHz, b) w paśmie do 1 kHz).



Rys. 4.30. Badanie pola magnetycznego silnika BESEL Sh71-4A - widmo napięcia indukowanego w cewce do pomiaru pola poosiowego, zasilanie trójfazowe: a) w paśmie do 8 kHz, b) w paśmie do 1 kHz).



Rys. 4.31. Badanie pola magnetycznego silnika BESEL Sh71-4A - widmo napięcia indukowanego w cewce do pomiaru pola poosiowego w paśmie do 8 kHz, zasilanie poprzez falownik.

Na podstawie porównania widm sygnałów z przetworników pola magnetycznego można sformułować poniższe wnioski.

- W przypadku zasilania silnika z trzech faz dominujące amplitudowo składowe zawierają się w paśmie do ok. 1 kHz (Rys. 4.27a). Sygnał ma charakter poliharmoniczny o częstotliwości podstawowej poliharmoniki równej częstotliwości sieciowej f_s 50 Hz. Dobrze jest to widoczne w widmie do 1000 Hz (Rys. 4.27b). Składowa odpowiadająca częstotliwości sieciowej f_s jest jedną z najniższych składowych w tym paśmie częstotliwości. Jej wartość nie przekracza 5 mV. Dominująca amplitudowo jest składowa

o częstotliwości 200 Hz ($4f_s$). Jej wartość nie przekracza 35 mV. Wprowadzenie w układzie zasilania trójfazowego falownika (Rys. 4.29) zasadniczo nie wpływa na postać widma w paśmie do $7f_s$ (ok. 350 Hz). Natomiast powyżej $7f_s$ składowe nieznacznie maleją ze wzrostem częstotliwości (w porównaniu z widmem uzyskanym dla zasilania 3-fazowego bez falownika).

- Znaczącą zmianę widma można zauważyć w przypadku zasilania silnika z sieci jednofazowej. Dobrze widoczna jest składowa sieciowa f_s (dominująca amplitudowo) i jej kolejne nieparzyste nadharmoniczne ($3f_s$, $5f_s$, $7f_s$), które maleją wraz ze wzrostem częstotliwości. Wartość najwyższej składowej o częstotliwości f_s (50 Hz) to ok. 230 mV. Można zauważyć, że w przypadku zasilania jednofazowego dominujące amplitudowo składowe widma sygnału z przetwornika pola magnetycznego są o rząd większe niż w przypadku zasilania trójfazowego (bez lub z falownikiem).

Kluczowym w ujęciu aplikacyjnym związanym z wykorzystaniem wyników parametryzacji i/lub analiz pola magnetycznego (aury magnetycznej) ASE w procesie testowania odbiorczego, jest określenie optymalnej lokalizacji punktu pomiarowego. Jako kryterium można przyjąć miejsce (obszar) w niewielkiej odległości od korpusu (np. 10 mm), charakteryzujący się np. najwyższym natężeniem pola lub najkorzystniejszym stosunkiem sygnału do szumu (SNR). W tym kontekście jako element metodyki związany z testowaniem odbiorczym ASE nieodzowne jest przeprowadzenie mapowania rozkładu pola magnetycznego wokół silnika. Należy tutaj nadmienić, że walidację metod detekcji wad produkcyjnych ASE (opisaną w rozdziale 5) przeprowadzono (oprócz silnika badawczego GUNT PT500.19) na silnikach produkowanych seryjnie BESEL 2SIEK 63-4A2. Parametry techniczne tego silnika kołnierzewego zamieszczono w rozdziale 5 (Tab. 5.5). Mając powyższe na uwadze w dalszej części tego rozdziału opisano sposób mapowania pola magnetycznego oraz zaprezentowano uzyskane wyniki. Mapowanie pola magnetycznego przeprowadzono na stanowisku pomiarowym [190] (Rys. 4.32) opracowanym i wykonanym pod nadzorem i wsparciem merytorycznym i technicznym autora rozprawy. Stanowisko to umożliwia prowadzenie mapowania w trybie półautomatycznym, związanym z pozycjonowaniem punktu pomiarowego. Realizowanie jest to przez skojarzenie ruchu obrotowego obrotownicy i przesuwu pionowego ramienia sondy z zamocowanym na końcu układem UPM-02 (z trzema hallotronowymi przetwornikami pola magnetycznego AH49E). Mapowanie natężenia pola magnetycznego silnika wykonano w trzech kierunkach pomiarowych (A, T i R). Pomiar był realizowany w odległości 10 mm od korpusu silnika, na całym jego obwodzie oraz wysokości. Rozdzielczość kątowa wykonywanych pomiarów wynosiła 15° , wysokość zmieniano

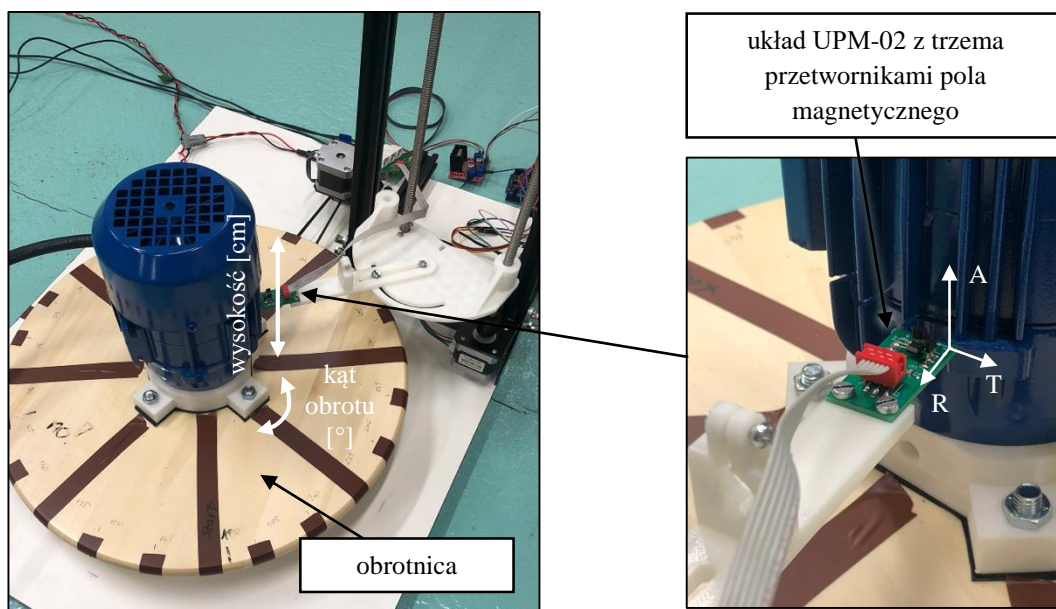
co 10 mm. Rejestrowano sygnał napięciowy proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego pochodzący z trzech ww. przetworników. Badania przeprowadzono dla dwóch sposobów zasilania ASE z sieci elektrycznej:

- bezpośredniego połączenia silnika z siecią trójfazową,
- połączenia z siecią jednofazową z kondensatorem pracy (kondensator włączono w obwód zasilania silnika poza obrębem stanowiska badawczego).

Sygnały napięciowe z przetworników pola magnetycznego poddano parametryzacji (pasmo 10-5000 Hz, czas uśredniania 60s) w efekcie której wyznaczono:

- wartości skuteczne napięcia u_{RMS} (Rys. 4.33),
- wartości szczytowe napięcia u_{PEAK} (Rys. 4.34),
- wartości średnie napięcia u_{AVG} (Rys. 4.35),
- współczynnik kształtu (WK) (Rys. 4.36),
- współczynnik szczytu (WS) (Rys. 4.37),
- współczynnik impulsowości (WI) (Rys. 4.38),
- kurtozę⁷ (Rys. 4.39).

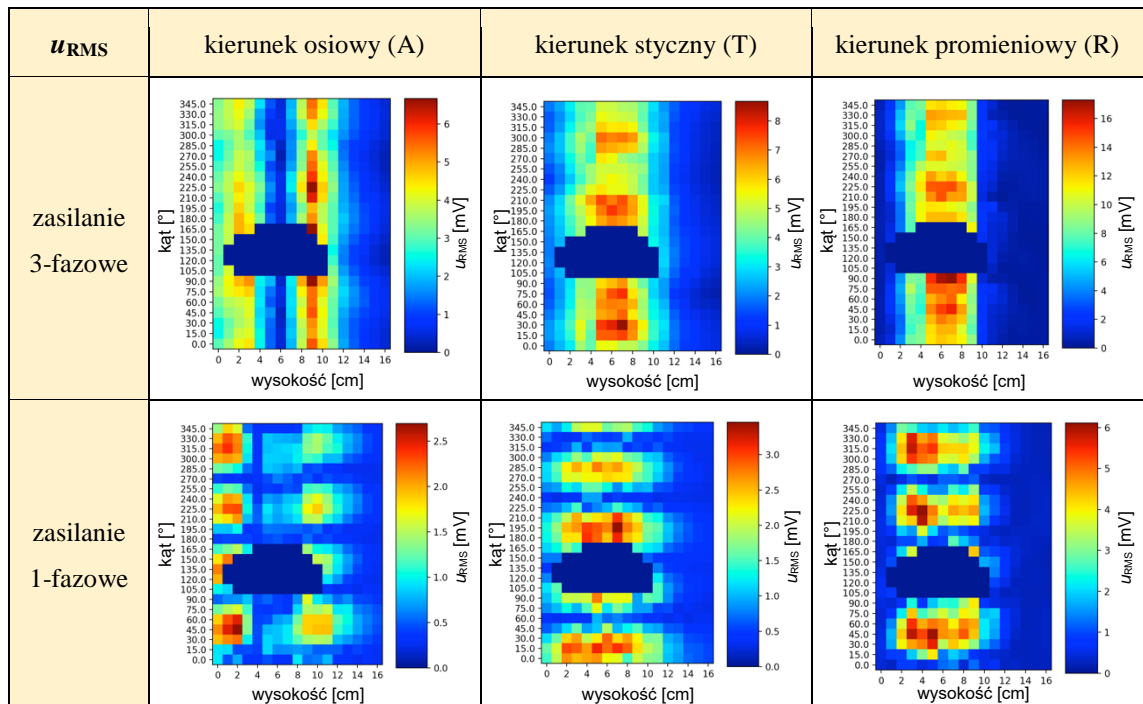
Pomiar napięcia u_{RMS} był traktowany jako kryterium podstawowe, mapowanie dla pozostałych miar wykonano w celach poznawczych.



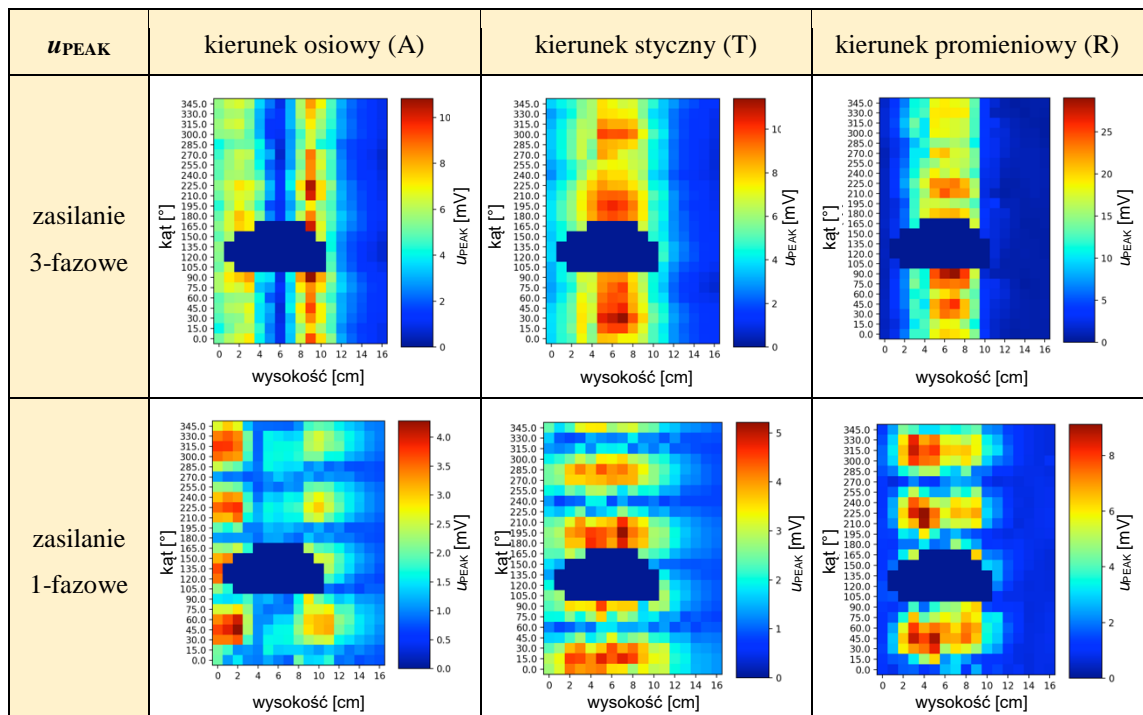
Rys. 4.32. Stanowisko badawcze do mapowania pola magnetycznego ASE oraz układ UPM-02.

⁷ Definicje tych miar zamieszczono w rozdziale 5.2.3.5.

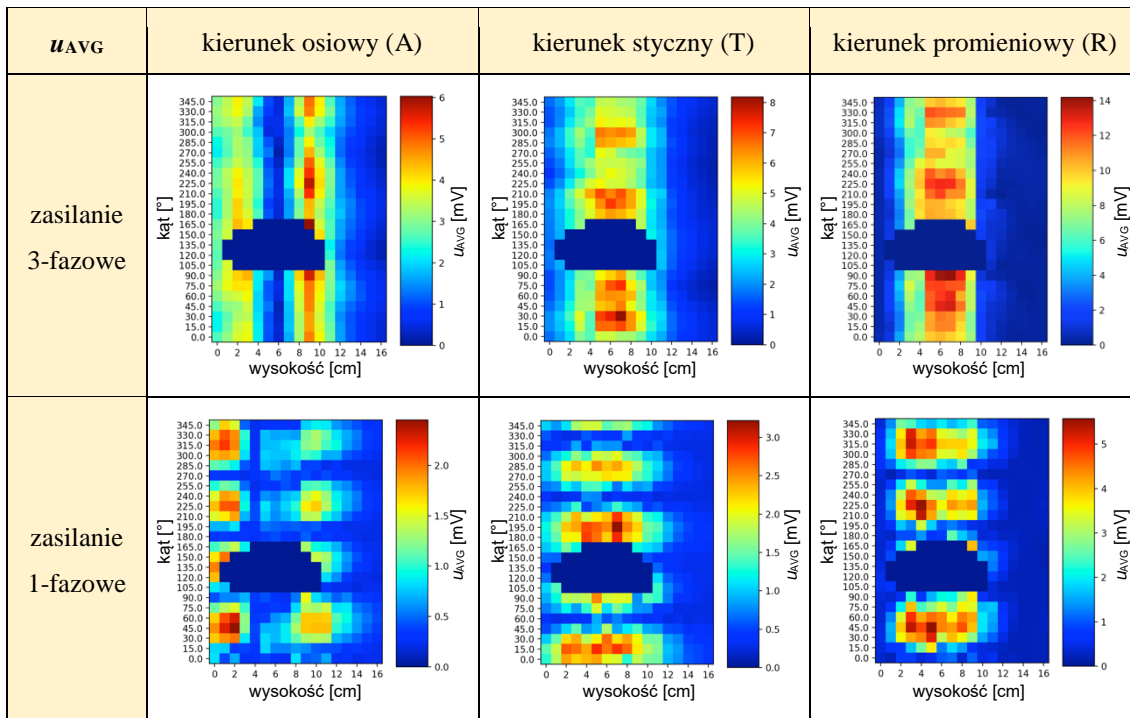
Wyniki mapowania pola magnetycznego silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 przedstawiono na rysunkach 4.33 - 4.39.



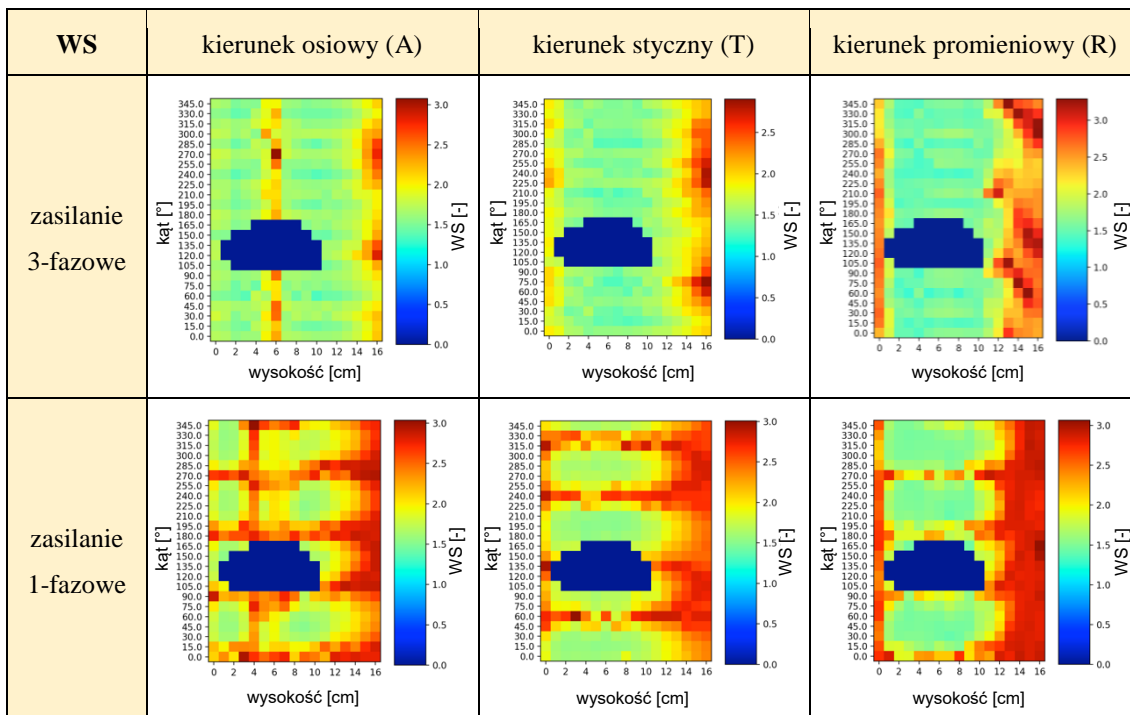
Rys. 4.33. Porównanie wyników mapowania pola magnetycznego dla zasilania silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 z sieci jednofazowej oraz trójfazowej (wartości skuteczne u_{RMS} [mV] napięcia wyjściowego z czujników układu UPM-02).



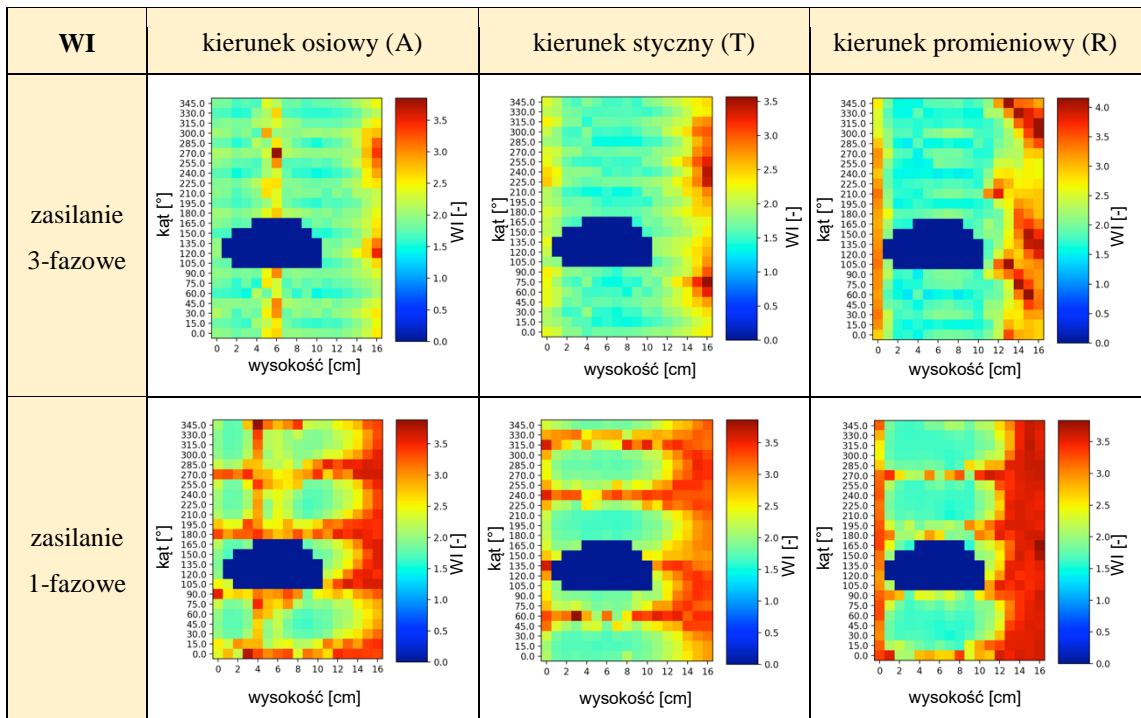
Rys. 4.34. Porównanie wyników mapowania pola magnetycznego dla zasilania silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 z sieci jednofazowej oraz trójfazowej (wartości szczytowe u_{PEAK} [mV] napięcia wyjściowego z czujników układu UPM-02).



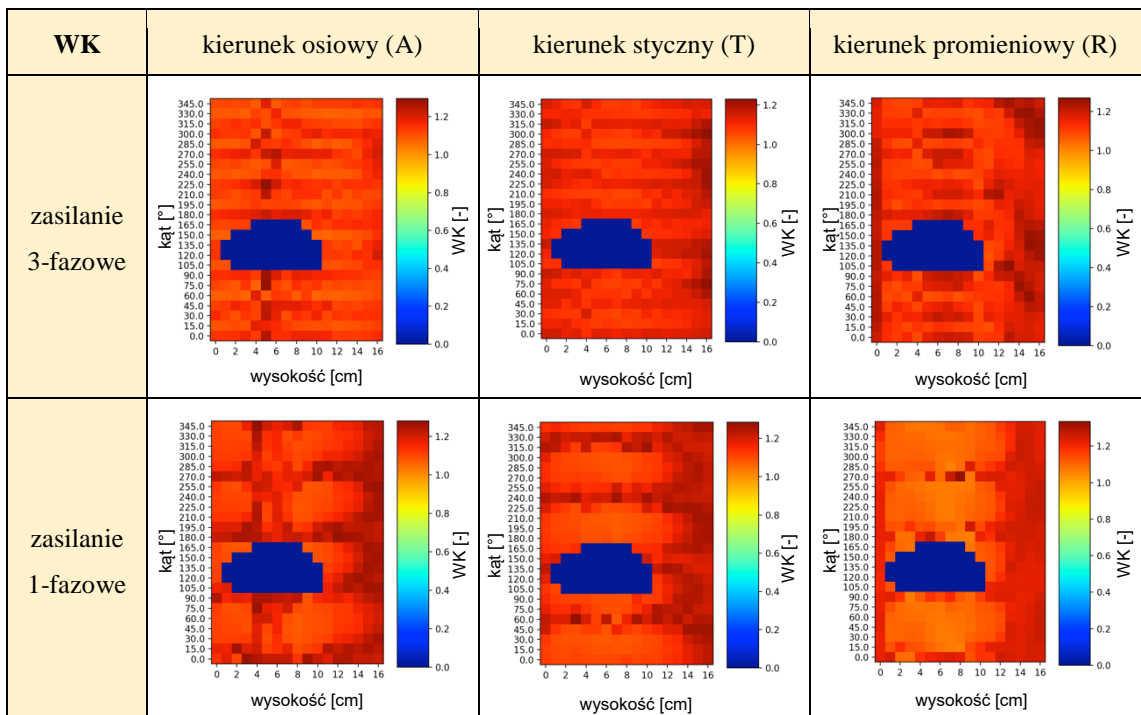
Rys. 4.35. Porównanie wyników mapowania pola magnetycznego dla zasilania silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 z sieci jednofazowej oraz trójfazowej (wartości średnie u_{AVG} [mV] napięcia wyjściowego z czujników układu UPM-02).



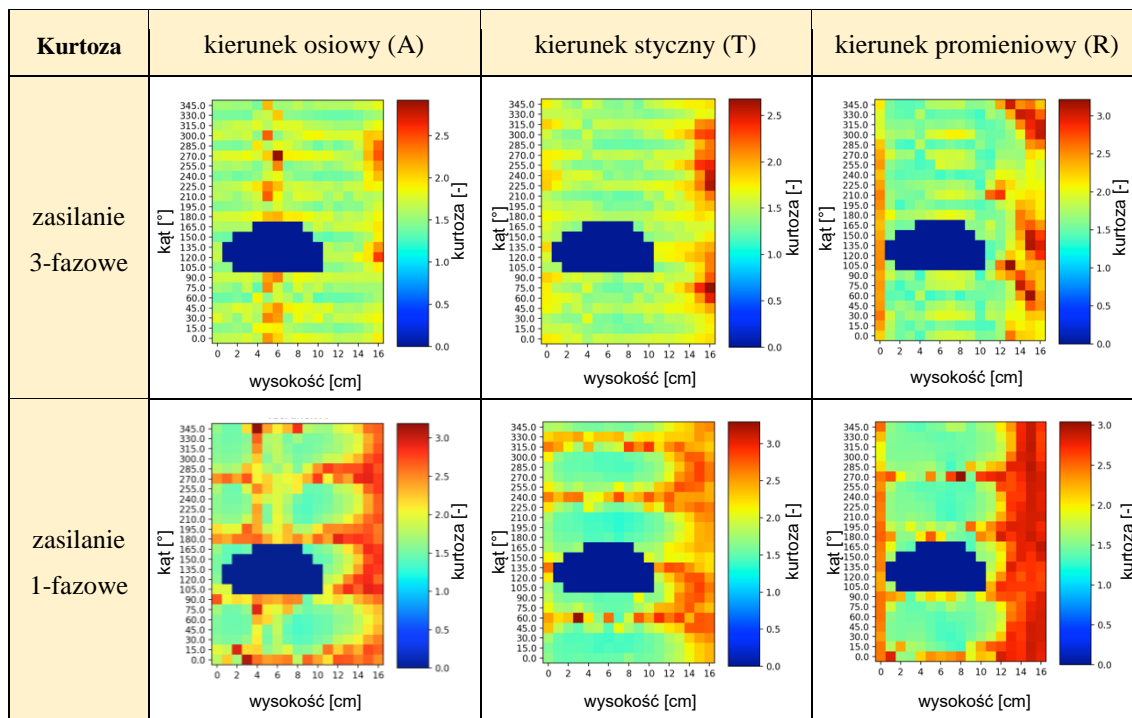
Rys. 4.36. Porównanie wyników mapowania pola magnetycznego dla zasilania silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 z sieci jednofazowej oraz trójfazowej (współczynnik szczytu sygnału wyjściowego z czujników układu UPM-02).



Rys. 4.37. Porównanie wyników mapowania pola magnetycznego dla zasilania silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 z sieci jednofazowej oraz trójfazowej (współczynnik impulsowości sygnału wyjściowego z czujników układu UPM-02).

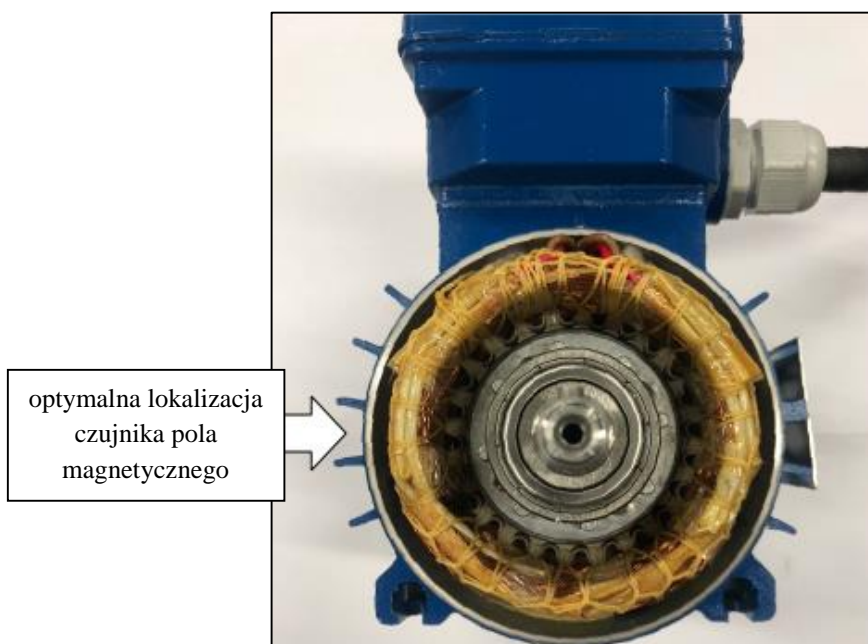


Rys. 4.38. Porównanie wyników mapowania pola magnetycznego dla zasilania silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 z sieci jednofazowej oraz trójfazowej (współczynnik kształtu sygnału wyjściowego z czujników układu UPM-02).



Rys. 4.39. Porównanie wyników mapowania pola magnetycznego dla zasilania silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 z sieci jednofazowej oraz trójfazowej (kurtoza sygnału wyjściowego z czujników układu UPM-02).

Dobrze widoczny obszar (ciemnoniebieski, wysokości 10-100 mm i zakres kątów 100° - 170°) został pominięty w analizie - w tym miejscu silnika znajduje się puszka przyłączeniowa. Przeprowadzone badanie pozwoliło stwierdzić, że pomiar aury magnetycznej silnika powinien być realizowany w kierunku stycznym lub promieniowym do korpusu silnika, w jak najbliższej odległości od środka korpusu. W zasadzie badania pola magnetycznego dadzą najbardziej wiarygodne wyniki, jeśli pomiar będzie realizowany w miejscu największego natężenia pola. Dlatego położenie czujnika względem korpusu powinno być określone w zależności od konstrukcji oraz ilości biegunów badanego silnika. Dla silnika 2SIEK 63-4A2 optymalną lokalizacją jest centralny punkt korpusu, z prawej bądź lewej jego strony (Rys. 4.40). Uzasadnione jest również lokalizowanie cewki pola poosiowego w jak najbliższej odległości od przedniej tarczy łożyskowej silnika ze względu na największe natężenie pola magnetycznego w tym obszarze.



Rys. 4.40. Widok silnika 2SIEK 63-4A2 z zaznaczoną optymalną lokalizacją czujnika pola magnetycznego.

Pomiar pola magnetycznego ASE może być stosowany w celu detekcji wad produkcyjnych. Widmo sygnału pola magnetycznego ma charakter poliharmoniczny z wyraźną składową o częstotliwości sieci f_s oraz jej nadharmonicznymi. Zmiana sposobu zasilania z trójfazowego na jednofazowy spowodowała znaczne zmiany składu widmowego sygnału pola magnetycznego. Dlatego z dużą pewnością można stwierdzić, że pomiar pola magnetycznego może być skuteczny w detekcji wad produkcyjnych wpływających na intensyfikację zjawisk natury elektromagnetycznej.

4.3.4. Wpływ sposobu montażu/posadowienia na drgania testowanego ASE

Można zauważyć, że nowe silniki elektryczne będą wykazywały się małą wibroaktywnością. Nie można wykluczyć, że niektóre składowe związane z wadami produkcyjnymi silników i jakością ich wykonania będą składowymiiskoenergetycznymi trudnymi do wyodrębnienia z sygnału np. drganiowego. Z tego powodu testy ASE powinny być przeprowadzane w powtarzalnych warunkach oraz wolnych od zewnętrznych czynników zakłócających. Na wyniki testów odbiorczych, w tym skuteczność detekcji wad, może wpływać sposób montażu silnika na stanowisku testowym (wpływ warunków brzegowych oraz ich powtarzalność). Zgodnie z normą PN-EN IEC 60034-14 silnik w trakcie trwania testu może być zamontowany w sposób sztywny - na masywnym fundamencie lub dedykowanym stanowisku testowym, albo sprężysty - montaż na sprężynach, gumie czy piance (patrz rozdział

2.2.1.1). W normie sformułowane zostały również wymagania dotyczące stanowisk testowych, a dokładniej częstotliwości drgań własnych. Rezonanse strukturalne stanowisk nie powinny wchodzić w koincydencję z częstotliwością obrotową silnika f_o wraz z jej składowymi nadharmonicznymi, a także z częstotliwością sieci zasilającej f_s i jej kolejnymi nadharmonicznymi, ponieważ może być to przyczyną błędnej oceny jakości wykonania silników w wyniku lokalnych wzmocnień lub osłabień sygnałów drganiowych w tych zakresach częstotliwości. Z tego powodu szeroko rozumiana metodyka testowania odbiorczego ASE powinna również obejmować eksperymentalne sprawdzenie stanowisk pod kątem spełnienia ww. wymagań/ zaleceń. Szczególnie powinno to dotyczyć prototypów stanowisk. Wskazana jest również weryfikacja przed rozpoczęciem testowania każdego modelu/typu silnika istniejących stanowisk testowych.

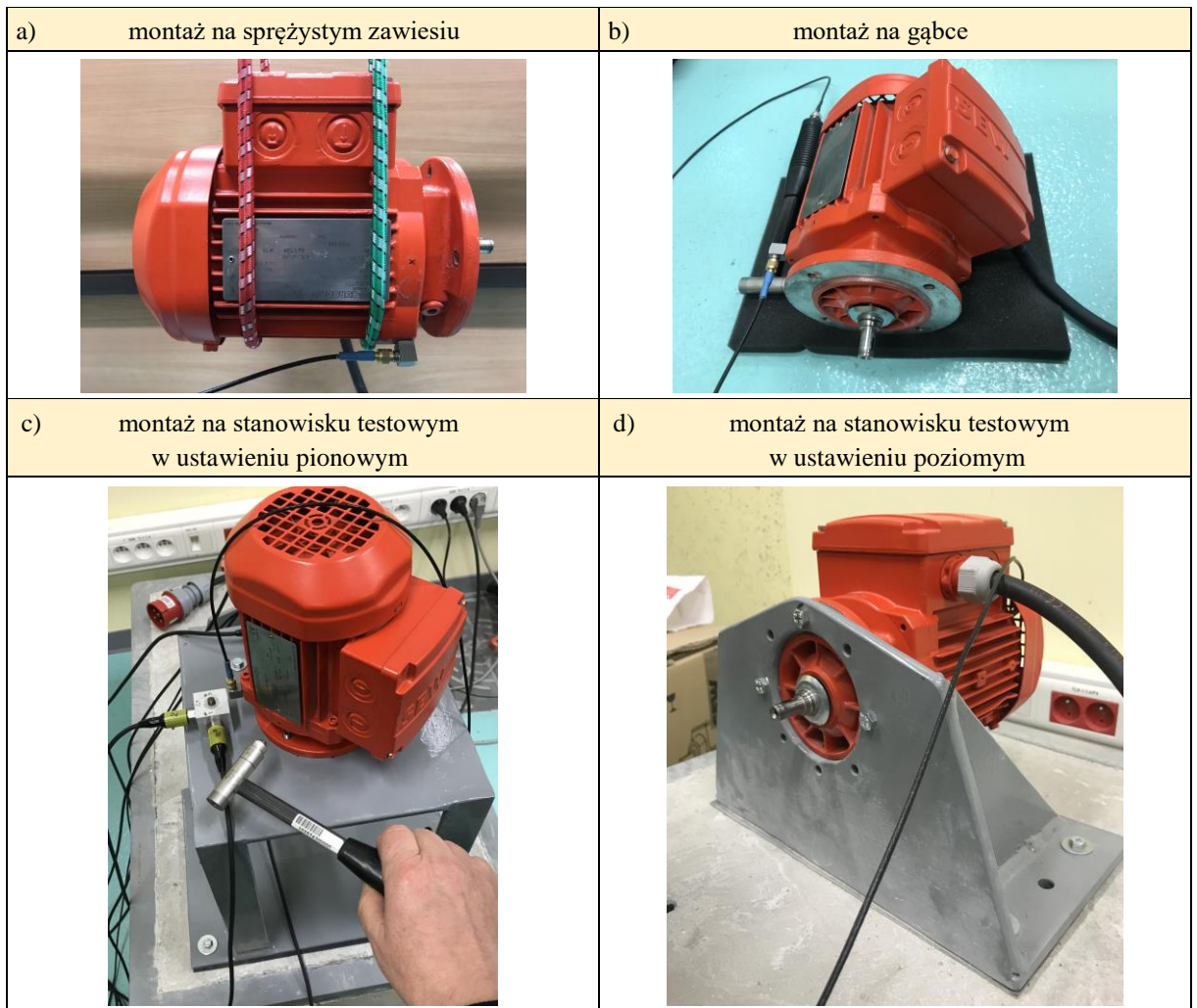
Badania prowadzone w ramach niniejszej pracy dotyczące wpływu sposobu posadowienia oraz montażu silnika na opracowanym i wykonanym prototypie stanowiska badawczego na postać drgań, były podstawą do sformułowania wniosków natury poznawczej i użytecznej.

Obiektem badań był trójfazowy asynchroniczny silnik elektryczny SEW DFR63S2/TH, którego parametry techniczne i widok lokalizacji przetwornika przyspieszeń drgań DYTRAN 3023M2 przedstawiono na rysunku 4.41.

parametr [jednostka]	wartość
moc znamionowa [kW]	0,18
napięcie zasilania (Δ / Y) [V]	230 / 400
prędkość obrotowa n_o [min^{-1}]	2720
$\cos \varphi$ [-]	0,88

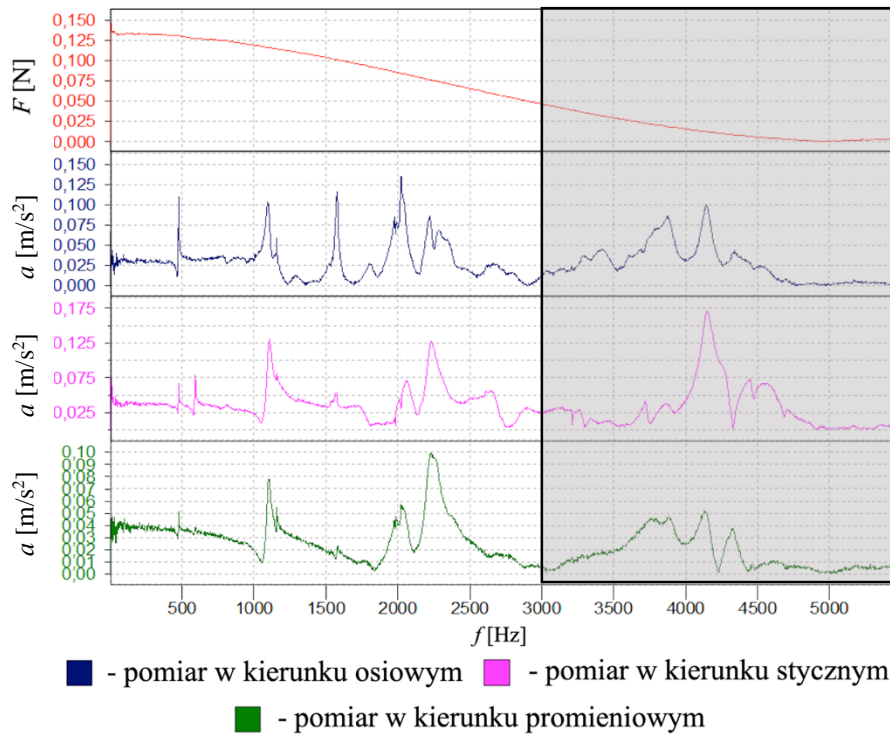
Rys. 4.41. Dane techniczne i widok silnika SEW DFR63S2/TH z zaznaczoną lokalizacją trójosiowego przetwornika przyspieszeń drgań DYTRAN 3023M2 [169].

Rozpatrzono 4 sposoby montażu silnika podczas prowadzenia testów: montaż na sprężystym zawieszaniu, montaż na gąbce oraz montaż na prototypie stanowiska testowego w ustawieniu poziomym i pionowym. Sposoby montażu przedstawiono na rysunku 4.42.

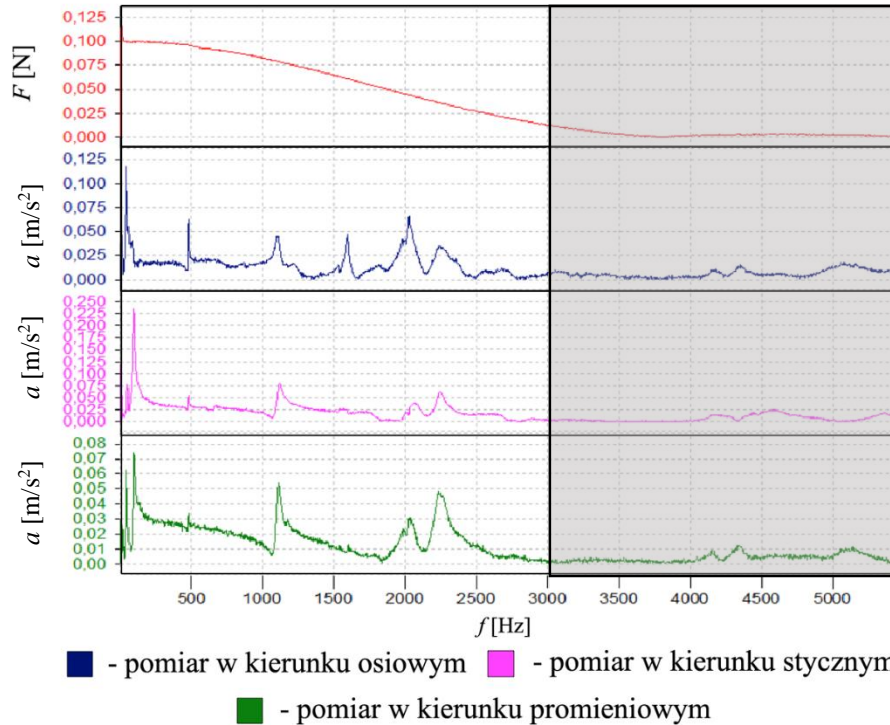


Rys. 4.42. Rozpatrywane sposoby montażu silnika SEW DFR63S2/TH w trakcie testów.

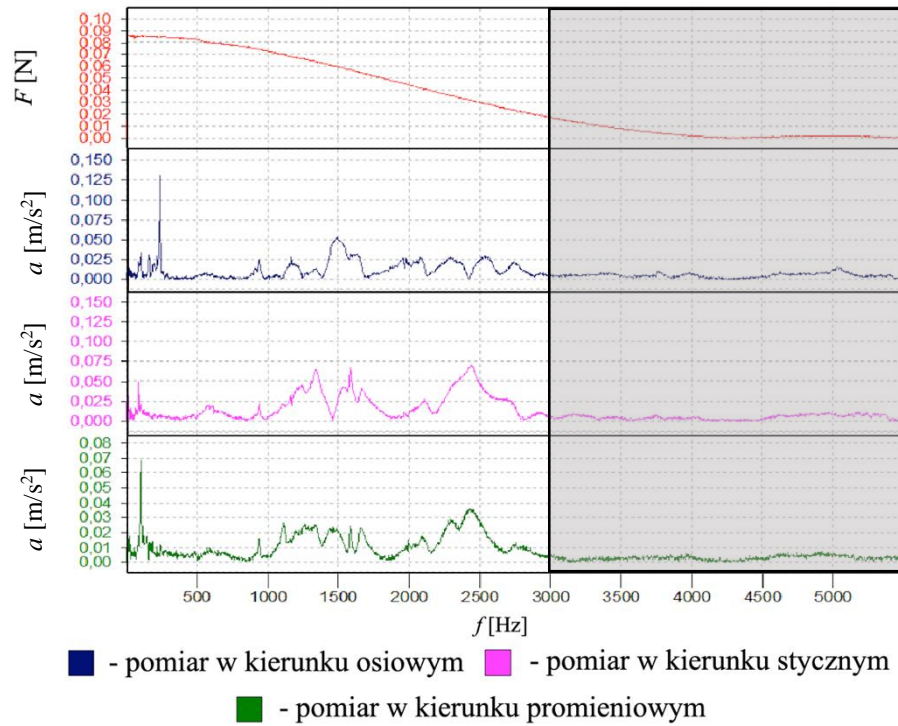
W pierwszej kolejności przeprowadzono sprawdzenie częstotliwości drgań własnych układu silnik-stanowisko, dla każdego ze sposobów montażu. Zastosowano wymuszenie impulsem siły pochodzącym z młotka modalnego PCB typ 086C03 z końcówką stalową. Wymuszenie impulsem siły było zadane zawsze w tym samym miejscu na tarczy łożyskowej (Rys. 4.41) niezależnie od sposobu montażu/posadowienia silnika. Odpowiedź układu była rejestrowana przez przetwornik DYTRAN 3023M2 zamontowany na przedniej tarczy łożyskowej silnika. Ze względu na powłokę ochronną silnika (farba) zakres wymuszenia siły obejmował pasmo do ok. 3,5 kHz. Mając to na uwadze zasadne jest analizowanie widm odpowiedzi testowanej struktury lub transmitancji składowych (częstotliwości drgań własnych) do ok. 3 kHz. Widma siły wymuszającej F oraz odpowiedzi układu zarejestrowanych na czujniku przyspieszeń drgań przedstawiono na rysunkach 4.43 - 4.46.



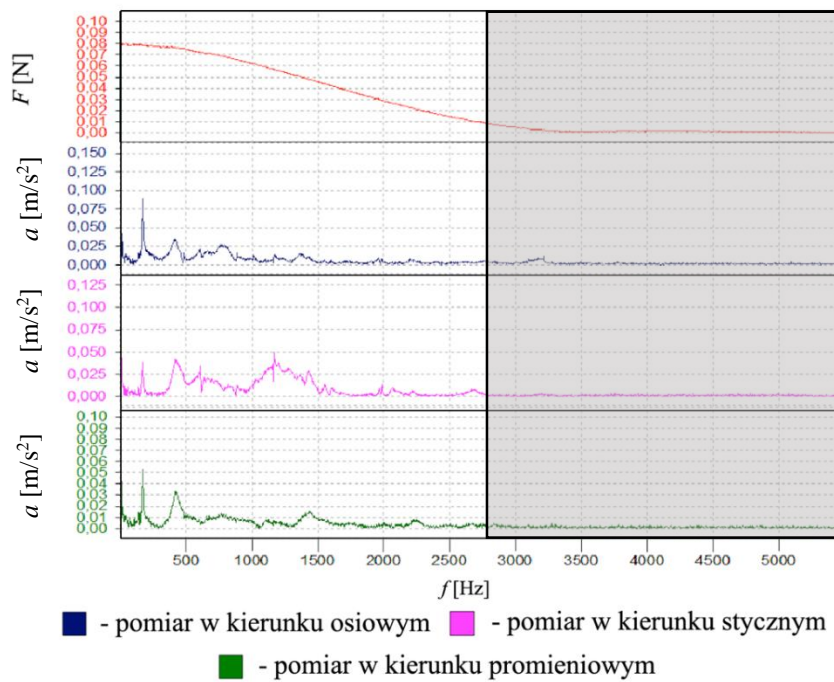
Rys. 4.43. Widma siły wymuszającej oraz odpowiedzi (przyspieszeń drgań) silnika SEW podwieszonoego na zawiesiu sprężystym.



Rys. 4.44. Widma siły wymuszającej oraz odpowiedzi (przyspieszeń drgań) silnika SEW posadowionego na gąbce



Rys. 4.45. Widma siły wymuszającej oraz odpowiedzi (przyspieszeń drgań) silnika SEW zamontowanego na stanowisku testowym w ustawieniu pionowym.



Rys. 4.46. Widma siły wymuszającej oraz odpowiedzi (przyspieszeń drgań) silnika SEW zamontowanego na stanowisku testowym w ustawieniu poziomym.

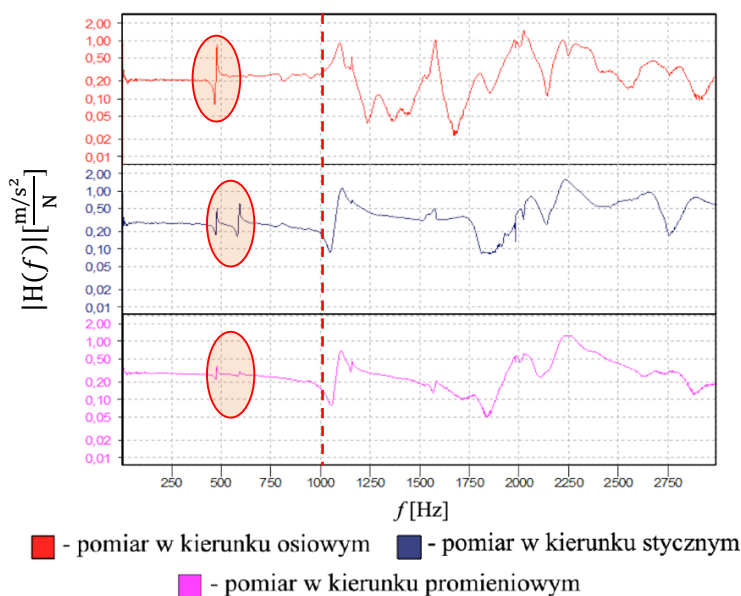
Widmo wymuszenia i odpowiedzi testowanej struktury było podstawą do wyznaczenia modułów transmitancji (inertancji) na podstawie zależności:

$$|H(f)| = \frac{A(f)}{F(f)}, \quad (4.22)$$

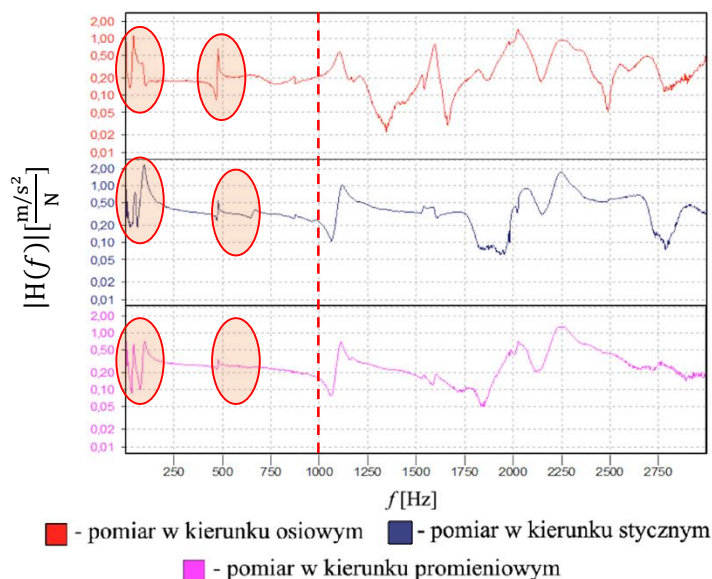
gdzie: $A(f) = \mathcal{F}\{A(t)\}$ – widmo odpowiedzi na wymuszenie impulsowe [m/s²]

$F(f) = \mathcal{F}\{F(t)\}$ – widmo siły wymuszającej [N].

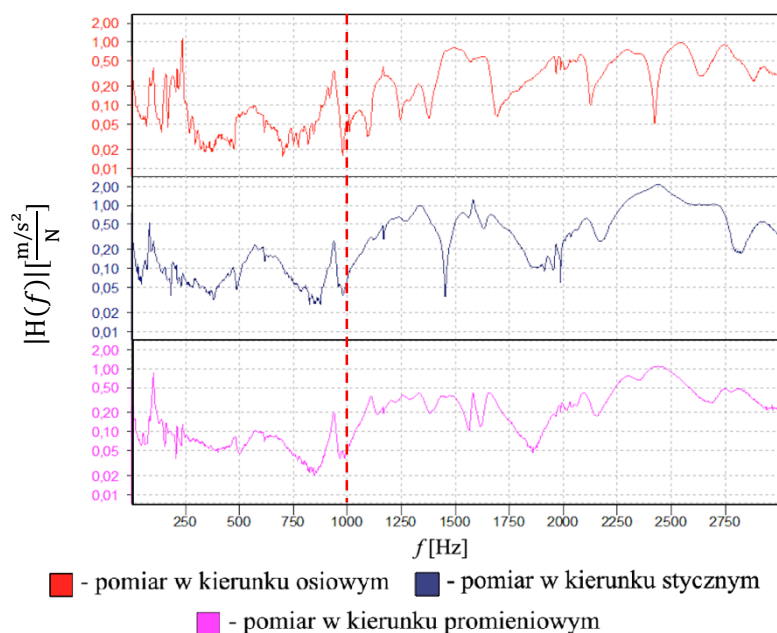
Wyznaczone moduły transmitancji dla każdego z wymienionych sposobów posadowienia/montażu silnika rozważonego do zastosowania podczas prowadzenia testów odbiorczych przedstawiono na rysunkach 4.47 - 4.50.



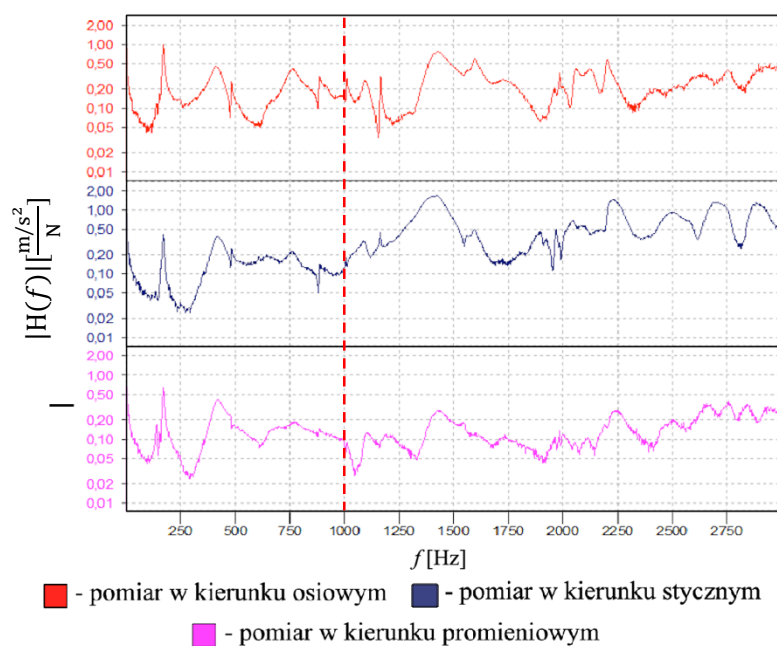
Rys. 4.47. Moduł transmitancji (inertancja) dla silnika SEW podwieszony na zawiesiu sprężystym.



Rys. 4.48. Moduł transmitancji (inertancja) dla silnika SEW posadowiony na gąbce.



Rys. 4.49. Moduł transmitancji (inertancja) dla silnika SEW zamontowanego na stanowisku testowym w ustawieniu pionowym.

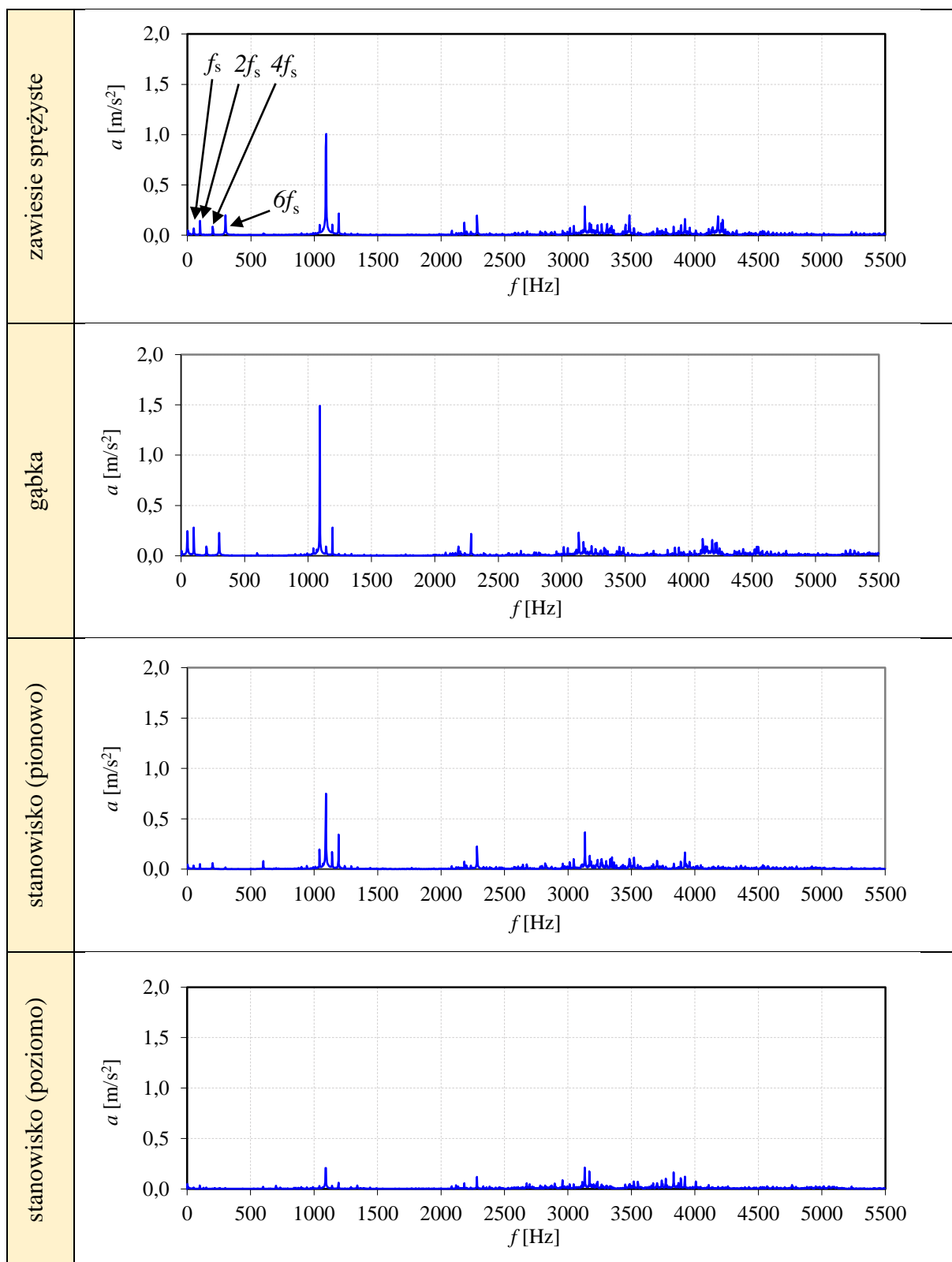


Rys. 4.50. Moduł transmitancji (inertancja) dla silnika SEW zamontowanego na stanowisku testowym w ustawieniu poziomym.

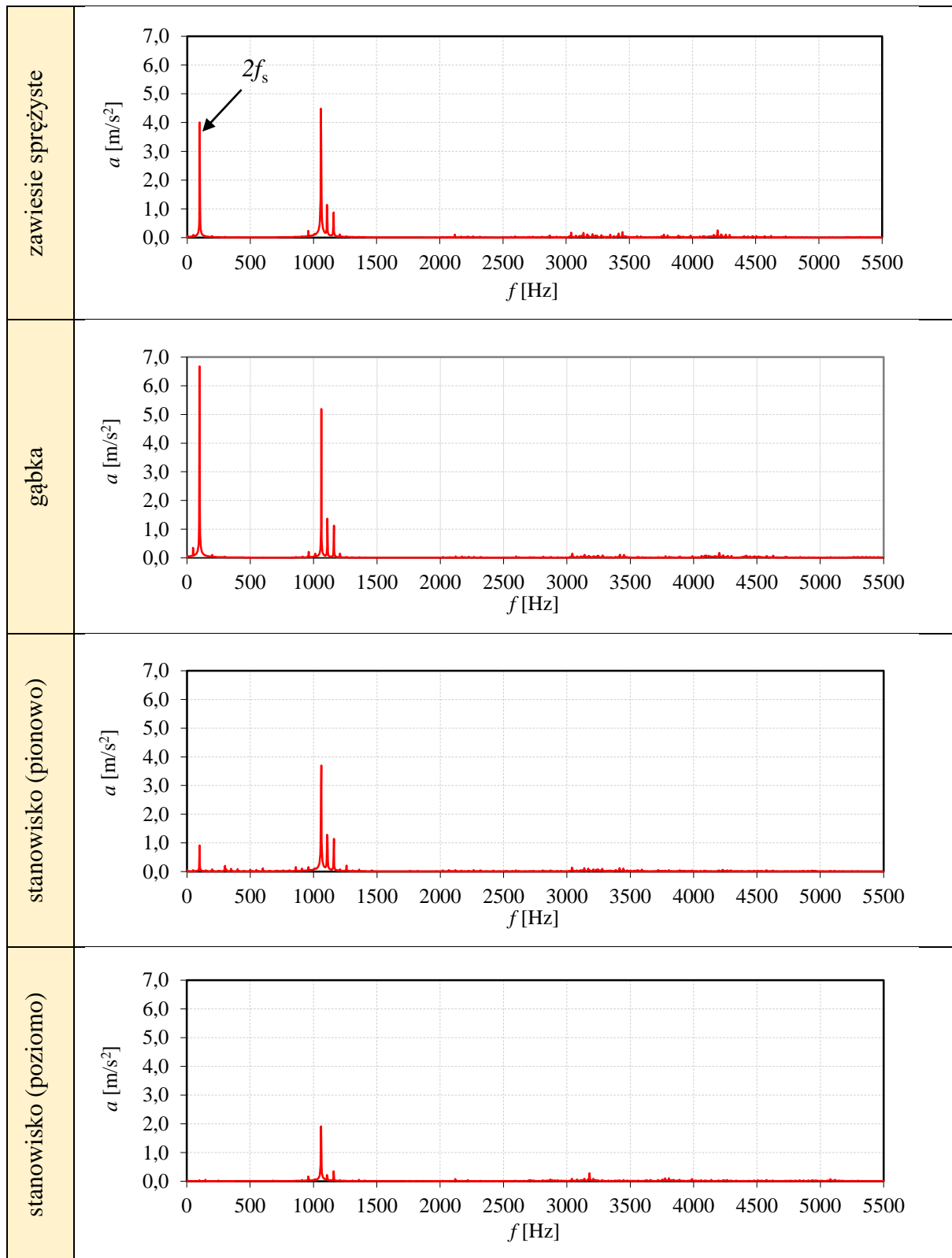
Z uwagi na najmniejszy wpływ warunków brzegowych na częstotliwości drgań własnych układu silnik-stanowisko, montaż na zawieszaniu sprężystym traktowano jako referencyjny dla pozostałych sposobów montażu. Dla tego typu montażu (zawieszanie) w niższym paśmie częstotliwości (do ok. 1 kHz) inertancja układu ma stałą wartość za wyjątkiem

lokalnych rezonansów występujących w okolicy 500-600 Hz. W przemyśle najczęściej stosowanym sposobem montażu silnika w trakcie testów odbiorczych jest posadowienie sprężyste. Moduł transmitancji silnika posadowionego na gąbce jest zbliżony do tego wyznaczonego dla zawiesia sprężystego, natomiast w paśmie do 1 kHz można zauważyć więcej obszarów rezonansowych (szczególnie w paśmie do 100 Hz). Zdecydowanie najwięcej stref rezonansowych można zaobserwować dla montażu silnika na stanowisku testowym w obu rozpatrywanych ustawieniach (H i V). Jednak niekoniecznie musi to oznaczać, że silniki nie powinny być testowane na stanowisku. Należy mieć świadomość w jakich pasmach częstotliwości występują lokalne rezonanse układu silnik-stanowisko. Detekcja wad silnika w pasmach lokalnych rezonansów **może** być łatwiejsza ze względu na wzmocnienie układu w tym miejscu, a w konsekwencji wyższą wrażliwość na powstałe wady. Możliwe jest również zastosowanie funkcji korekcyjnych sprowadzających charakterystykę układu silnik-stanowisko do postaci zbliżonej do charakterystyki referencyjnej.

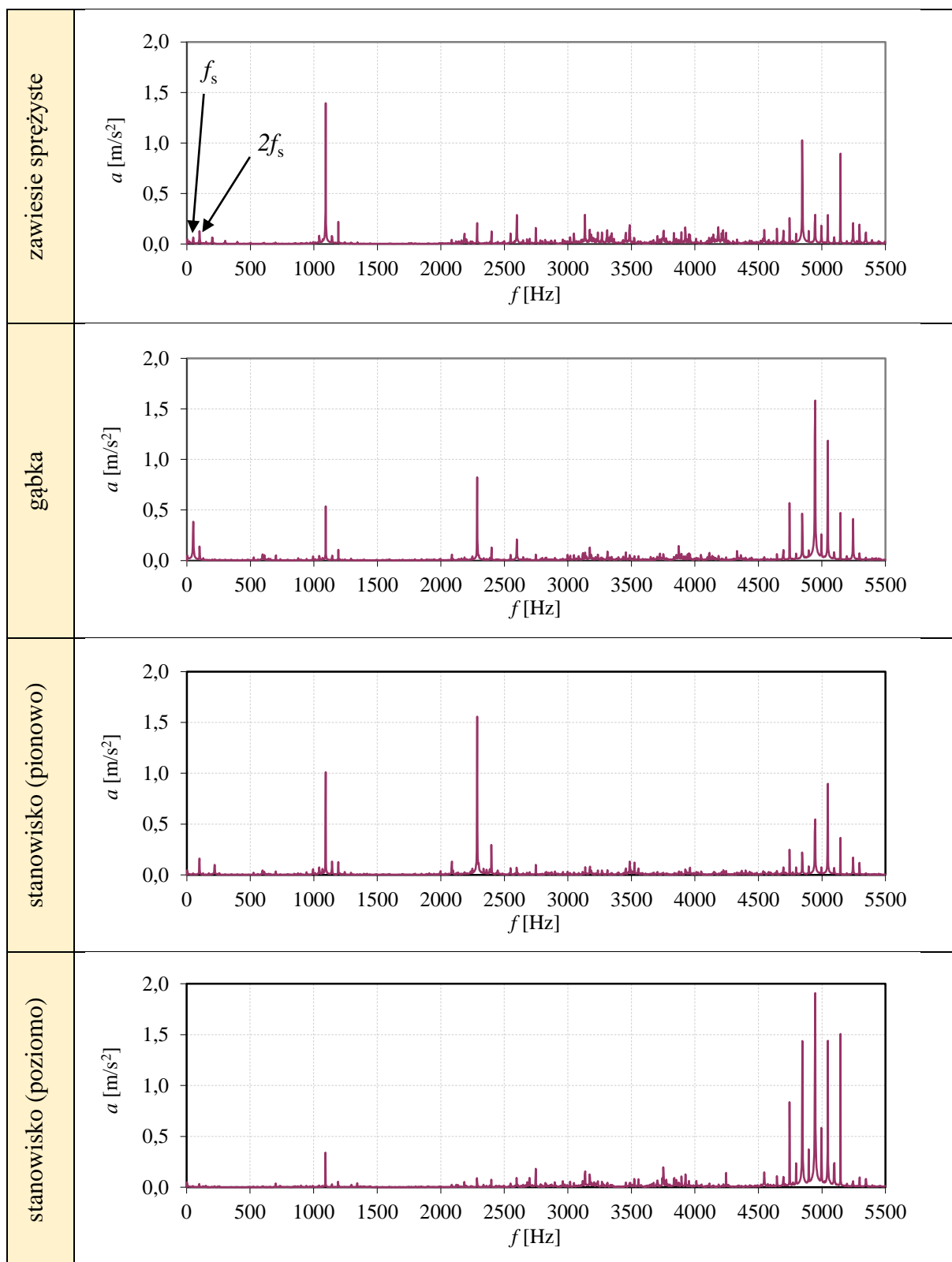
W ramach badań wykonano również porównania jakościowego widm przyspieszeń drgań silnika SEW dla wszystkich wymienionych wcześniej sposobach montażu w trakcie testów oraz dla trzech sposobów zasilania z sieci elektrycznej opisanych w rozdziale 4.2 (Rys. 4.10). Dla porównania na rysunkach 4.51 - 4.53 przedstawiono ww. widma przyspieszeń drgań w kierunku stycznym do korpusu.



Rys. 4.51. Porównanie widm przyspieszeń drgań w kierunku stycznym silnika SEW dla różnych sposobów montażu/posadowienia (zasilanie trójfazowe).



Rys. 4.52. Porównanie widm przyspieszeń drgań w kierunku stycznym silnika SEW dla różnych sposobów montażu/posadowienia (zasilanie jednofazowe).



Rys. 4.53. Porównanie widm przyspieszeń drgań w kierunku stycznym silnika SEW dla różnych sposobów montażu/posadowienia (zasilanie trójfazowe poprzez falownik).

Porównując wszystkie sposoby montażu silnika w trakcie testów można stwierdzić, że w widmie przyspieszeń drgań silnika posadowionego na gąbce widoczny jest wzrost

składowych w paśmie poniżej 1,5 kHz w stosunku do widma drgań silnika zamontowanego na zawiesiu sprężystym. Porównanie inertancji obu sposobów montażu/posadowienia potwierdza tę zależność. W praktyce pomiary posadowionego sprężystego silnika jest najczęściej wybieraną opcją. Pomiary drgań silnika przeprowadzone na stanowiskach w ustawieniach pionowym i poziomym wykazały ok. 2-krotny spadek składowych w paśmie poniżej 1,5 kHz. Różnice w widmach drgań wynikające z różnych sposobów zasilania silnika są zgodne z cechami widm wykazanymi w rozdziale 4.3.2. Można zatem stwierdzić, że sposób montażu silnika w trakcie testów może znacząco na wyniki pomiaru drgań. Mając to na uwadze, na tyle na ile jest to możliwe należy dążyć do kompensacji lokalnych wzmocnień/osłabień składowych sygnałów odpowiednio w pasmach rezonansowych lub antyrezonansowych będących konsekwencją zamntowania silnika na stanowisku badawczym/testowym.

5. WALIDACJA KLASYCZNYCH I NOWYCH METOD DETEKCJI WAD PRODUKCYJNYCH ASE

5.1. Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale przedstawiono walidację metod detekcji wad produkcyjnych ASE. W uzupełnieniu opisano syntetycznie zaimplementowane niekonwencjonalne metody parametryzacji sygnałów diagnostycznych oraz nowe metody. W celu sprawdzenia wrażliwości poszczególnych metod badawczych na wady produkcyjne przeprowadzono serię eksperymentów czynnych na dwóch rodzajach silników:

- badawczy silniku asynchronicznym GUNT PT500.19,
- czterech silnikach produkowanych seryjnie BESEL 2SIEK 63-4A2 - trzech nowych bez wad (pozyskanie parametrów referencyjnych) i jednego adaptowanego do eksperymentu czynnego⁸, w którym wprowadzano wady.

Wadami wprowadzanymi intencjonalnie były:

- niecentryczność wirnika względem stojana w zakresie: GUNT - od 0,00 do 0,20 mm (10 poziomów), BESEL - od 0,00 do 0,30 mm (3 poziomy co ok. 0,10 mm),
- niewyważenie wirnika w zakresie: GUNT - od 0 do 180 g·mm (3 poziomy co ok. 60 g·mm), BESEL - od 0 do 60 g·mm (1 poziom),
- zwiększenie rezystancji jednej fazy silnika o: 1Ω, 10Ω, 20Ω i 30Ω oraz całkowite odłączenie jednej z faz zasilających w trakcie pracy - dotyczy obu typów silników (GUNT i BESEL),
- wprowadzenie momentu hamującego - symulacja zwiększonych oporów ruchów np. w łożyskach - tylko dla silnika GUNT.

Wyniki badań przeprowadzonych na obu typach silników przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

⁸ Eksperyment czynny - stosowany do ustalenia relacji stan-sygnał w warunkach laboratoryjnych z kontrolowaną zmianą cech [183]

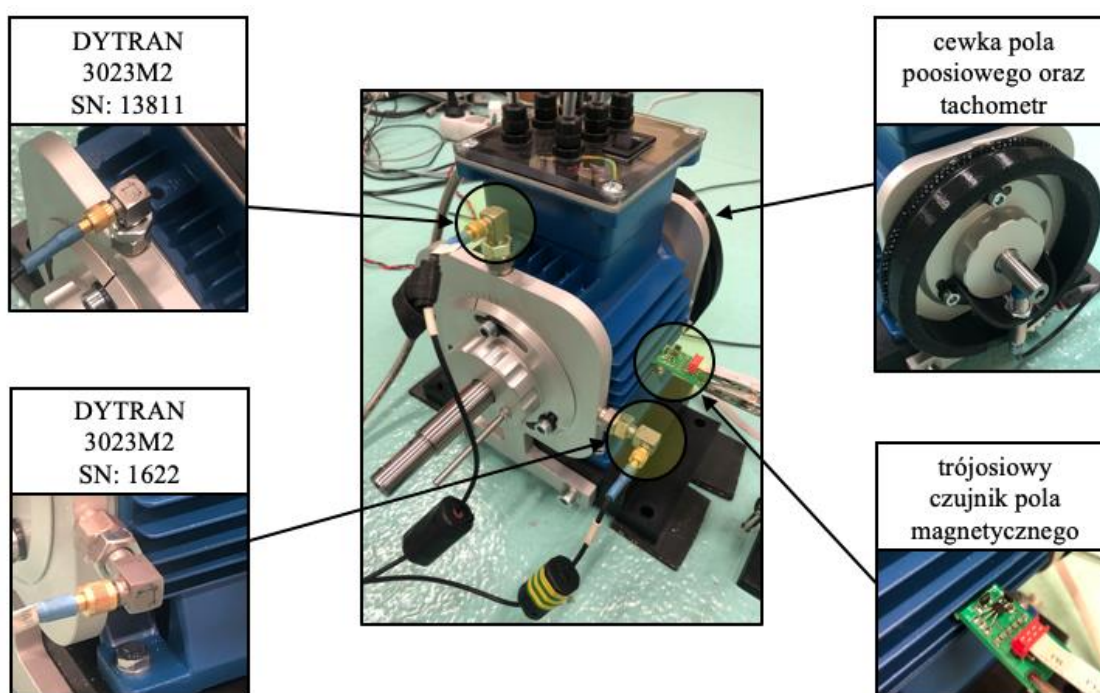
5.2. Weryfikacja metodyki - silnik badawczy GUNT PT500.19

5.2.1. Opis obiektu badań

Obiektem badań był asynchroniczny silnik elektryczny firmy ELECTRO ADDA o parametrach przedstawionych w tabeli 5.1.

Tab. 5.1. Parametry silnika GUNT PT500.19 (nr fabryczny C71-2 Electro Adda) [170].

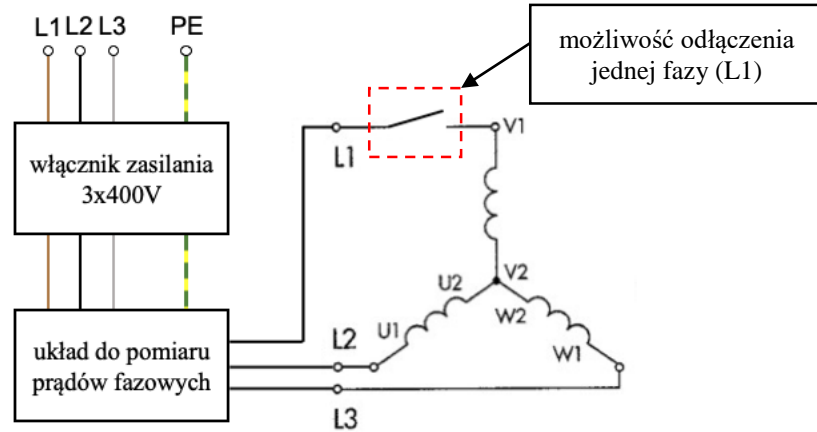
parametr	wartość [jednostka]
moc znamionowa	0,37 [kW]
napięcie zasilania Δ/Y	245/420 [V]
częstotliwość sieci	50-60 [Hz]
prędkość obrotowa	2825 [min^{-1}]
typ pracy	S1 (praca ciągła)



Rys. 5.1. Silnika badawczy GUNT PT500.19 wraz z zamontowanymi czujnikami.

Silnik o oznaczeniu fabrycznym C71-2 firmy Electro Adda został zmodyfikowany przez firmę GUNT z Hamburga i jako silnik badawczy nadano mu oznaczenie GUNT PT500.19. Wprowadzone przez firmę GUNT modyfikacje przedniej i tylnej tarczy łożyskowej umożliwiły ustawienie niecentryczności wirnika względem uzwojeń stojana w zakresie od 0,00 mm do 0,20 mm (regulacja 10-stopniowa). Natomiast modyfikacja układu zasilania dała możliwość

całkowitego odłączenia jednej z faz zasilających (L1). Uproszczony schemat podłączenia silnika do sieci GUNT elektrycznej przedstawiono na rysunku 5.2. W trakcie badań silnik odizolowano od podłoża gumowymi podkładkami w celu separacji od drgań przenoszonych drogą materiałową.



Rys. 5.2. Sposób podłączenia silnika GUNT PT500.19 do sieci elektrycznej.

5.2.2. Opis systemu pomiarowego i układu zasilania

Schemat połączeń elementów systemu stosowanego podczas badań silnika badawczego GUNT zaprezentowano na rysunku 5.3. Sygnały przyspieszeń drgań rejestrowano dwoma trójosiowymi akcelerometrami DYTRAN 3023M2 zamontowanymi na przedniej tarczy łożyskowej silnika, ustawionymi względem siebie pod kątem 90 stopni. Sygnały zostały wstępnie skondycjonowane przy pomocy kondycjonera sygnałów AVC1600D (zasilanie przetworników pracujących w standardzie ICP oraz wstępne wzmocnienie), a następnie odfiltrowane przez hybrydowe filtry dolnoprzepustowe (antyaliasingowe) Krohn-Hite 3342. Wprowadzenie filtrów antyaliasingowych pozwoliło na uniknięcie wprowadzenia zakłóceń w sygnałach drganiowych wynikających z niespełnienia kryterium Nyquista (najwyższa częstotliwość sygnału poddawanego próbkowaniu f_{sig} nie może być większa niż $\frac{1}{2}$ częstotliwości próbkowania f_p):

$$f_{sig} \leq \frac{f_p}{2}. \quad (5.1)$$

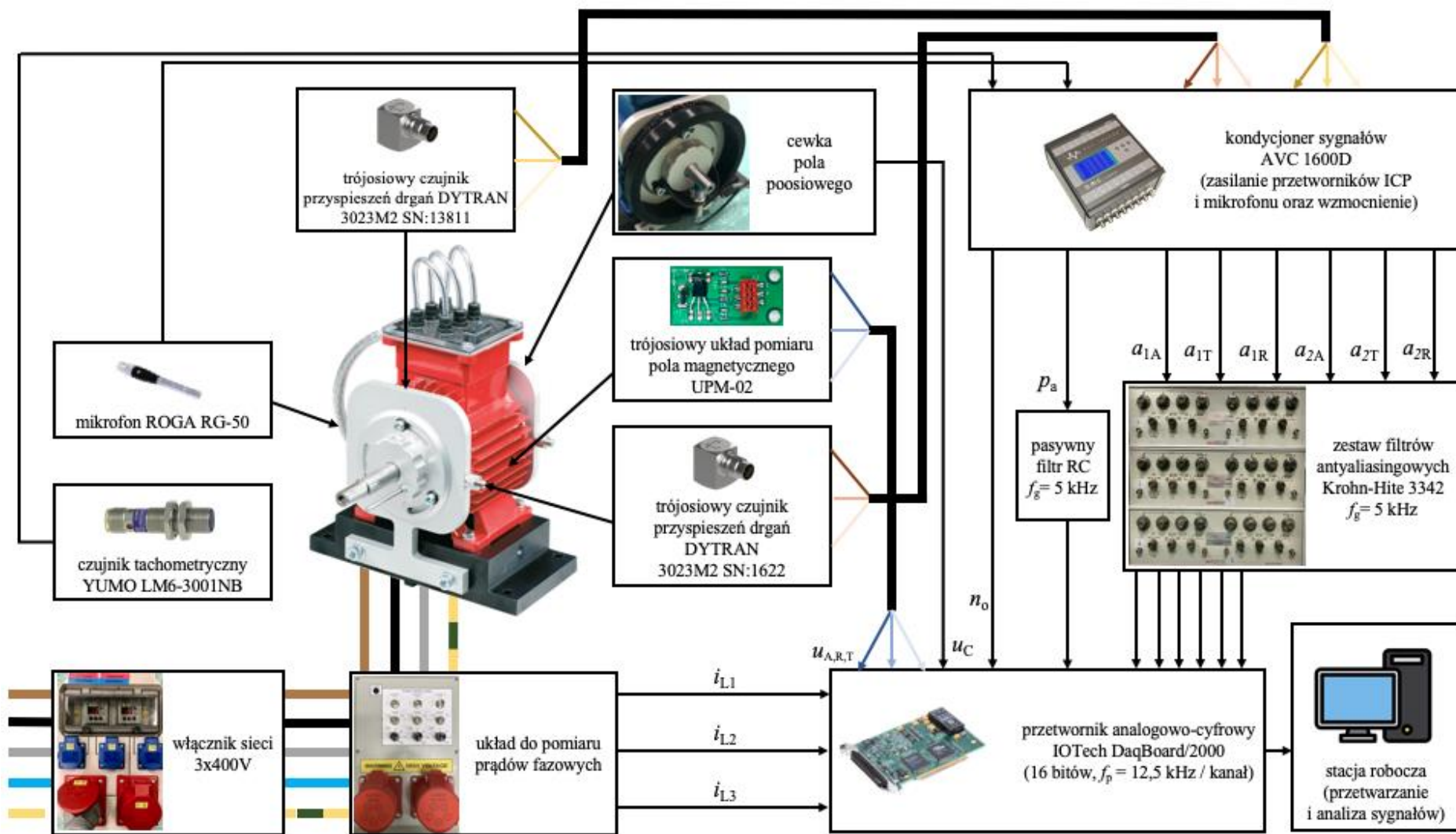
Do synchronicznej akwizycji sygnałów użyto 16 kanałowego przetwornika analogowo-cyfrowego firmy IOtech model: DaqBoard/2000. Zastosowano 16 bitową kwantyzację

sygnałów, a częstotliwość próbkowania ustawiono na 12,5 kHz na każdy kanał. Mając na uwadze zależność opisaną wzorem 5.1 częstotliwość sygnału poddawanego próbkowaniu nie powinna przekraczać 6,25 kHz [35]. Uwzględniając tłumienie sygnału (w paśmie przejściowym) częstotliwość graniczna f_g filtrów antyaliasingowych (dolnoprzepustowych Krohn-Hite 3342) ustawiono na 5 kHz. Tory rejestracji przyspieszeń drgań zostały skalibrowane z użyciem kalibratora PCB 394C06 (częstotliwość kalibratora 159,2 Hz i $a_{RMS, KAL} = 9,8 \text{ m/s}^2$). W dalszej części pracy dla uproszczenia będzie stosowany następujący opis przetworników: przetwornik 1 - zamontowany w górnej części przedniej tarczy łożyskowej (pionowo), przetwornik 2 - zamontowany w bocznej części tarczy łożyskowej (poziomo).

Pomiar hałasu realizowano przy pomocy mikrofonu ROGA RG-50, umieszczonego w odległości 250 mm od środkowej części korpusu silnika. Sygnał został poddany wstępnemu kondycjonowaniu przez kondycjoner AVC 1600D (zasilanie i wstępne wzmocnienie) oraz filtracji antyaliasingowej filtrem pasywnym RC o częstotliwości granicznej $f_g \approx 5 \text{ kHz}$. Tor pomiaru hałasu został skalibrowany przy użyciu kalibratora akustycznego Sonopan KA-10 ($f_{KAL} = 1 \text{ kHz}$, $L_{KAL} = 94 \text{ dB}$). Kondycjonowaniu przez urządzenie AVC 1600D podlegał również rejestrowany sygnał prędkości obrotowej wirnika pochodzący z czujnika wiropędowego (typ LM6-3001NB firmy YUMO), dający jeden impuls na obrót wirnika.

Pomiary prądów fazowych dokonano przy użyciu układu pomiarowego opracowanego i wykonanego przez autora pracy, bazującego na przekładnikach prądowych oraz wzmacniaczu operacyjnym AD8644ARZ. Układ pomiarowy posiada możliwość ręcznego nastawienia wzmocnienia (odrębnie na każdej z faz) oraz usuwanie składowej stałej. Widok układu przedstawiono na rysunku 5.4. Załączenia zasilania silnika dokonywano przy użyciu włącznika sieciowego (Rys. 5.3) znajdującego się przed układem pomiaru prądów fazowych.

Pomiary pola magnetycznego (10 mm od środka korpusu) silnika GUNT rejestrowano sondą z trzema przetwornikami AH49E wchodzących w skład układu UPM-02. Układ ten umożliwiał pomiary pola magnetycznego w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (A - osiowym, T - stycznym i R - promieniowym do korpusu). Pomiar poosiowy pola magnetycznego realizowano przy pomocy cewki obejmującej wirnik w pobliżu tarczy łożyskowej (Rys. 5.1). Układy pomiaru prądów fazowych oraz pola magnetycznego UPM-02 były zasilane bateryjnie (źródło napięcia stałego 5V), aby uniknąć zakłóceń sieciowych.



Rys. 5.3. Schemat połączeń układu pomiarowego wykorzystany w testach silnika GUNT PT500.19

a)



b)



Rys. 5.4. Widok panelu przedniego układu do pomiaru prądów fazowych (a) oraz widok wnętrza układu (b).

Do akwizycji sygnałów diagnostycznych zastosowano przetwornik analogowo-cyfrowy DaqBoard/2000 firmy IOtech, Inc. Podstawowe parametry tego przetwornika zaprezentowano w tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Podstawowe parametry karty rejestracji danych DaqBoard/2000 firmy IOtech [191]

parametr	wartość
rozdzielczość przetwornika A/C	16-bitów
częstotliwość próbkowania	200 [kHz] (łącznie dla wszystkich kanałów)
ilość kanałów	16 kanałów single-ended lub 8 kanałów różnicowych
ilość wejść/wyjść cyfrowych	40

W procesie akwizycji sygnałów wykorzystano 15 z 16 dostępnych kanałów przetwornika ADC. Opis wykorzystanych wejść przetwornika zamieszczono w tabeli 5.3.

Tab. 5.3. Opis wykorzystanych wejść przetwornika ADC DaqBoard/2000.

nr kanału	wielkość mierzona	symbol [jednostka]
1	przyspieszenia drgań górnej części przedniej pokrywy łożyskowej w kierunku osiowym (A)	a_{1A} [m/s ²]
2	przyspieszenia drgań górnej części przedniej pokrywy łożyskowej w kierunku stycznym (T)	a_{1T} [m/s ²]
3	przyspieszenia drgań górnej części przedniej pokrywy łożyskowej w kierunku promieniowym (R)	a_{1R} [m/s ²]
4	przyspieszenia drgań bocznej części przedniej pokrywy łożyskowej w kierunku osiowym (A)	a_{2A} [m/s ²]
5	przyspieszenia drgań bocznej części przedniej pokrywy łożyskowej w kierunku stycznym (T)	a_{2T} [m/s ²]
6	przyspieszenia drgań bocznej części przedniej pokrywy łożyskowej w kierunku promieniowym (R)	a_{2R} [m/s ²]
7	ciśnienie akustyczne	p_a [Pa]
8	sygnał tachometryczny	n_o [min ⁻¹]
9	prąd fazy L1	i_{L1} [A]
10	prąd fazy L2	i_{L2} [A]
11	prąd fazy L3	i_{L3} [A]
12	sygnał napięciowy z czujnika pola magnetycznego w kierunku osiowym	u_A [mV]
13	sygnał napięciowy z czujnika pola magnetycznego w kierunku promieniowym	u_R [mV]
14	sygnał napięciowy z czujnika pola magnetycznego w kierunku stycznym	u_T [mV]
15	sygnał napięciowy z cewki pola poosiowego	u_C [mV]

a_{XY} - sygnał przyspieszeń drgań (X - numer czujnika (X = 1, 2), Y - kierunek pomiaru (A, T, R)).

Wszystkie sygnały diagnostyczne były rejestrowane synchronicznie. Czas każdej rejestracji wynosił 180 sekund. Przyjęcie stosunkowo długiej sekwencji rejestrowanych sygnałów wynikało z podjętej próby zastosowania techniki MSA (uśredniania multisynchronicznego) i określenia liczby uśrednień niezbędnej do uzyskania zadowalającego rezultatu dekompozycji. Silnik badano w stanie bez obciążenia (praca na biegu jałowym). Ten typ testów opisano w normie PN-EN IEC 60034-23 jako testy bez obciążenia (ang. *no-load*). Wyjątek stanowiły pomiary prowadzone z symulacją zwiększonych oporów ruchu (układ pasywny). Należy dodać, że silnik w trakcie testów nie był połączony z odbiornikiem energii/układem obciążającym (np. magnetycznym, elektrycznym itp.), dzięki czemu pozyskane sygnały dotyczą tylko testowanego silnika i są wolne od dodatkowych składowych mogących się pojawić w przypadku ich stosowania.

5.2.3. Wyniki badań

5.2.3.1. Detekcja wad na podstawie podstawowych pomiarów i analizy drgań

W ramach W celu zachowania kompletności opisu miar parametryzujących drgania poniżej podano ich definicje. W parametryzacji sygnałów drganiowych dokonano wyznaczenia wartości skutecznych (RMS) przyspieszeń a_{RMS} i prędkości v_{RMS} [171]:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt}, \quad (5.2)$$

gdzie: $x(t)$ - sygnał poddawany parametryzacji (np. $a(t)$ lub $v(t)$),

T - czas uśredniania, gdzie $T = t_2 - t_1$,

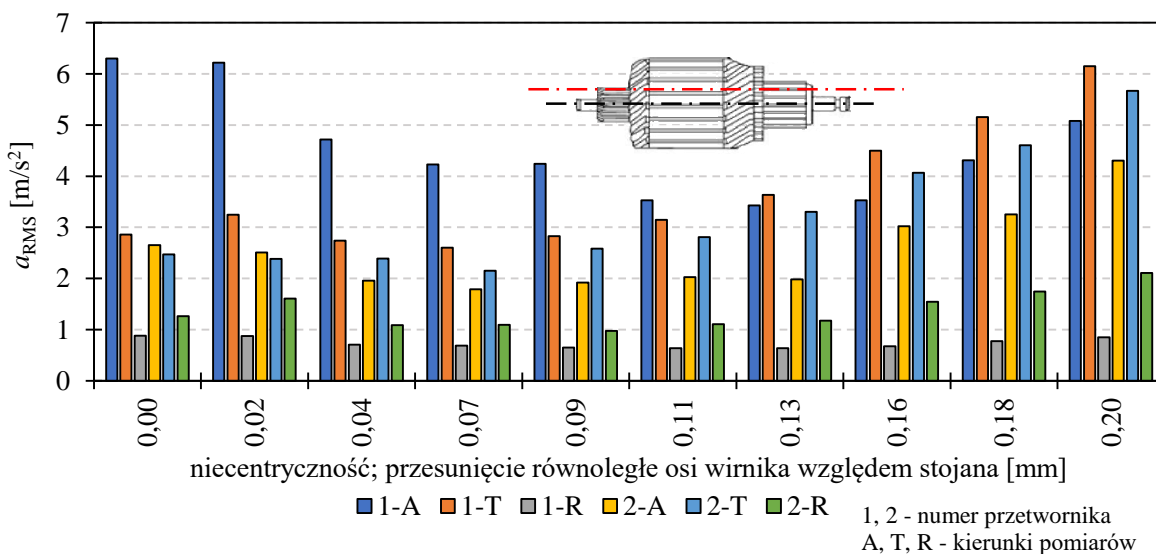
t_1, t_2 - początek i koniec pomiaru.

Wyznaczono również wartości szczytowe (PEAK) i średnie (AVG) sygnałów drganiowych [171]:

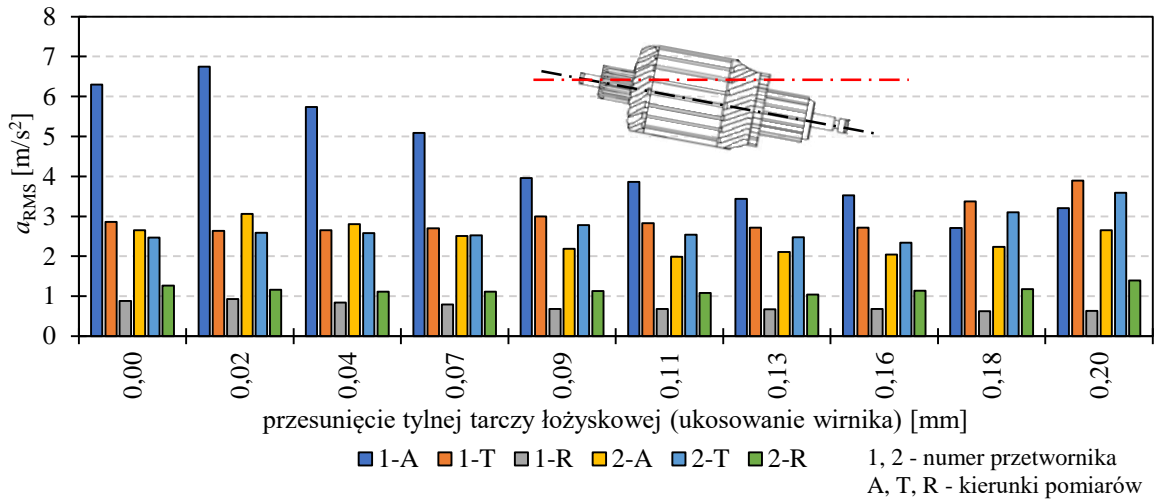
$$x_{AVG} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} |x(t)| dt, \quad (5.3)$$

$$x_{PEAK} = \max\{|x(t)|\} \text{ dla } t_1 < t < t_2. \quad (5.4)$$

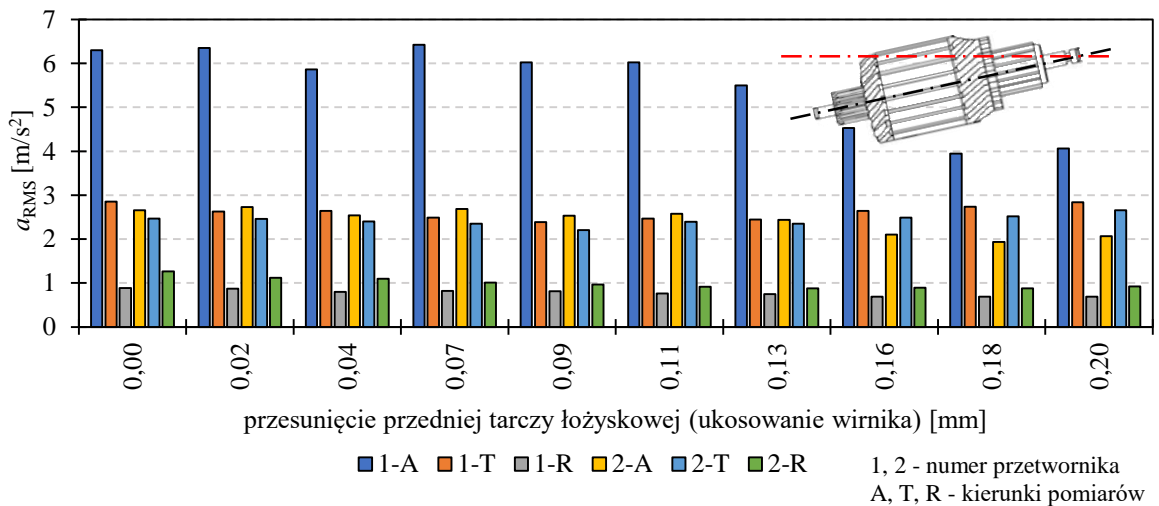
W pierwszej kolejności dokonano sprawdzenia wrażliwości miar parametryzujących na wprowadzane wady. Wyniki parametryzacji przyspieszeń i prędkości drgań w aspekcie niecentryczności wirnika względem stojana rejestrowanych w punktach pomiarowych 1 i 2 oraz dla kierunków pomiarowych: osiowego (A), stycznego (T) i promieniowego (R) przedstawiono na rysunkach 5.5-5.10.



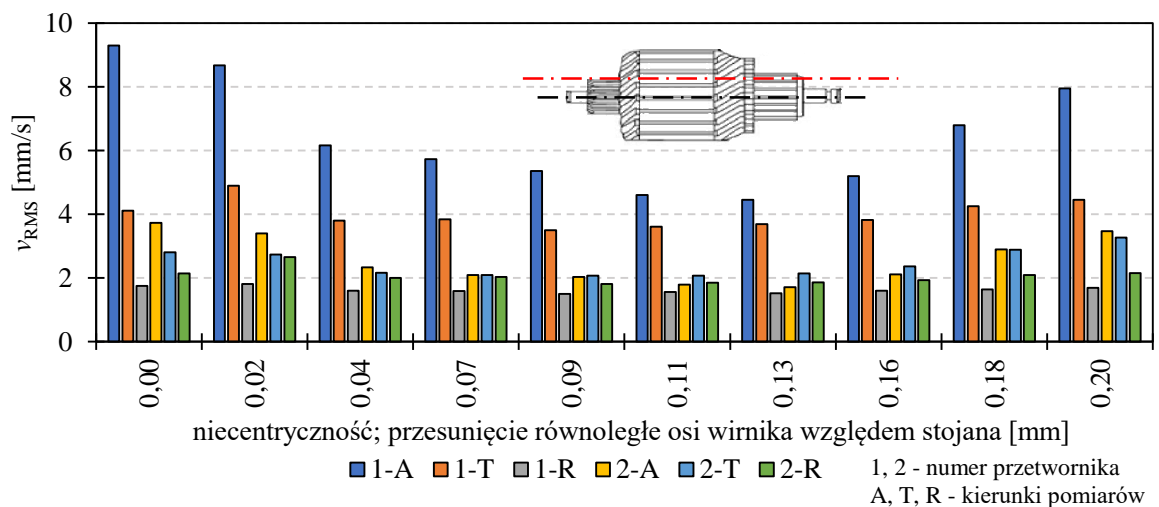
Rys. 5.5. Wyniki pomiarów wartości skutecznych przyspieszeń drgań silnika GUNT (równoległe przesunięcie wirnika względem stojana).



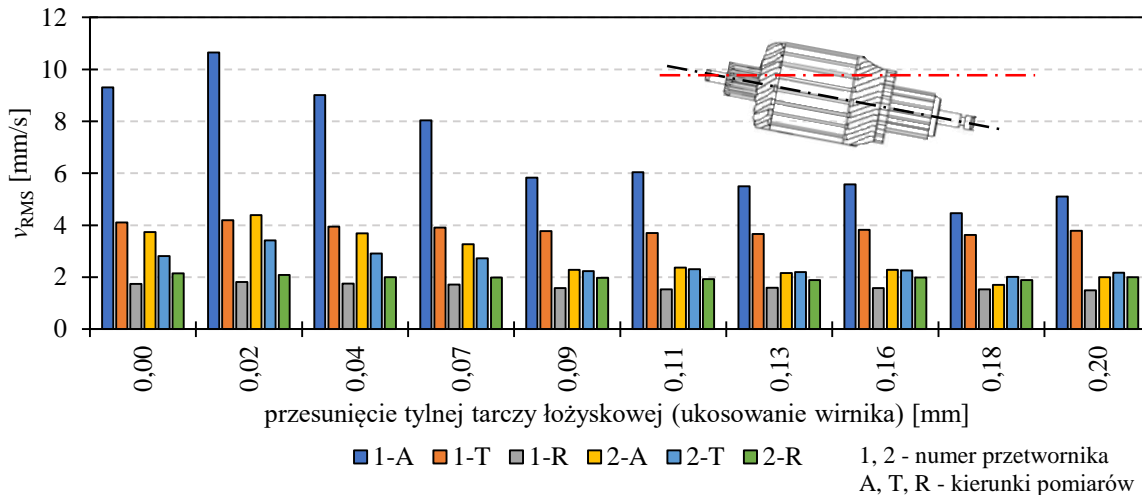
Rys. 5.6. Wyniki pomiarów wartości skutecznych przyspieszeń drgań silnika GUNT przy zukosowaniu osi wirnika względem podłużnej osi symetrii stojana (przesunięcie tylnej tarczy łożyskowej).



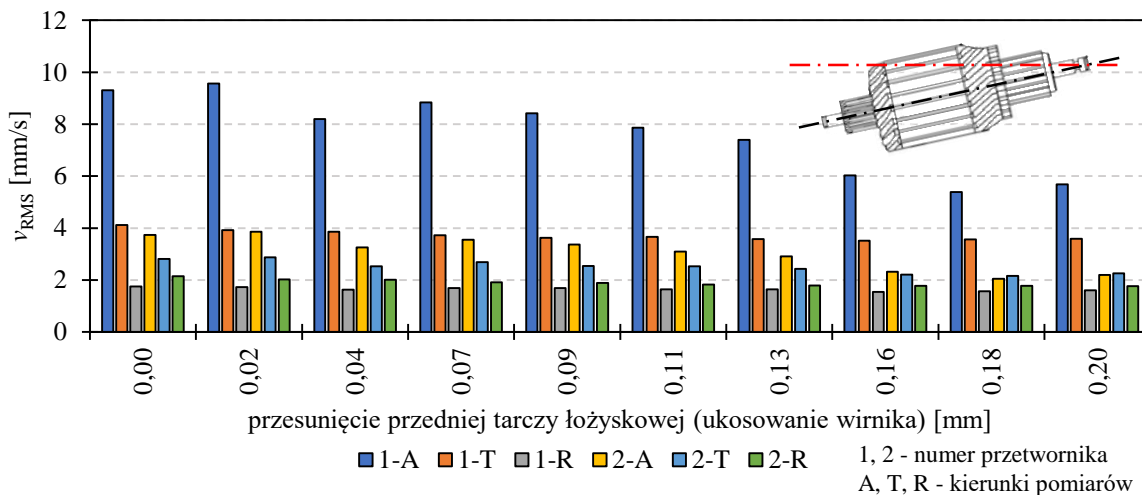
Rys. 5.7. Wyniki pomiarów wartości skutecznych przyspieszeń drgań silnika GUNT przy zukosowaniu osi wirnika względem podłużnej osi symetrii stojana (przesunięcie przedniej tarczy łożyskowej).



Rys. 5.8. Wyniki pomiarów wartości skutecznych prędkości drgań silnika GUNT (równoległe przesunięcie wirnika względem stojana).



Rys. 5.9. Wyniki pomiarów wartości skutecznych prędkości drgań silnika GUNT przy zukosowaniu osi wirnika względem podłużnej osi symetrii stojana (przesunięcie tylnej tarczy łożyskowej).



Rys. 5.10. Wyniki pomiarów wartości skutecznych prędkości drgań silnika GUNT przy zukosowaniu osi wirnika względem podłużnej osi symetrii stojana (przesunięcie przedniej tarczy łożyskowej).

Warto w tym miejscu nadmienić, że aby miara mogła być uznana za symptom diagnostyczny wartości tej miary powinny być współzmiennicze z szeroko rozumianą „wielkością” wady lub rozwojem uszkodzenia. Najlepiej, aby zależność tą można było opisać funkcją monotoniczną. Analizując w tym kontekście wyniki zamieszczone na rysunkach 5.5 - 5.10 można sformułować poniższe wnioski:

- Detekcję niecentryczności wirnika względem stojana (równoległe przesunięcie osi) można wykryć na podstawie pomiarów przyspieszeń drgań (możliwa jest w zakresie 0,09-0,20 mm). W przypadku mniejszych przesunięć osi (poniżej 0,09 mm) nie można potwierdzić zależności z przyspieszeń drgań.
- Niecentryczność tego typu (w zakresie 0,09-0,20 mm) najlepiej odwzorowują pomiary a_{RMS} w punktach/kierunkach 1T, 2T i 2R. Zmiany spowodowane niecentrycznością są

ponad dwukrotne (Rys. 5.5). Pomiary przyspieszeń drgań w pozostałych przypadkach nie są współzmiennicze z przesunięciem równoległym osi wirnika względem osi stojana. W przypadku pomiarów prędkości drgań jedynie prowadzenie pomiarów v_{RMS} w punkcie 2T umożliwia wykrycie tego typu wady (Rys. 5.58).

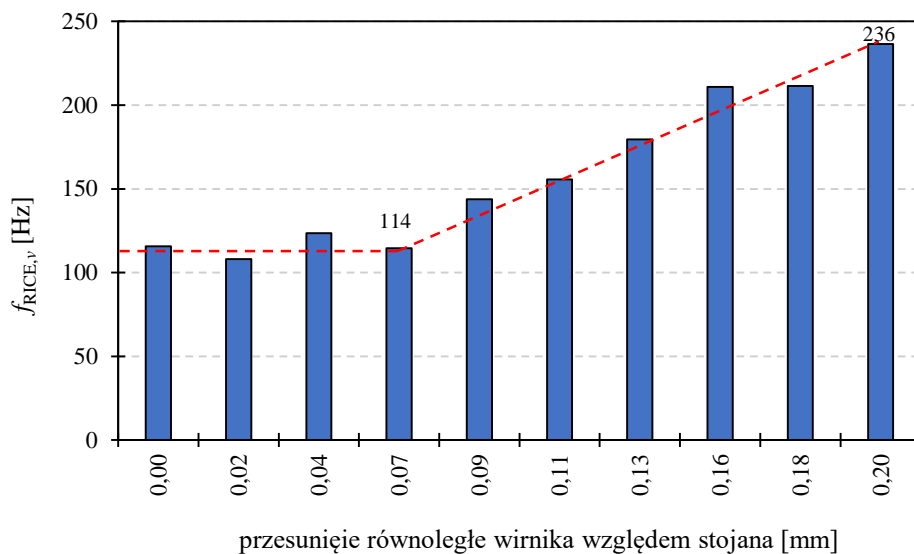
- Detekcja ukosowania wirnika względem osi stojana zarówno na podstawie pomiarów przyspieszeń jak i prędkości drgań jest bardzo ograniczona (Rys. 5.6, 5.7, 5.9 i 5.10). Wartości a_{RMS} i v_{RMS} maleją wraz ze wzrostem przesunięcia jednej z tarcz łożyskowych (ukosowanie osi). Zmiany te nie przekraczają 20%.

Można zatem stwierdzić, że najbardziej czułym symptodem na zmiany niecentryczności (równoległego przesunięcia wirnika względem stojana) jest pomiar a_{RMS} w kierunku stycznym

W ramach eksperymentu czynnego związanego z wprowadzaniem niecentryczności wyznaczono również częstotliwość Rice'a na podstawie sygnału prędkości drgań w paśmie do 1 kHz. Miara ta pozwala na określenie globalnej (średniej) częstotliwości procesu drganiowego w wybranym paśmie częstotliwości [4, 34]. Częstotliwość Rice'a $f_{RICE,v}$ można wyznaczyć korzystając ze wzoru:

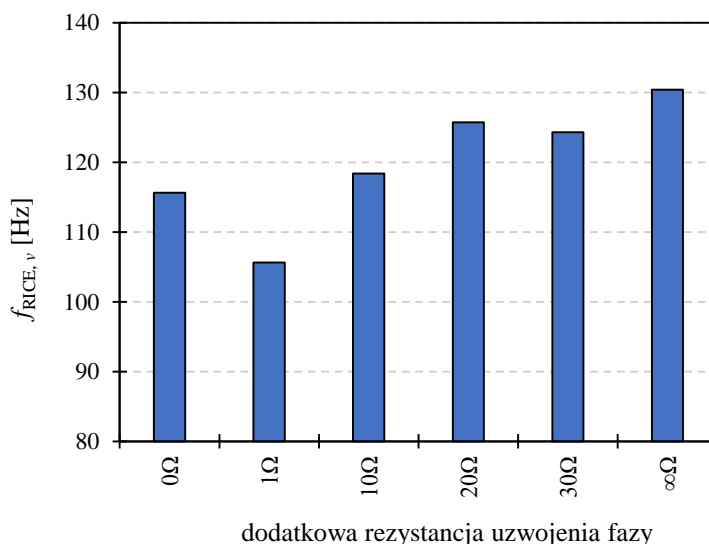
$$f_{RICE,v} = \frac{1}{2\pi} \frac{a_{RMS}}{v_{RMS}} [\text{Hz}]. \quad (5.5)$$

Częstotliwości Rice'a wykazała dużą wrażliwość na zmiany niecentryczności dla pomiarów wykonywanych w kierunku stycznym (wzrost średniej częstotliwości procesu). Może to być związane m.in. z większym udziałem energetycznym wyższych harmonicznyc f_o i/lub f_s . Z wyników zaprezentowanych na rysunku 5.13 wynika, że pomiar $f_{RICE,v}$ można zastosować do detekcji wartościowania niecentryczności (przesunięcia równoległego wirnika względem stojana) w zakresie 0,07 - 0,20 mm (dwukrotny wzrost $f_{RICE,v}$).



Rys. 5.11. Zależność częstotliwości Rice'a od zwiększania równoległego przesunięcia wirnika względem stojana (niecentryczności); $f_{RICE,\nu}$ wyznaczono dla sygnału prędkości drgań w paśmie do 1 kHz rejestrowanych na przetworniku 1 w kierunku stycznym (T).

Zmiany w częstotliwości Rice'a zauważono również w przypadku zmian rezystancji jednego z uzwojeń - występował stopniowy wzrost $f_{RICE,\nu}$ wyznaczonej dla pomiaru na przetworniku 1 w kierunku stycznym w miarę zwiększania rezystancji (Rys. 5.12).



Rys. 5.12. Wykres zależności częstotliwości Rice'a od zwiększania rezystancji uzwojenia fazy L3 dla pomiarów v_{RMS} rejestrowanych na czujniku 1 w kierunku stycznym.

Detekcję i ocenę niewyważenia wirnika najlepiej prowadzi się na podstawie amplitudy składowej o częstotliwości obrotowej f_0 (sygnał prędkości lub przyspieszeń drgań). W tabeli 5.4 zamieszczono oprócz wartości skutecznej składowej obrotowej wartości a_{PEAK} , a_{AVG} , a_{RMS}

(w paśmie do 5 kHz) i v_{RMS} (w paśmie do 1 kHz) wyznaczone dla różnych wartości niewyważenia wirnika silnika GUNT. Stopniowe wprowadzanie niewyważenia wpłynęło zgodnie na każdą z analizowanych miar (a_{RMS} , a_{PEAK} , a_{AVG} oraz v_{RMS}). Wartości tych miar wzrastały wraz ze zwiększaniem się niewyważenia wirnika silnika GUNT PT500.19. Stopniowe wprowadzanie niewyważenia wpłynęło na każdą z miar (w przypadku pomiarów szerokopasmowych). Wartości tych miar wzrastały wraz ze zwiększaniem się niewyważenia wirnika. Wyniki przedstawiono dla przetwornika 1 - kierunek styczny, zamontowanego na górnej części tarczy łożyskowej (Tab. 5.4 i Rys. 5.13).

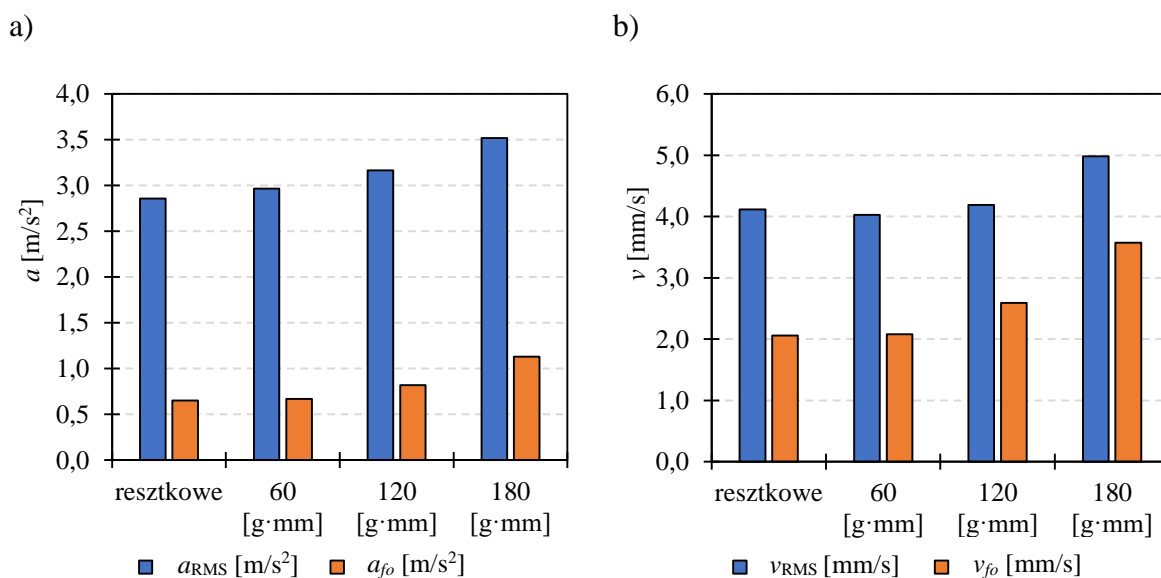
Tab. 5.4. Zestawienie wyników pomiarów wartości skutecznych, średnich i szczytowych przyspieszeń drgań i wartości skutecznych prędkości drgań oraz wartości skutecznych składowych obrotowych przyspieszeń i prędkości drgań mierzonych na czujniku 1 w kierunku stycznym.

	a_{PEAK} [m/s ²]	a_{AVG} [m/s ²]	a_{RMS} [m/s ²]	v_{RMS} [mm/s]	a_{fo} [m/s ²]	v_{fo} [mm/s]
resztkowe ¹⁾	8,72	2,20	2,86	4,11	0,65	2,06
60 [g·mm] ²⁾	9,15	2,33	2,96	4,03	0,67	2,08
120 [g·mm] ²⁾	9,71	2,49	3,16	4,19	0,82	2,59
180 [g·mm] ²⁾	10,65	2,77	3,52	4,98	1,13	3,57

Legenda:

¹⁾ niewyważenie resztkowe po wyważeniu przez producenta (wartość nieznaną)

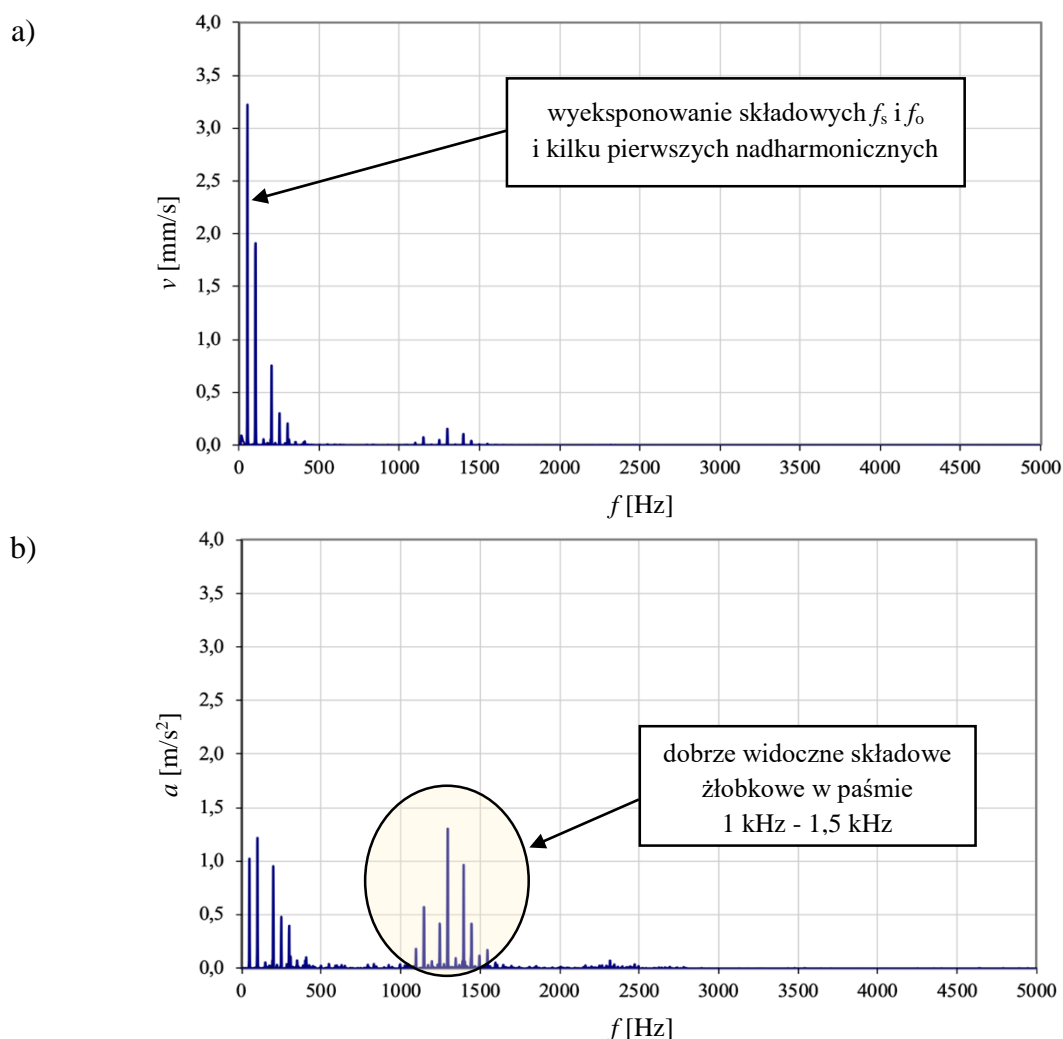
²⁾ dodatkowe celowo wprowadzone niewyważenie w ramach eksperymentu czynnego



Rys. 5.13. Zestawienie wyników pomiarów wartości skutecznej (w paśmie do 5 kHz) i składowej obrotowej sygnału przyspieszeń drgań (a) oraz wartości skutecznej (w paśmie do 1 kHz) i składowej obrotowej sygnału prędkości drgań (b) silnika GUNT PT500.19 wyznaczonych dla przetwornika 1 w kierunku stycznym.

Zwiększenie oporów ruchu wykazało wzrost wartości każdej z analizowanych miar, natomiast wzrost rezystancji uzwojenia fazy L3 nie wykazał żadnej wyraźnej zależności.

Do detekcji wad produkcyjnych można stosować klasyczną analizę widmową zarówno prędkości jak i przyspieszeń drgań. Należy jednak nadmienić, że w widmie prędkości będą lepiej eksponowane składowe o niższych częstotliwościach (np. składowa obrotowa f_o , składowa sieciowa f_s i jej pierwsze nadharmoniczne). Widmo przyspieszeń będzie przydatne do detekcji i wartościowania udziału składowych w wyższych pasmach częstotliwości związanych np. z pasmem występowania składowej żłobkowej f_{rs} wraz z wstęgami bocznymi. Warto nadmienić, że pasmo to może być również przydatne do oceny niecentryczności wirnika względem stojana (Tab. 4.2). Pasmo f_{rs} zależy jednak od konstrukcji silnika (liczby żłobków, par biegunów), częstotliwości sieci oraz poślizgu. Przykładowe postacie wyników analiz widmowych prędkości i przyspieszeń drgań silnika GUNT PT500.19 (w paśmie do 5 kHz) pokazano na rysunku 5.14.



Rys. 5.14. Porównanie przykładowych widm a) prędkości drgań, b) przyspieszeń drgań silnika GUNT.

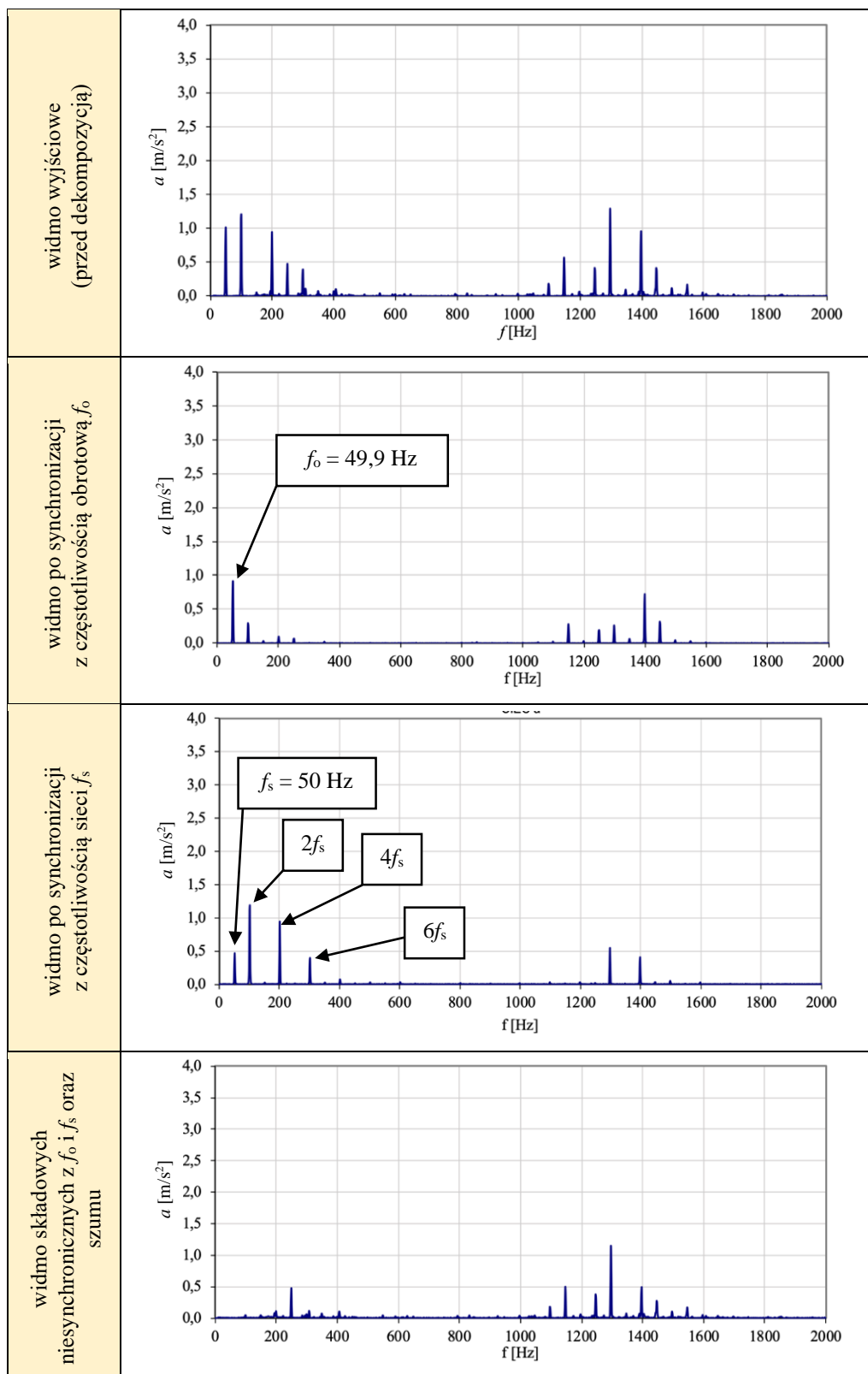
Można zauważyć, że widma różnią się zarówno pod względem ilościowym jak i jakościowym. Widmo przyspieszeń drgań zawiera wyraźne składowe w okolicy 1-1,5 kHz (składowe związane z częstotliwością żłobkową f_{rs}). Widmo prędkości drgań natomiast charakteryzuje się wyższymi wartościami składowych w okolicy niższych częstotliwości. Jednak wartości składowych w paśmie powyżej 1 kHz wyraźnie maleją ze wzrostem częstotliwości.

W pracy zaproponowano implementację techniki uśredniania multisynchronicznego (MSA) do separacji sygnału drganiowego na składowe związane ze zjawiskami natury mechanicznej (synchronicznych z f_o) oraz elektromagnetycznej (synchronicznych z f_s), a także oceny udziału rezydualnych składowych sygnału (niesynchronicznych z f_o i f_s oraz szumu).

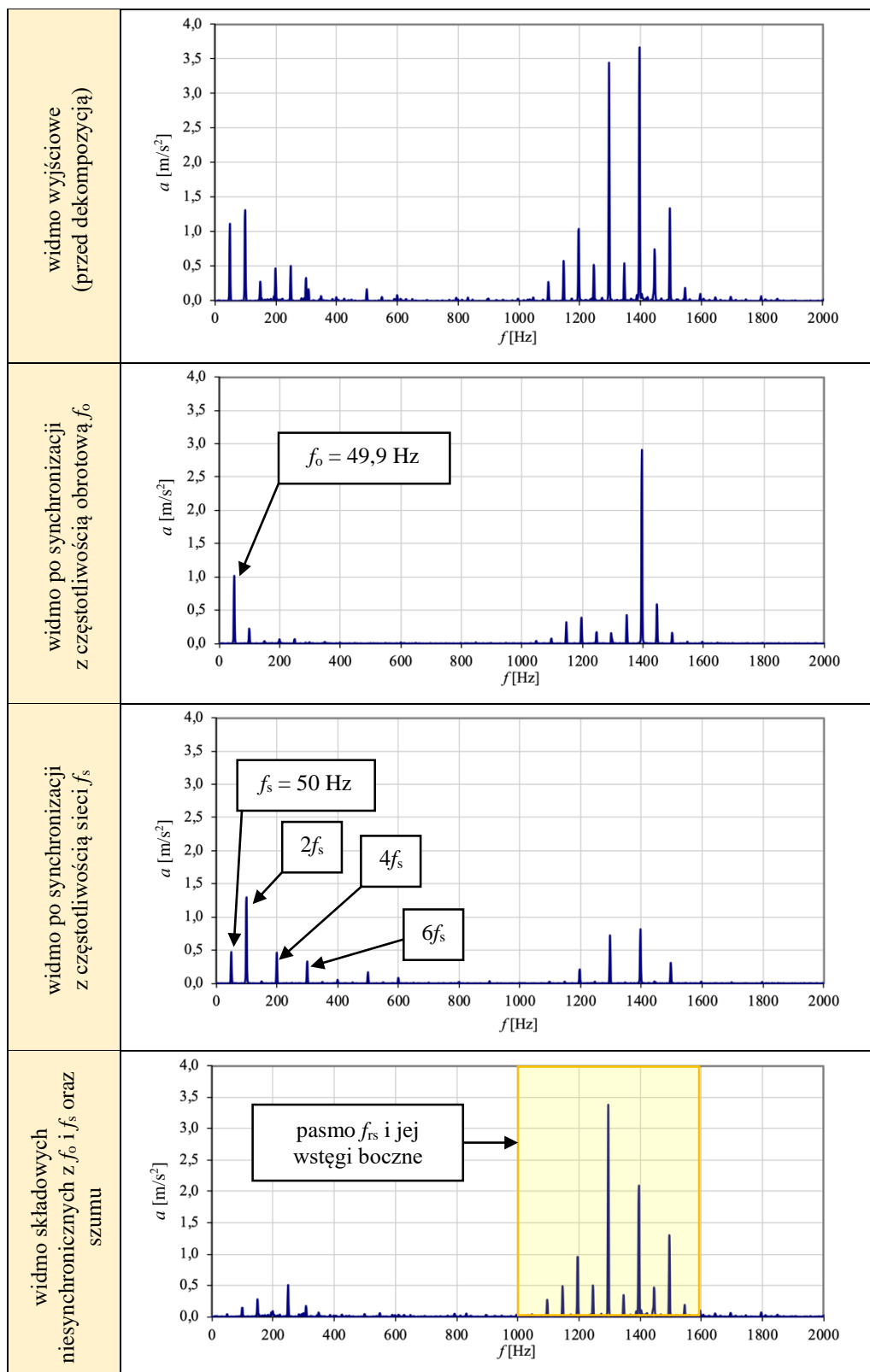
Badany silnik GUNT PT500.19 jest silnikiem o jednej parze biegunów. W trakcie badań pracował on bez obciążenia, co skutkowało trudnością w odróżnieniu składowej o częstotliwości obrotowej f_o od składowej o częstotliwości sieciowej f_s . Z tego powodu na uwagę zasługuje zdolność techniki MSA do rozseparowanie blisko położonych składowych: obrotowej $f_o = 49,9$ Hz i sieciowej $f_s = 50$ Hz, które w widmie wejściowym praktycznie nie są rozróżnialne. W celu porównania różnic w ujęciu jakościowym i ilościowym kolejne rysunku zawierają widmo wejściowe przed dekompozycją oraz widma sygnałów zdekomponowanych dla silnika GUNT:

- bez wprowadzonych wad -widmo referencyjne (Rys. 5.15),
- z wprowadzoną niecentrycznością - przesunięcie równoległe wirnika względem stojana o 0,2 mm (Rys. 5.16),
- z wprowadzonym niewyważeniem wirnika - 180 g·mm (Rys. 5.17),
- ze zwiększoną rezystancją w fazie L3 o 10Ω (Rys. 5.18),
- ze zwiększonymi oporami ruchu (Rys. 5.19).

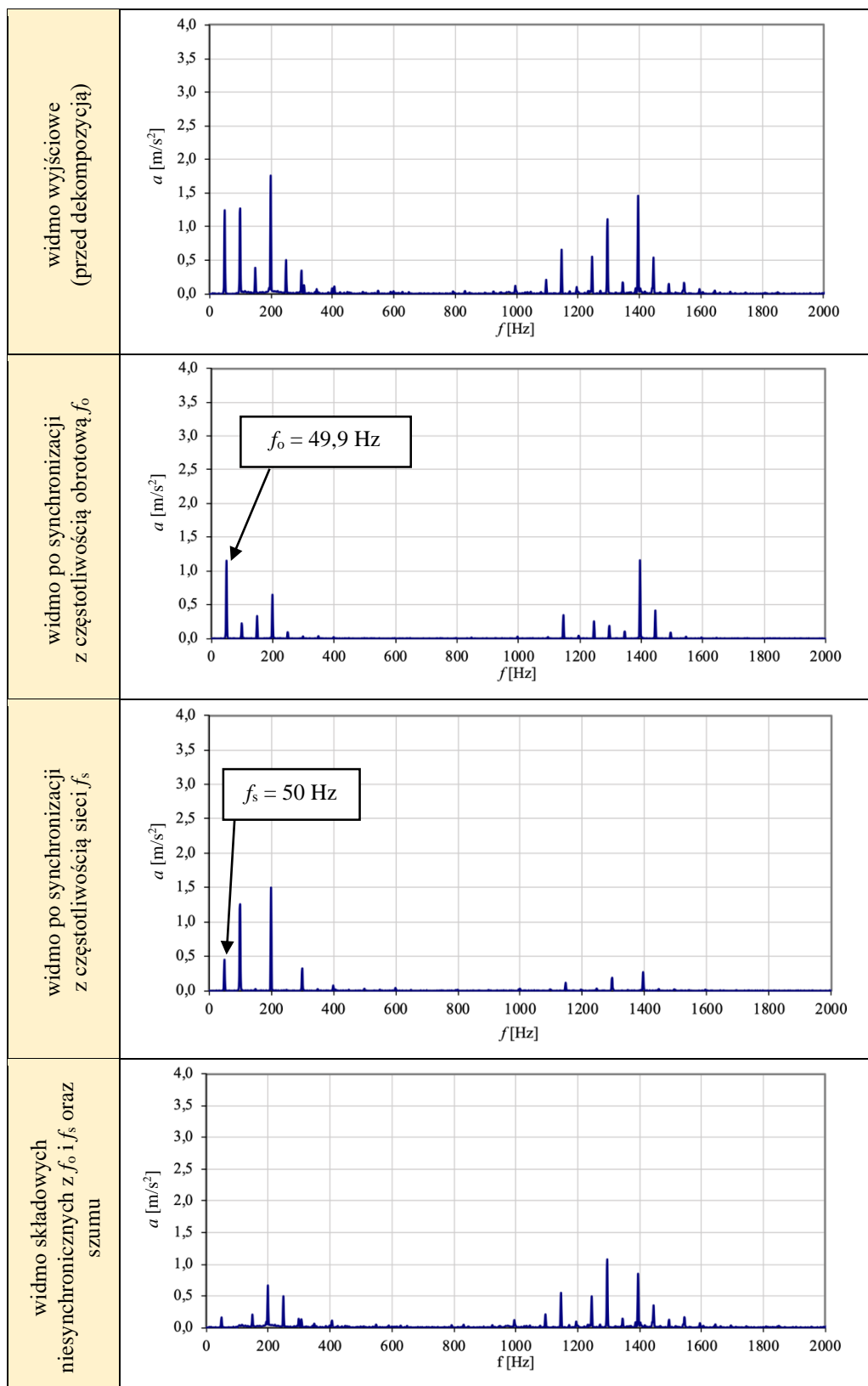
Istotne zmiany widm (w porównaniu z widmem referencyjnym) spowodowane wprowadzonymi intencjonalnie wadami zostały wyróżnione na ww. rysunkach. Przykładowe widma sygnałów przyspieszeń drgań silnika GUNT PT500.19 przed i po dekompozycji multisynchronicznej (przetwornik 1 kierunek styczn) ze względu na małe wartości składowych w paśmie powyżej 2 kHz ograniczono do 2 kHz.



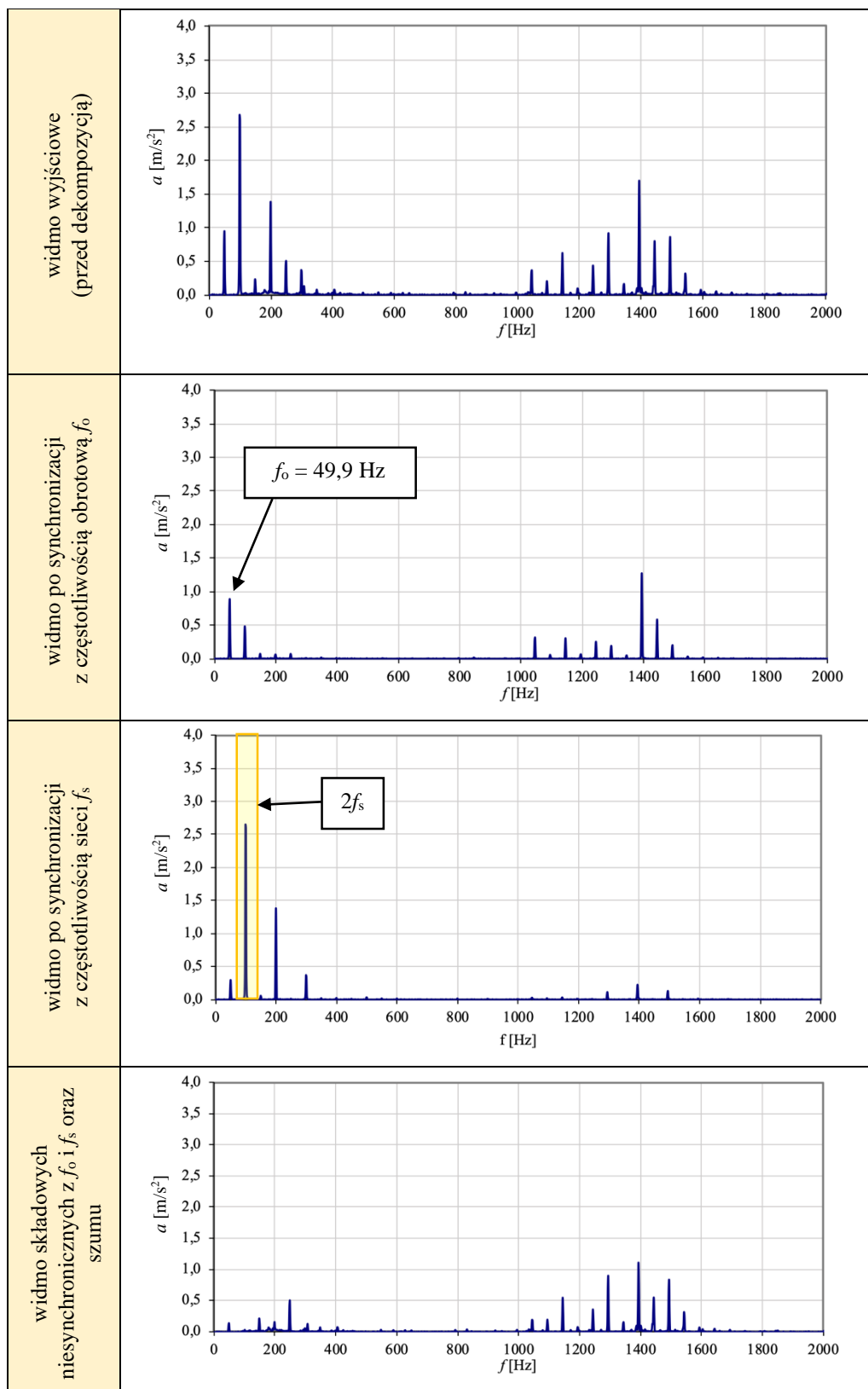
Rys. 5.15. Zestawienie widm przyspieszeń drgań po dekompozycji multisynchronicznej - silnik GUNT PT500.19 bez wad.



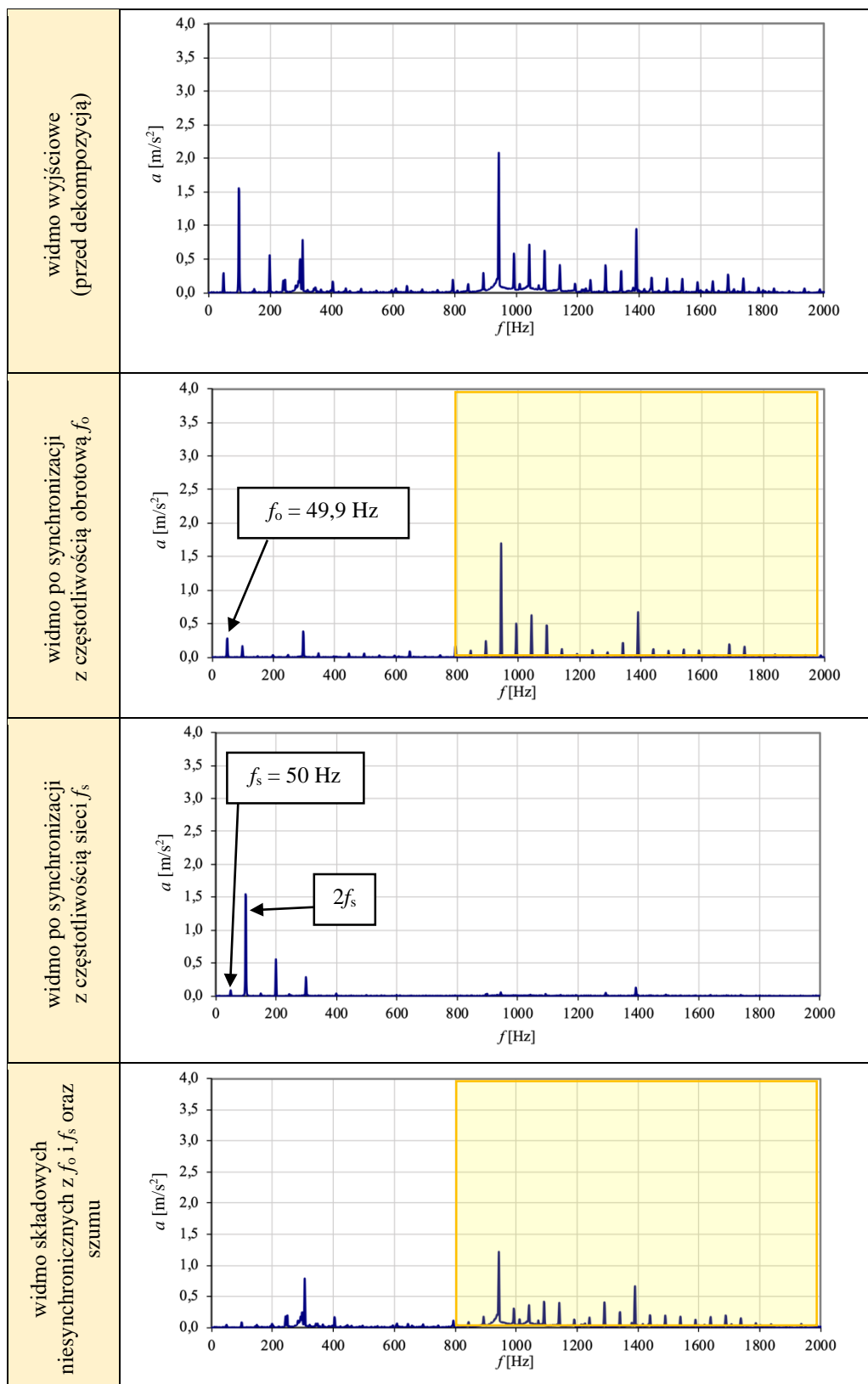
Rys. 5.16. Zestawienie widm przyspieszeń drgań po dekompozycji multisynchronicznej - silnik GUNT PT500.19 z wprowadzoną niecentrycznością (równoległe przesunięcie wirnika względem stojana o 0,2 mm).



Rys. 5.17. Zestawienie widm przyspieszeń drgań po dekompozycji multisynchronicznej - silnik GUNT PT500.19 z wprowadzonym niewyważeniem wirnika o wartości 180 g·mm.



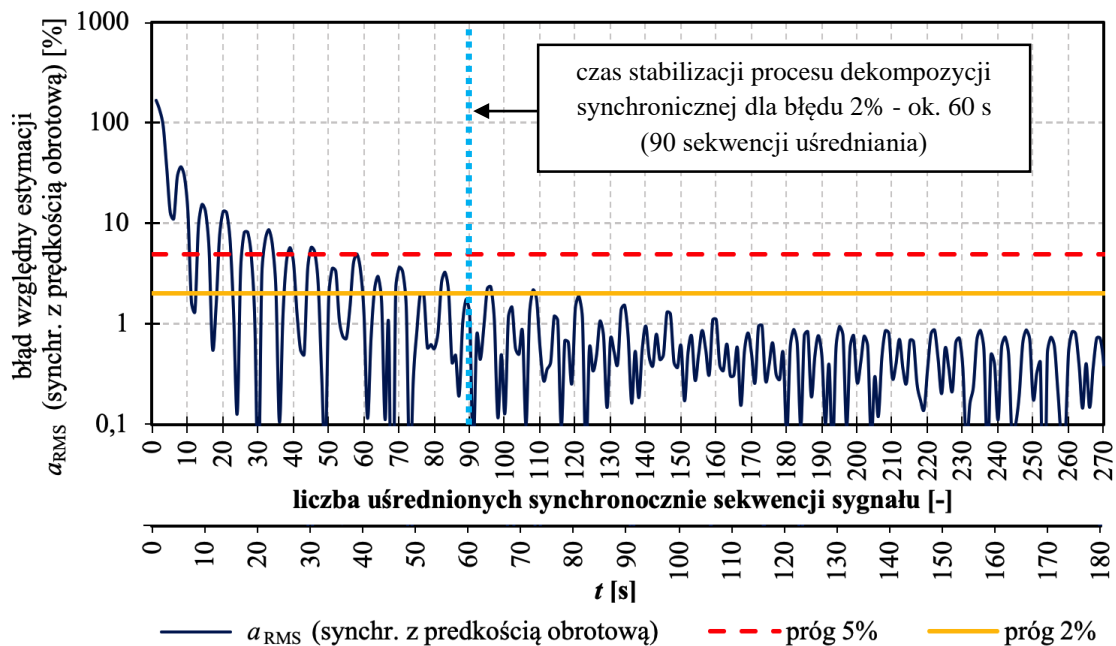
Rys. 5.18. Zestawienie widm przyspieszeń drgań po dekompozycji multisynchronicznej - silnik GUNT PT500.19 z wprowadzoną dodatkową rezystancją uzwojeń fazy 10Ω .



Rys. 5.19. Zestawienie widm przyspieszeń drgań po dekompozycji multisynchronicznej - silnik GUNT PT500.19 z wprowadzonymi oporami ruchu.

Badania wykazały, że dekompozycja multisynchroniczna, jest skutecznym narzędziem diagnostycznym. Pozwala na uzyskanie informacji o stanie zarówno części mechanicznej jak i elektromagnetycznej silnika. Ponadto analizowane składowe sygnału synchroniczne z f_s oraz f_o są w dużej mierze pozbawione szumów. Dlatego informacje zawarte zarówno w sygnałach uśrednionych synchronicznie i ich widmach dają w miarę pełny obraz stanu silnika. W detekcji wad produkcyjnych przydatne są składowe w okolicy 1 kHz. W przypadku pojawienia się wady mocno uwidacznia się składowa 1400 Hz na widmie synchronizowanym z częstotliwością obrotową. Wrażliwe na wady produkcyjne są także składowe $2f_s = 100$ Hz, $4f_s = 200$ Hz i $6f_s = 300$ Hz, a także ich wzajemny układ. Ponadto niewyważenie wirnika powoduje wzrost składowej f_o .

W celu określenia minimalnej liczby uśrednień synchronicznych sygnałów drganiowych z zastosowaniem techniki MSA śledzono proces stabilizacji wyników dekompozycji multisynchronicznej. Wyznaczono zmianę błędu względnego estymacji wartości skutecznych przyspieszeń drgań a_{RMS} w trakcie kolejnych iteracji uśredniania z częstotliwością sieci f_s i częstotliwością obrotową f_o . Przykładowy przebieg funkcji błędu dla procesu uśredniania MSA zaprezentowano na rysunku 5.20.



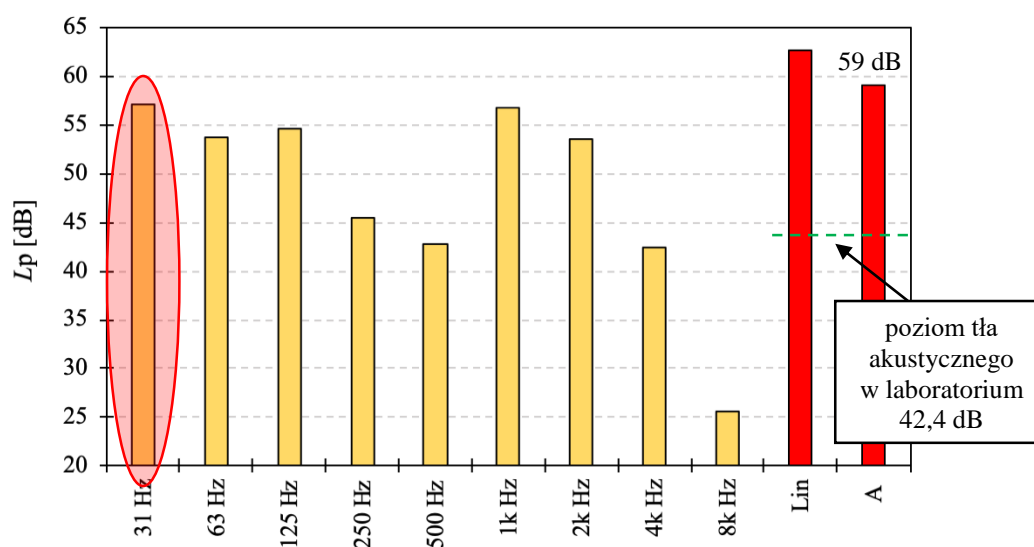
Rys. 5.20. Błąd względną estymacji a_{RMS} sygnału dekomponowanego synchronicznie z f_o w funkcji liczby sekwencji sygnału uśrednionych synchronicznie.

Na podstawie przeprowadzonych testów stwierdzono, że minimalna liczba uśrednień procesu dekompozycji multisynchronicznej dla uzyskania błędu estymacji a_{RMS} poniżej 5% wynosi ok. 60 sekwencji. Uzyskanie błędu 2% wymaga zwiększenia ilości sekwencji do ok. 90. Technika MSA bez zastosowania optymalizacji (overlapping sekwencji uśredniania) jest dość

czasochłonna (dla rozważanego przypadku zajmuje ok. 60 s), jednak wyniki uzyskane w tym procesie mogą być pomocne w detekcji wad produkcyjnych ASE podczas testowania odbiorczego. Zastosowanie overlappingu może skrócić czas uśredniania MSA do ok. 5 sekund.

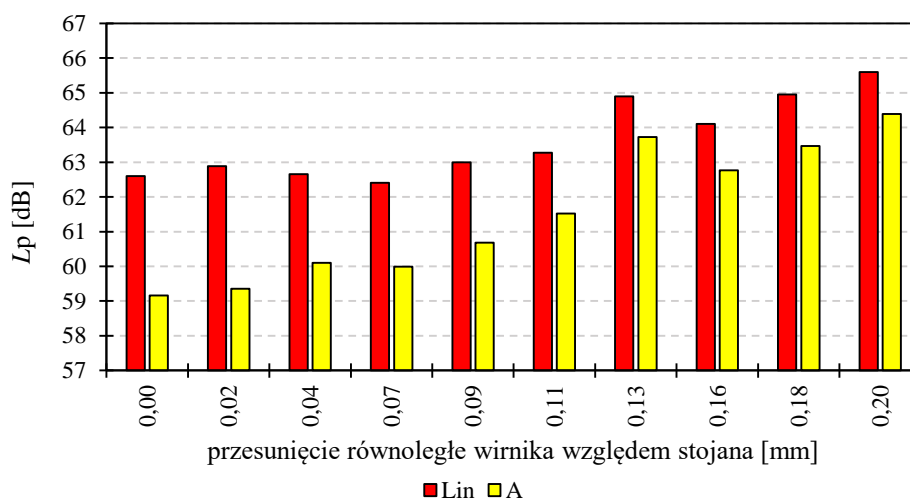
5.2.3.2. Detekcja wad na podstawie pomiarów i analizy hałasu

W ramach badań sprawdzono możliwość zastosowania pomiarów i analiz oraz dekompozycji MSA hałasu do detekcji wad produkcyjnych ASE. W tym celu wykonano analizy oktawowego hałasu, wyznaczono: liniowy poziom dźwięku L_{Lin} oraz poziom dźwięku skorygowany charakterystyką częstotliwości A - L_A . Przykładowe widmo oktawowego hałasu silnika GUNT w odległości 250 mm od korpusu wraz z wyznaczonym poziomem liniowym i poziomem dźwięku A przedstawiono na rysunku 5.21.



Rys. 5.21. Widmo oktawowego hałasu silnika GUNT PT500.19 (bez wprowadzonych wad) oraz poziom liniowy dźwięku i poziom dźwięku A.

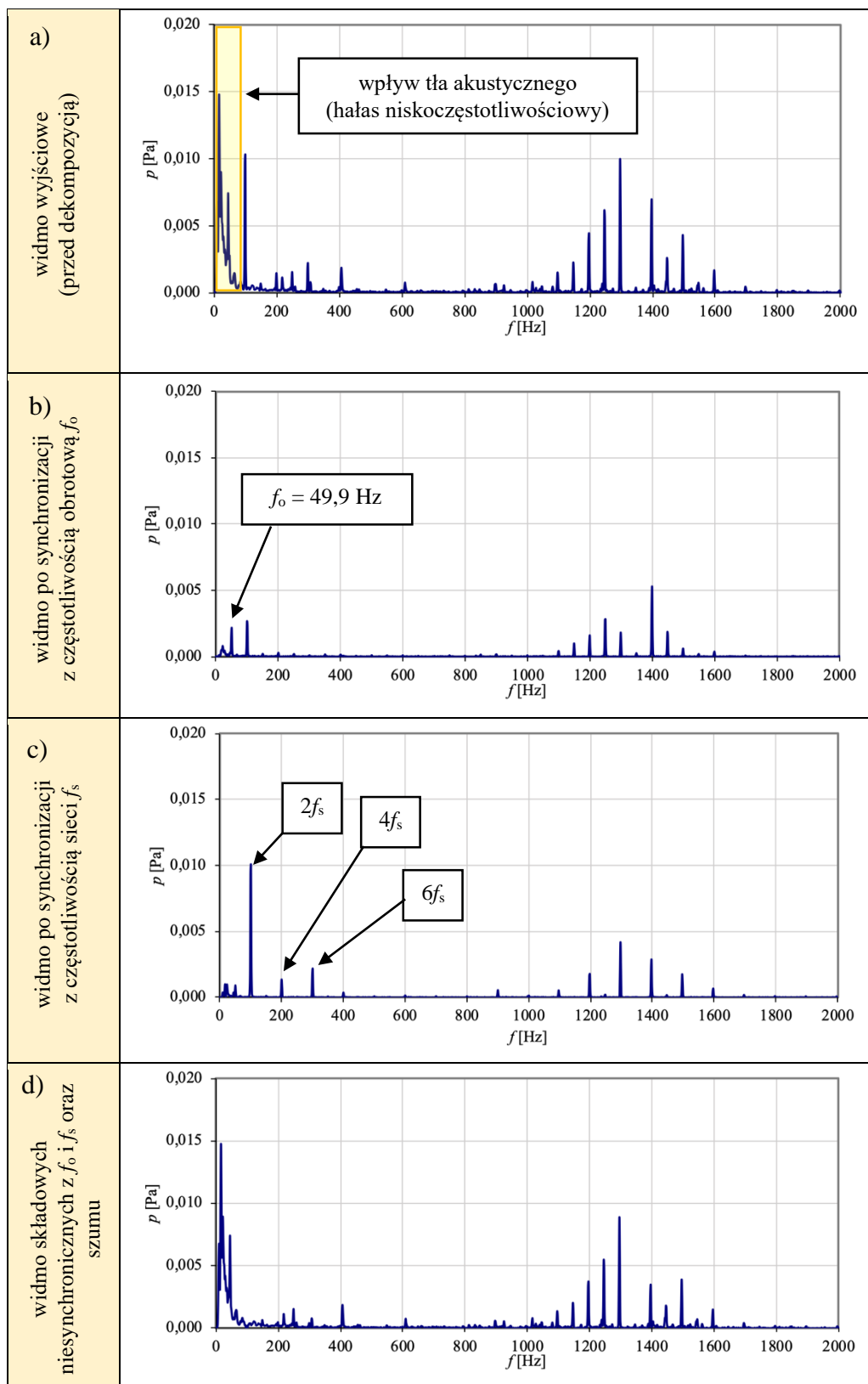
Należy dodać, że poziom tła akustycznego w laboratorium wynosił 42,4 dB. Mimo wyłączenia systemu wentylacji w laboratorium odnotowano istotny wpływ tła akustycznego w paśmie niskoczęstotliwościowym do ok. 50 Hz. Zanotowano to na widmie oktawowym (Rys. 5.21) oraz wąskopasmowym (Rys. 5.23a). Składowe niskoczęstotliwościowe hałasu mogą zatem wpływać niekorzystnie na ocenę ilościową np. zawyżać wartość lub maskować składową obrotową i/lub sieciową.



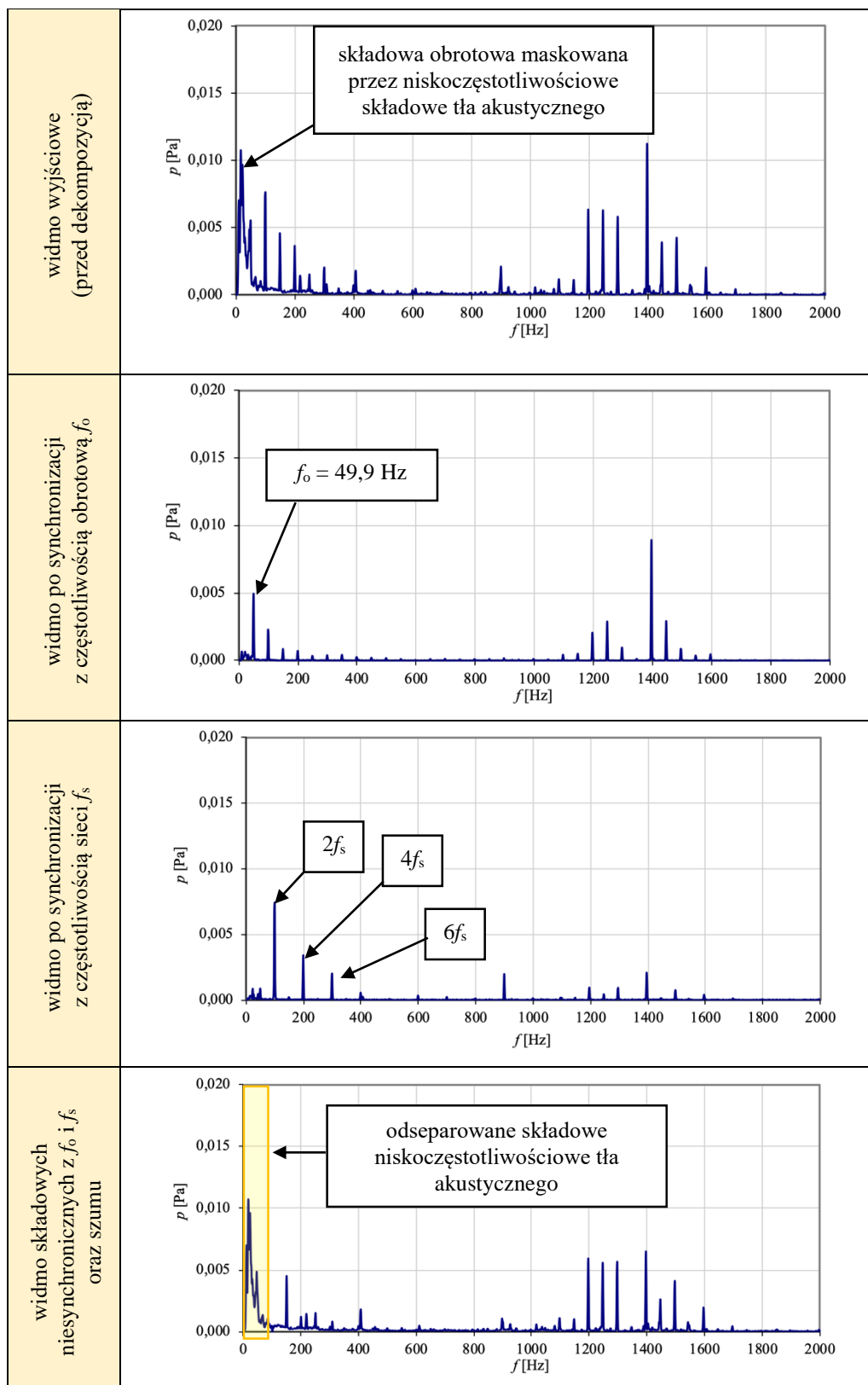
Rys. 5.22. Porównanie liniowego poziomu dźwięku i poziomu dźwięku A w zależności od wielkości niecentryczności równoległej wprowadzonej do silnika GUNT.

Jedyną zależność, którą można było zaobserwować dla pomiarów hałasu to wzrost poziomu liniowego oraz poziomu dźwięku A związany ze zwiększeniem niecentryczności wirnika względem stojana (Rys. 5.22). Na rysunku można zauważyć lepsze skorelowanie poziomu dźwięku A z niecentrycznością. Zwiększenie niecentryczności do 0,2 mm powoduje wzrost poziomu dźwięku A o 5 dB. Może to wynikać z tego, że składowa żłobkowa i jej wstęgi boczne dla tego modelu silnika występują w okolicy 1 kHz i pokrywają się z maksimum charakterystyki korekcyjnej A (również 1 kHz). Warto tu dodać, że jest to także zakres częstotliwościowy największej czułości ucha ludzkiego (1-5 kHz). Wynika stąd konkluzja, że eliminacja niecentryczności jako wady produkcyjnej będzie niezmiernie istotna w przypadku produkcji silników o obniżonym poziomie emitowanego hałasu. Pozostałe wady nie wykazują się żadną zależnością w przypadku pomiarów hałasu.

Dokonano również dekompozycji multisynchronicznej hałasu. Do synchronizacji procesu dekompozycji zastosowano sygnały o częstotliwości sieciowej f_s i częstotliwości obrotowej f_o . Przykładowe wyniki procesu dekompozycji wykonanych dla pomiarów hałasu przedstawiono na rysunkach 5.23 i 5.24.



Rys. 5.23. Zestawienie widm ciśnienia akustycznego przed i po dekompozycji multisynchronicznej - silnik GUNT PT500.19 bez wad.

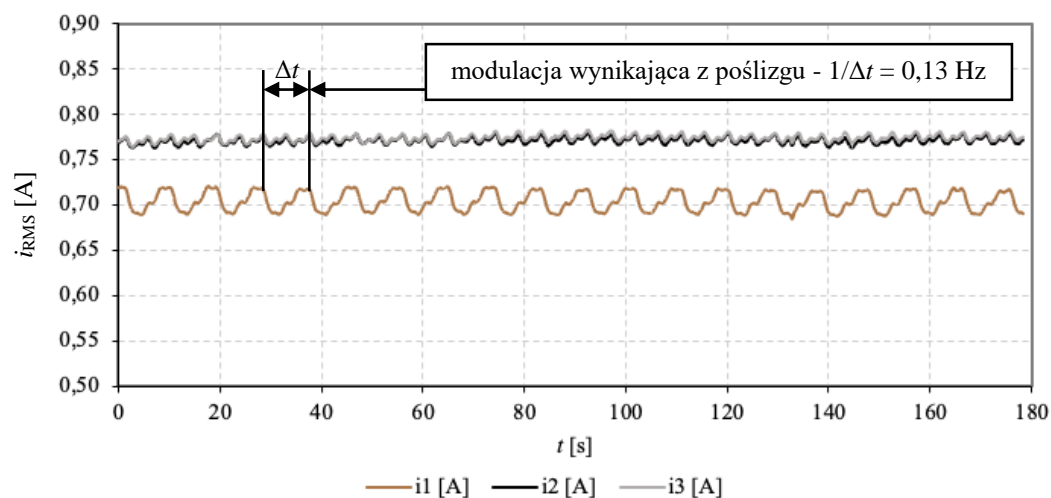


Rys. 5.24. Zestawienie widm ciśnienia akustycznego przed i po dekompozycji multisynchronicznej - silnik GUNT PT500.19 z wprowadzonym niewyważeniem wirnika 180 g·mm.

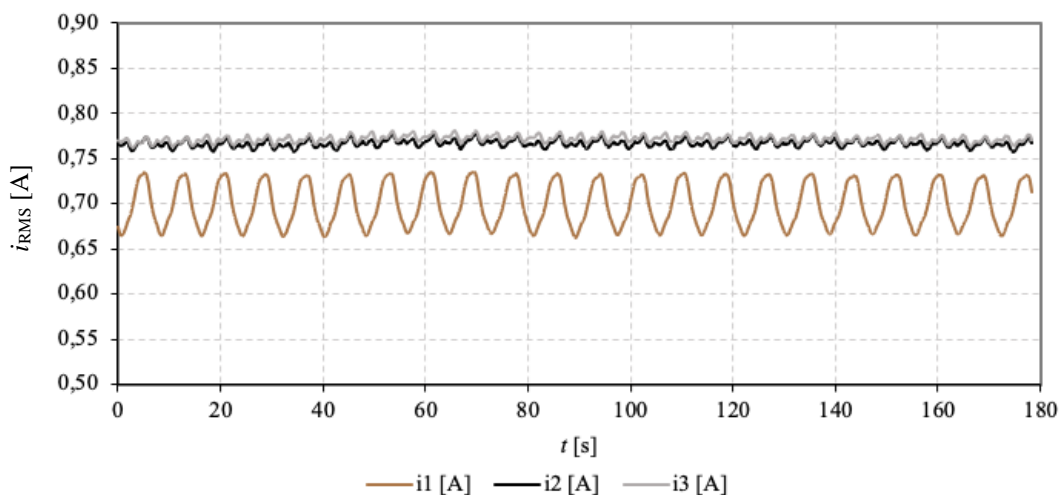
W przedstawionych przykładach widm ciśnienia akustycznego po dekompozycji multisynchronicznej widoczne jest wyraźne zredukowanie niskoczęstotliwościowych składowych tła akustycznego i poprawne odwzorowanie składowych sygnałów synchronizowanych z f_s i f_o . Jest to niewątpliwa zaleta, która może pozwolić na zastosowanie tej techniki do przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w środowisku przemysłowym. Dekompozycja MSA hałasu umożliwia detekcję wad produkcyjnych w zbliżonym zakresie co w przypadku dekompozycji przyspieszeń drgań. Istotne będzie jednak zadbanie o skuteczne ograniczenie poziomu tła akustycznego w otoczeniu stanowiska badawczego.

5.2.3.3. Detekcja wad na podstawie pomiarów i analizy prądów fazowych

Analiza prądów fazowych stojana obejmowała podstawową parametryzację i_{RMS} , a także potencjalnej możliwości detekcji wad na podstawie wzajemnej relacji fazowej i amplitudowej prądów fazowych. Śledzono również przebiegi chwilowych wartości skutecznych prądów fazowych w czasie (Rys. 5.25 i 5.26). Na przebiegach tych widoczna jest modulacja amplitudowa prądu o częstotliwości ok. 0,13 Hz. Odpowiada to różnicy pomiędzy częstotliwością sieci zasilającej f_s i częstotliwością obrotową wirnika f_o .

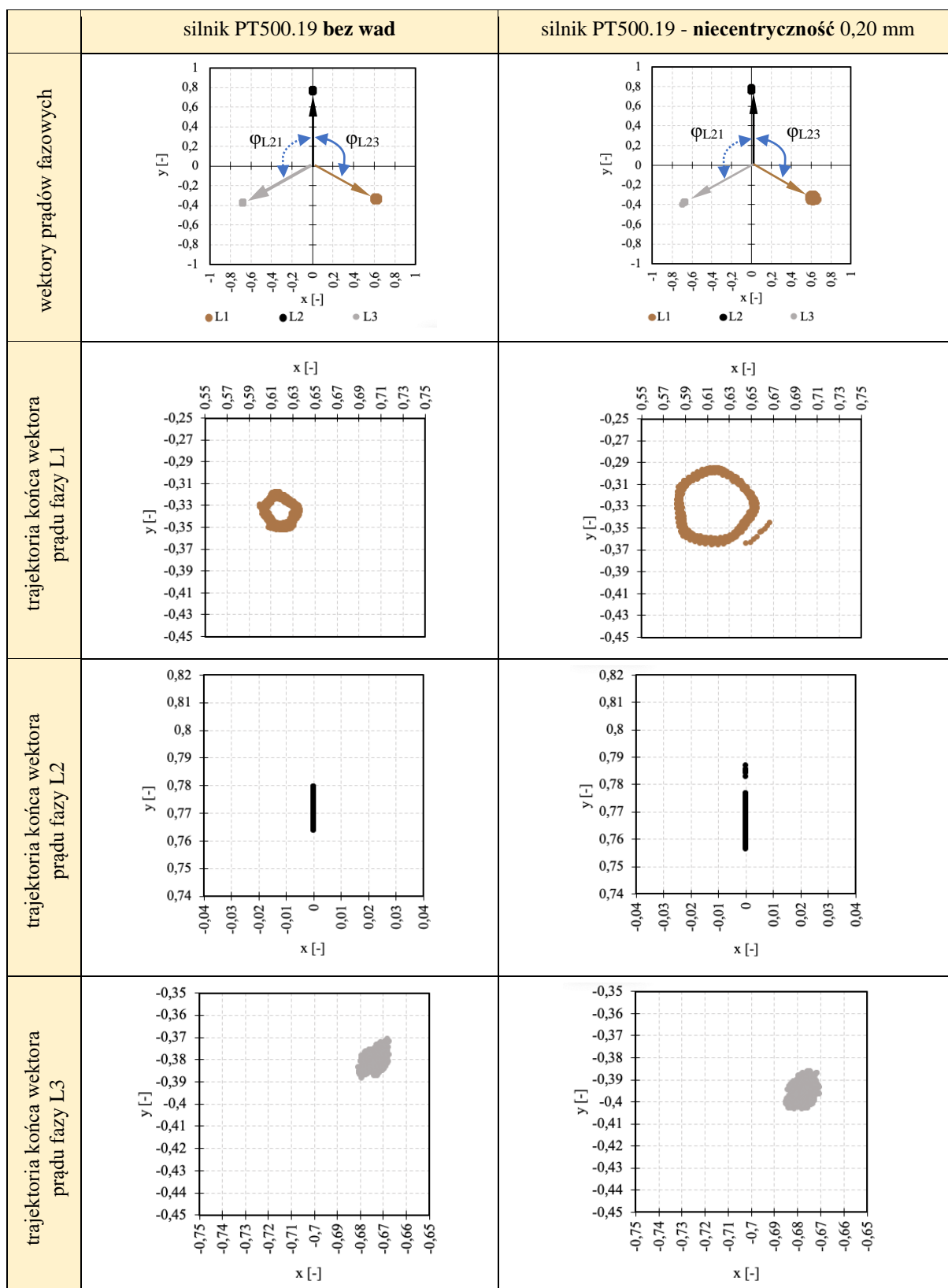


Rys. 5.25. Chwilowe wartości skuteczne prądów fazowych silnika GUNT 500.19 **bez wad** (widoczna modulacja częstotliwością poślizgową).

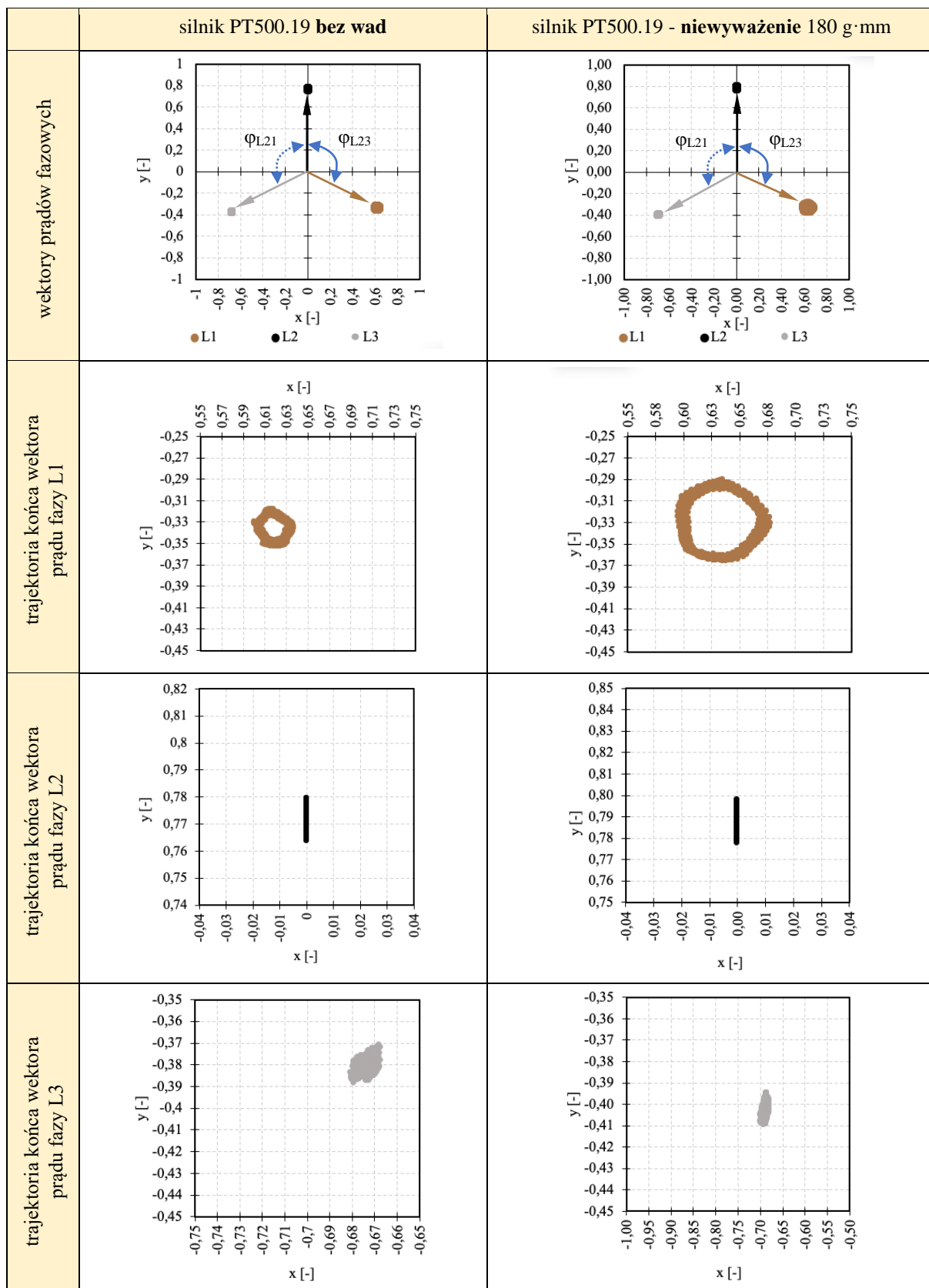


Rys. 5.26. Chwilowe wartości skuteczne prądów fazowych silnika GUNT 500.19 z **wprowadzoną niecentrycznością (równoległe przesunięcie wirnika względem stojana 0,2 mm)**.

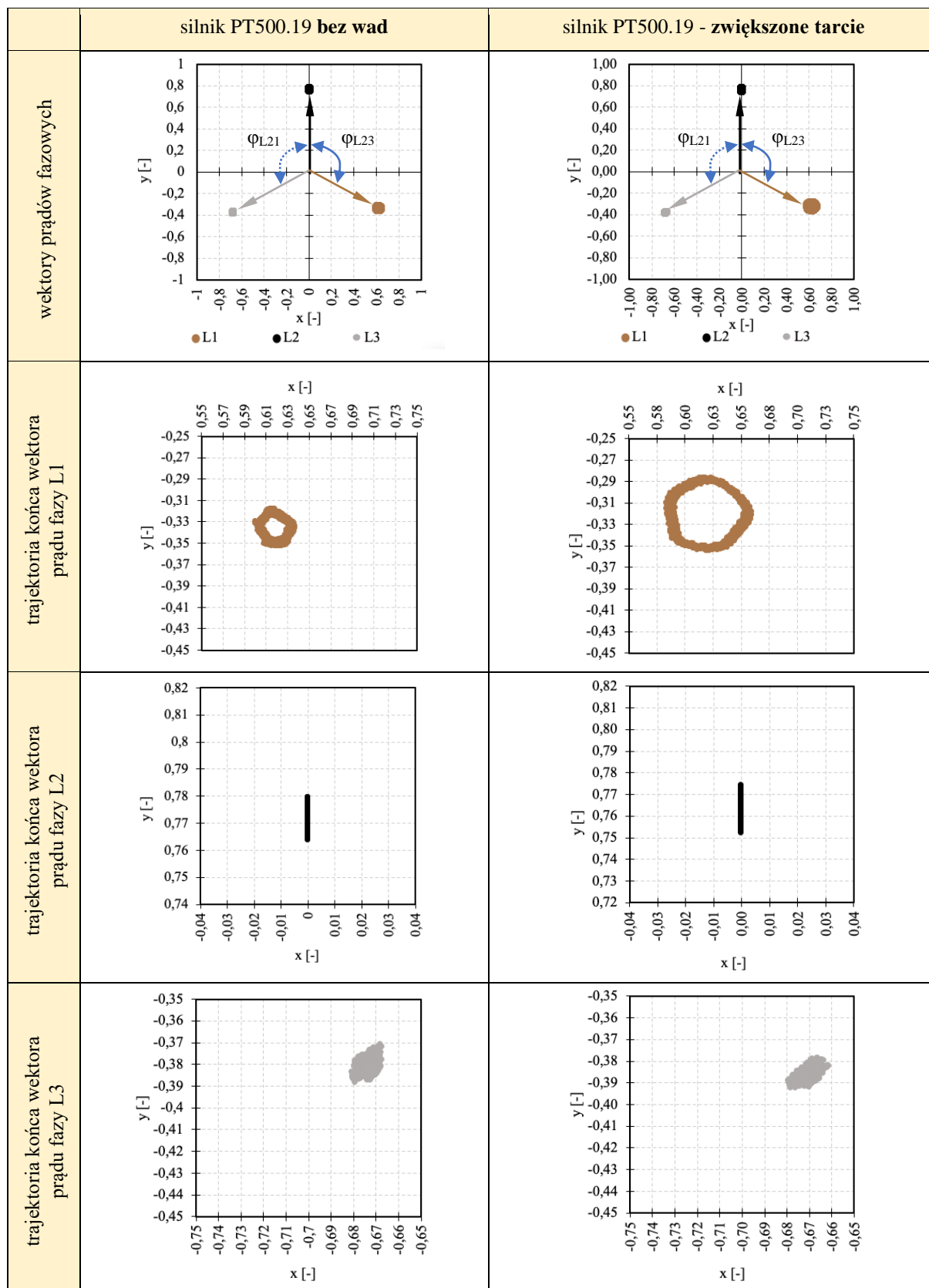
Na przebiegach czasowych zauważono wzrost oscylacji (głębokości modulacji) oraz niewielkie wzrosty wartości skutecznych prądów fazowych po wprowadzeniu wad tj. niecentryczności, czy niewyważenie wirnika. Aby uwydatnić zmiany fazowe i amplitudowe prądów zaproponowano wykresy zobrazone na płaszczyźnie w formie pokazanej na rysunkach 5.27-5.30, będące odzwierciedleniem wektorów prądowych. Dzięki tym wykresom możliwe jest obserwowanie wzajemnego położenia wektorów prądowych oraz trajektorii końców wektorów na powiększeniach. Wykresy porównawcze wektorów prądów dla silnika GUNT PT500.19 bez wad oraz z wprowadzonymi wadami produkcyjnymi przedstawiono na rysunkach 5.27 - 5.30.



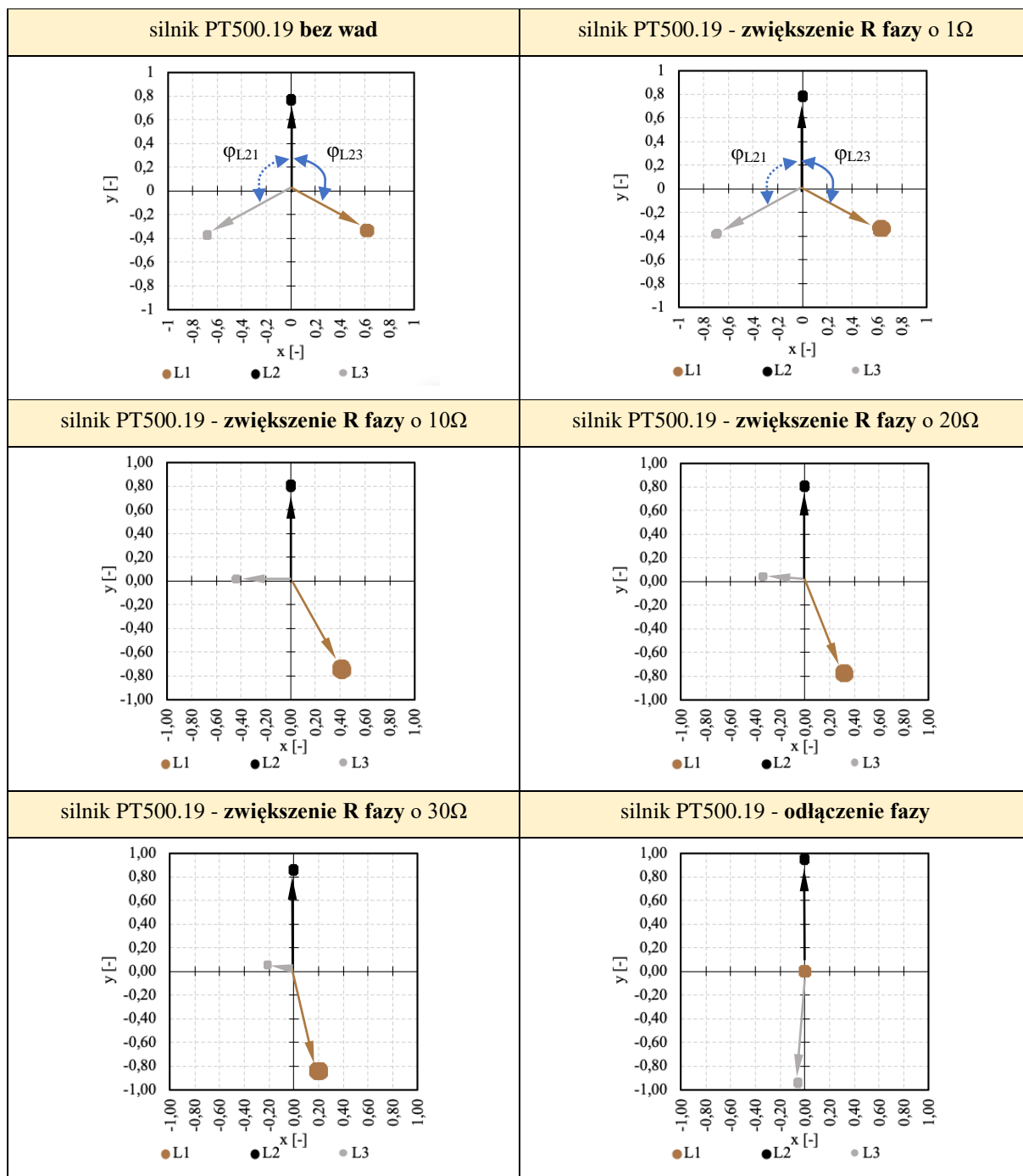
Rys. 5.27. Porównanie trajektorii końców wektorów prądów zasilających silnika GUNT PT500.19 (bez wad oraz z przesunięciem równoległym wirnika względem stojana 0,2 mm).



Rys. 5.28. Porównanie trajektorii końców wektorów prądów zasilających silnika GUNT PT500.19 (bez wad oraz z niewyważeniem wirnika 180 g mm)



Rys. 5.29. Porównanie trajektorii końców wektorów prądów zasilających silnika GUNT PT500.19 (bez wad oraz z dołączonym układem symulującym zwiększone opory ruchu).



Rys. 5.30. Wektory prądów zasilających silnika GUNT PT500.19 (bez wad oraz ze zwiększaniem rezystancji fazy L3 i całkowitym odłączeniem fazy L1).

Można zauważyć zmianę postaci wektorów prądów fazowych lub orbit zataczanych przez ich końce po wprowadzeniu wad w silniku GUNT. Dotyczy to wszystkich rodzajów wad wprowadzanych w ramach eksperymentu czynnego. Nierównomierność szczeliny powietrznej, niewyważenie wirnika oraz zwiększone opory tarcia powodują powiększenie rozmiaru trajektorii zataczanych przez końce wektorów prądów fazowych. Zmiana rezystancji fazy wprowadza niesymetryczność przesunięć fazowych pomiędzy wektorami. Wadą tej metody

jest problem z jednoznacznym rozróżnieniem od siebie wad takich jak niecentryczność, niewyważenie wirnika oraz zwiększone opory ruchów. We wszystkich przypadkach pojawiały się podobne zmiany na wykresach. Niemniej można rozważyć stosowanie pomiarów prądów i proponowanej formy zobrazowania jako pomiarów uzupełniających.

5.2.3.4. Detekcja wad na podstawie pomiaru poślizgu

Poślizgiem silnika asynchronicznego będziemy nazywać różnicę pomiędzy częstotliwością sieci zasilającej f_s , a częstotliwością obrotową f_o odniesioną do częstotliwości sieci f_s [13]:

$$s = \frac{f_s - f_o}{f_s} \cdot 100 [\%] \quad (5.6)$$

Dla silników obciążonych znamionowo poślizg wynosi ok. 0,5-10 %. Silniki pracujące na biegu jałowym mogą charakteryzować się mniejszymi wartościami poślizgu [13].

Poślizg może stanowić informację diagnostyczną dotyczącą (w sposób pośredni) oporów ruchu w układzie mechanicznym silnika. Postanowiono sprawdzić przydatność tej miary do oceny jakości wykonania asynchronicznych silników elektrycznych. Do precyzyjnego wyznaczenia częstotliwości sieci zasilającej f_s oraz częstotliwości obrotowej wirnika f_o zaimplementowano metodę korekcji amplitudowo-częstotliwościowej AFC (ang. *Amplitude-Frequency Correction*) [34]. Metoda pozwala na precyzyjne wyznaczenie częstotliwości lokalnych maksimum widma (w tym przypadku widma amplitudowego sygnału sieci zasilającej i sygnału tachometrycznego) oraz zredukować błędy estymacji (niedoszacowania) amplitud wynikających ze zjawiska przecieku. Skorygowaną wartość częstotliwości składowej f^c , można wyznaczyć ze wzoru:

$$f_m^c = (\mu + m)\Delta f, \quad (5.7)$$

gdzie:

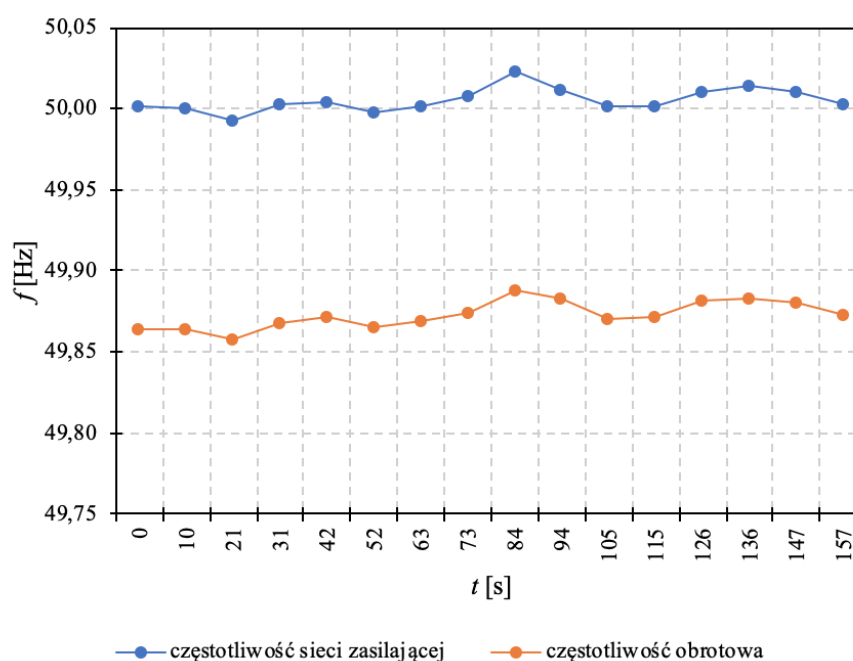
- m - numer porządkowy przypisany analizowanej składowej widma (odpowiada lokalnemu maksimum),
- Δf - rozdzielczość widma (w Hz),
- μ - współczynnik korekcji częstotliwości, zależny od okna czasowego dobraneo w procesie przetwarzania sygnałów.

Współczynnik μ powinien przyjmować wartości z przedziału $-0,5 < \mu \leq 0,5$. W badaniach do wyznaczenia widma drgań zastosowano okno prostokątne, dla którego współczynnik μ wyznaczany na podstawie wzoru [34, 172-174]:

$$\mu = \begin{cases} 0,5 & \text{dla } (h_m = h_{m+1}) \wedge (h_m > h_{m-1}) \wedge (h_m > h_{m-2}) \\ -\frac{1}{1 + h_m/h_{m-1}} & \text{dla } (h_m = h_{m-1}) \wedge (h_m > h_{m+1}) \wedge (h_{m-1} > h_{m+1}) \\ \frac{1}{1 + h_m/h_{m+1}} & \text{dla } (h_m = h_{m-1}) \wedge (h_m > h_{m+1}) \wedge (h_{m-1} > h_{m+1}) \\ 0 & \text{dla } (h_{m-1} = h_{m+1}) \end{cases}, \quad (5.8)$$

gdzie h_m to wartość składowej widma odpowiadającej lokalnemu maksimum (prążek widmowy m), a h_{m+1} , h_{m-1} , h_{m-2} to wartości sąsiednich składowych w otoczeniu lokalnego maksimum widma amplitudowego.

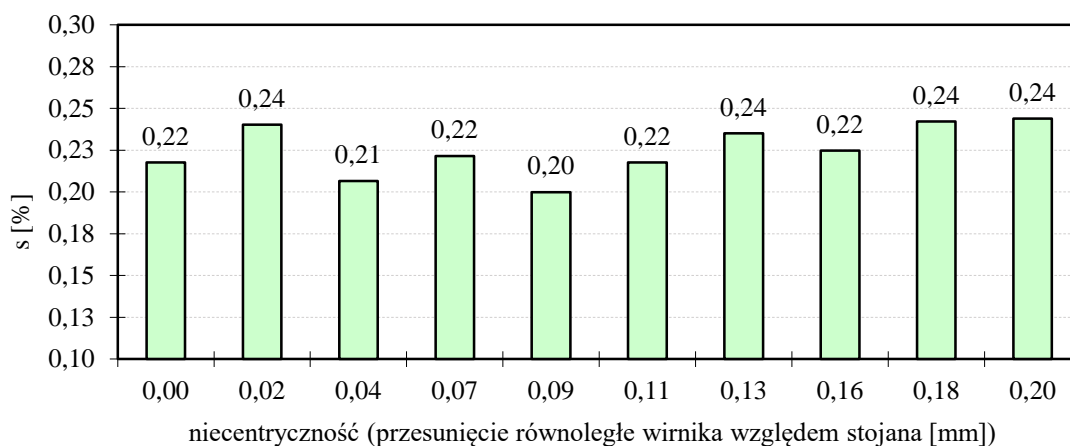
Zastosowanie korekcji AFC umożliwiło wyznaczenie częstotliwości sieci f_s oraz częstotliwości obrotowej wirnika f_o z dokładnością do 0,0001 Hz. Na rysunku 5.31 zaprezentowano przykładowe zmiany ww. częstotliwości w czasie trwania rejestracji sygnałów diagnostycznych z silnika GUNT.



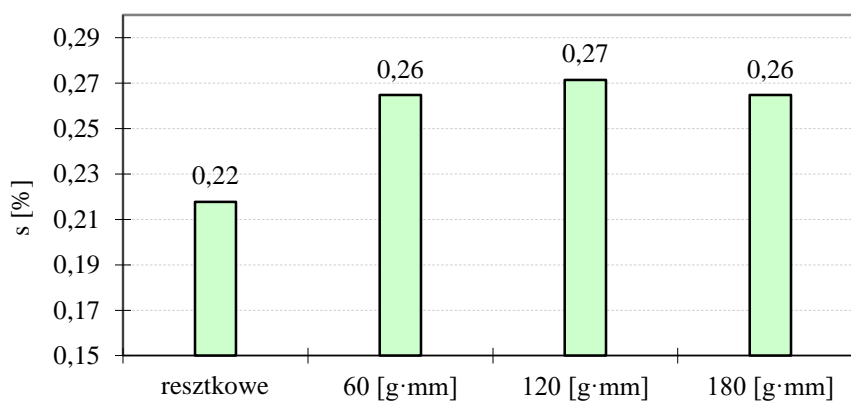
Rys. 5.31. Przykład zmiany częstotliwości sieci zasilającej i częstotliwości wirnika w trakcie akwizycji sygnałów diagnostycznych z silnika GUNT.

Precyzyjne wyznaczenie częstotliwości f_o i f_s ukazało, że częstotliwość sieci zasilającej zmienia się w czasie oraz że częstotliwość obrotowa w dużej mierze jest powiązana z częstotliwością sieci zasilającej. Stosując korekcję AFC możliwe jest zatem wykrywanie

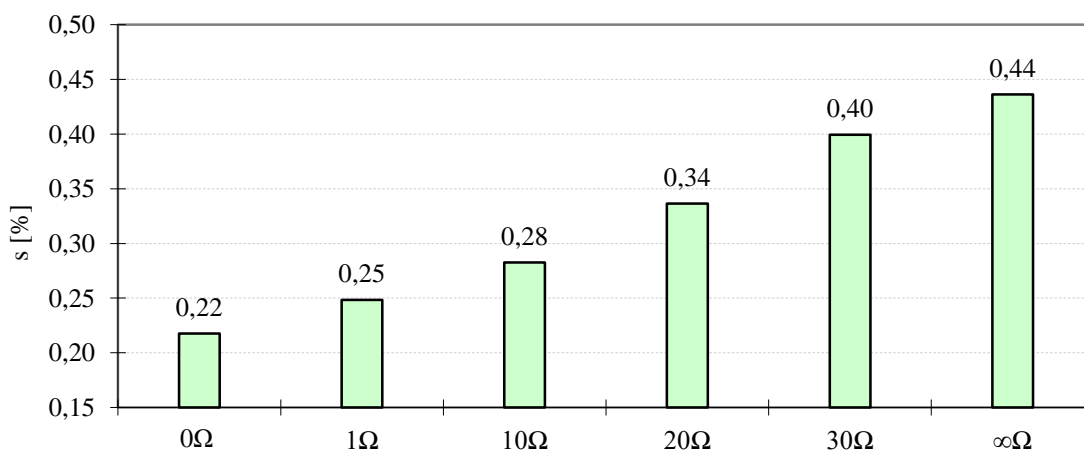
nawet niewielkich zmian częstotliwości, które mogą świadczyć o obecności wad produkcyjnych ASE. Na rysunkach 5.32-5.34. zaprezentowano wyniki pomiarów poślizgu - zmian poślizgu będących efektem wprowadzania wad produkcyjnych do silnika GUNT.



Rys. 5.32. Zależność poślizgu silnika GUNT PT500.19 od wprowadzonej niecentryczności wirnika względem stojana.



Rys. 5.33. Zależność poślizgu silnika GUNT PT500.19 od wprowadzonego dodatkowo niewyważenia wirnika.



Rys. 5.34. Zależność poślizgu silnika GUNT PT500.19 od zwiększenia rezystancji fazy L3 i całkowitego odłączenia fazy L1.

Widoczny jest wyraźny wzrost poślizgu dla silnika z wprowadzonym niewyważeniem wirnika oraz zwiększoną rezystancją faz. Również w trakcie badań zauważono wzrost poślizgu z 0,218% dla silnika bez wad do 0,534% dla silnika ze zwiększonymi oporami ruchu. Celowe wydaje się stosowanie pomiarów poślizgu do detekcji strat mechanicznych. Nie wykazano natomiast zależności pomiędzy niesymetrycznością szczeliny powietrznej, a poślizgiem.

5.2.3.5. Detekcja wad na podstawie pomiarów i analiz pola magnetycznego

Do parametryzacji pola magnetycznego silnika (sygnału napięciowego $u(t)$ z układu UPM-02) zastosowano następujące miary: wartość szczytową, wartość średnią, wartość skuteczną, współczynnik szczytu, współczynnik impulsowości, współczynnik kształtu oraz kurtozę.

Współczynnik szczytu jest definiowany jako stosunek wartości szczytowej u_{PEAK} do wartości skutecznej sygnału u_{RMS} :

$$WS = \frac{u_{PEAK}}{u_{RMS}}. \quad (5.9)$$

Współczynnikiem kształtu nazywamy stosunek wartości skutecznej u_{RMS} do wartości średniej sygnału u_{AVG} :

$$WK = \frac{u_{RMS}}{u_{AVG}}. \quad (5.10)$$

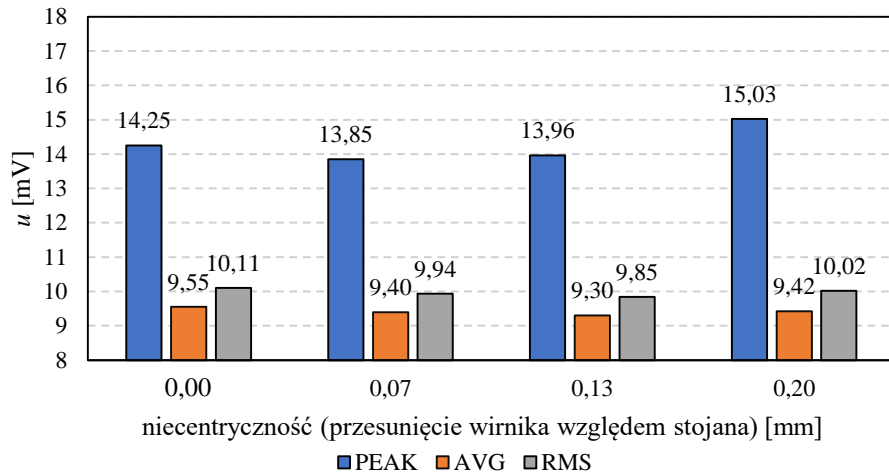
Współczynnik impulsowości to stosunek wartości szczytowej sygnału u_{PEAK} do wartości średniej u_{AVG} [171]:

$$WI = \frac{x_{PEAK}}{x_{AVG}}. \quad (5.11)$$

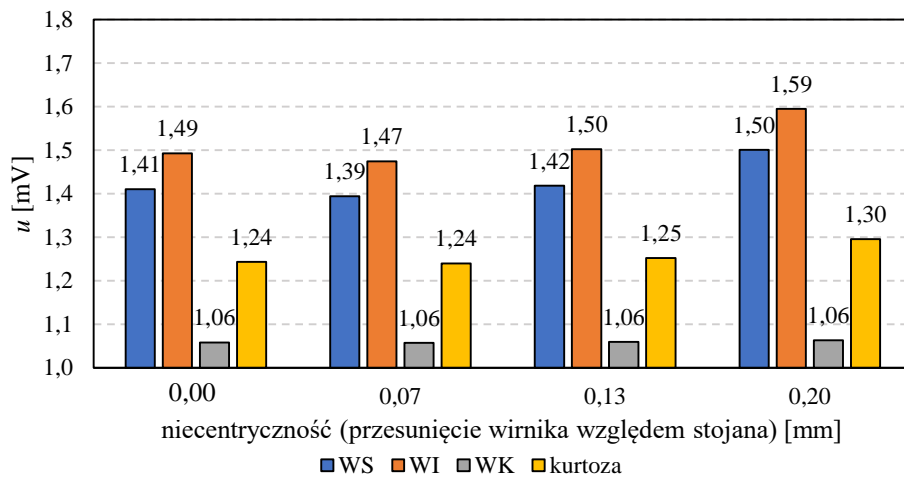
Kurtoza natomiast jest miarą, która określa spłaszczenie funkcji gęstości rozkładu amplitud i jest wyrażana wzorem [174]:

$$kurtoza = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u^4(t) dt}{\left[\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \right]^2}. \quad (5.12)$$

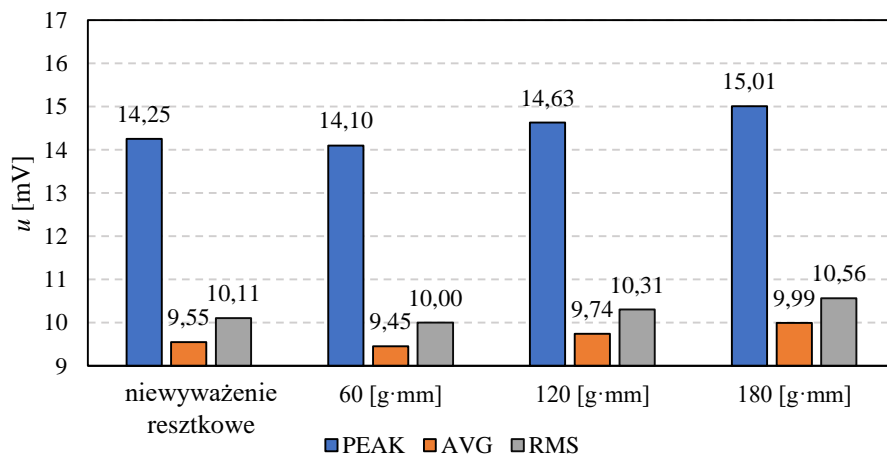
Wyniki parametryzacji sygnałów pochodzących z trójosiowego czujnika pola magnetycznego przedstawiono na rysunkach 5.35 - 5.40.



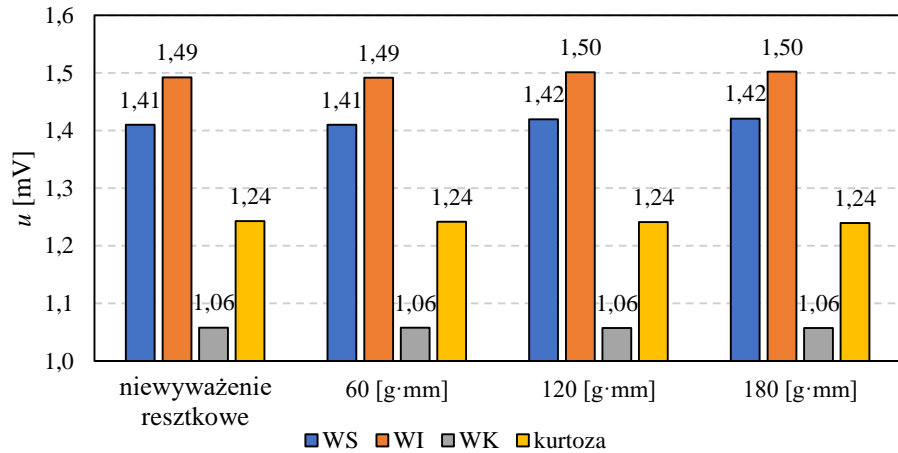
Rys. 5.35. Zestawienie wartości szczytowej, średniej i skutecznej napięcia wyjściowego z układu UPM-02 dla kierunku stycznego; wprowadzona wada silnika GUNT: niecentryczność wirnika względem stojana.



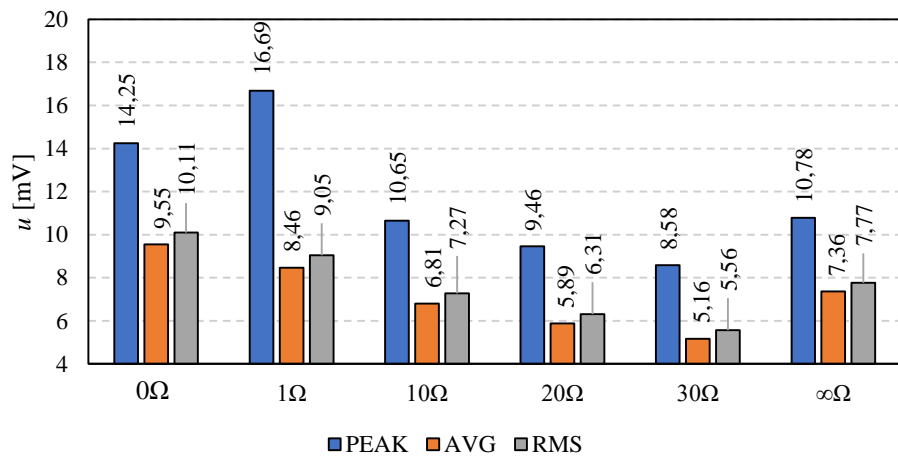
Rys. 5.36. Zestawienie współczynników szczytu, impulsowości i kształtu oraz kurtozy napięcia wyjściowego układu UPM-02 dla kierunku stycznego; wprowadzona wada: niecentryczność wirnika względem stojana.



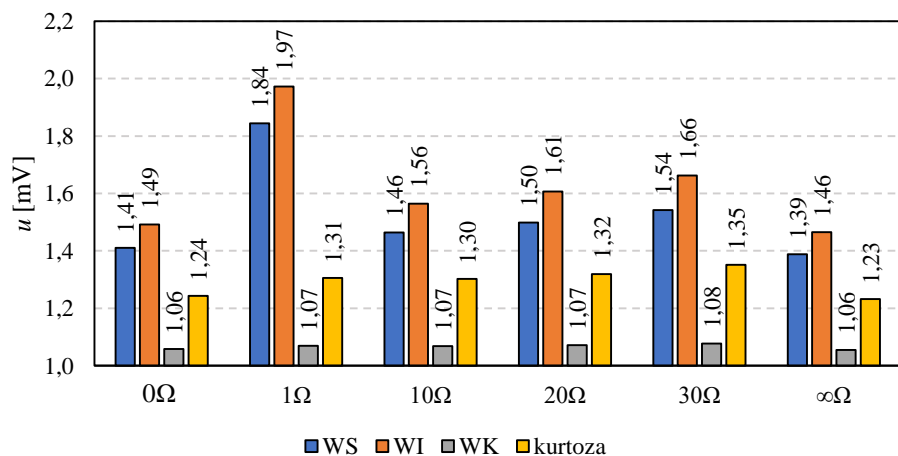
Rys. 5.37. Zestawienie wartości szczytowej, średniej i skutecznej napięcia wyjściowego z układu UPM-02 dla kierunku stycznego po wprowadzeniu dodatkowego niewyważenia wirnika silnika GUNT.



Rys. 5.38. Zestawienie współczynników szczytu, impulsowości i kształtu oraz kurtozy napięcia wyjściowego z układu UPM-02 dla kierunku stycznego po wprowadzeniu dodatkowego niewyważenia wirnika silnika GUNT.



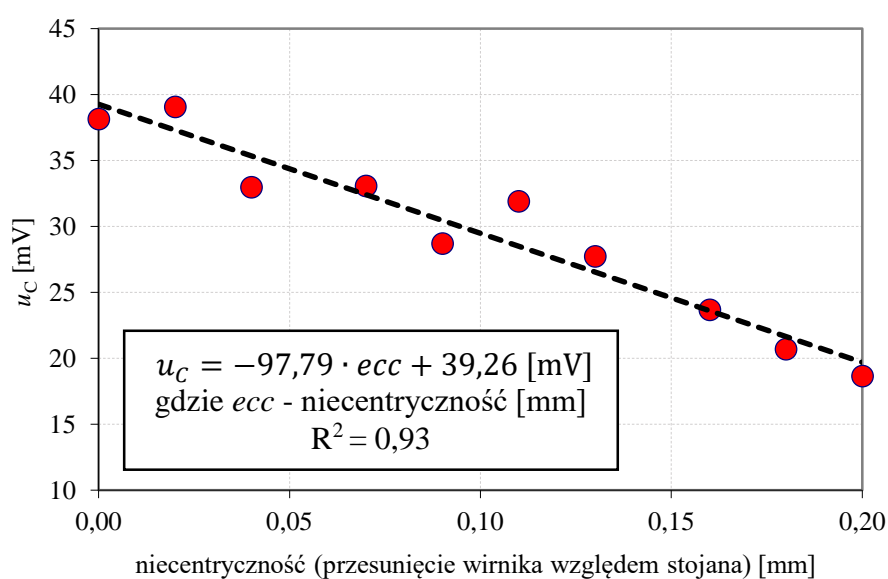
Rys. 5.39. Zestawienie wartości szczytowej, średniej i skutecznej napięcia wyjściowego z układu UPM-02 dla kierunku stycznego po wprowadzeniu dodatkowej rezystancji fazy L3 oraz odłączenie fazy L1.



Rys. 5.40. Zestawienie współczynników szczytu, impulsowości i kształtu oraz kurtozy wyjściowego z układu UPM-02 dla kierunku stycznego po wprowadzeniu dodatkowej rezystancji fazy L3 oraz odłączenie fazy L1.

Na podstawie wyników przedstawionych na rysunkach 5.35 - 5.40 można stwierdzić, że wprowadzone wady produkcyjne ASE raczej nie są możliwe do wykrycia na podstawie współczynnika kształtu i kurtozy. Pozostałe współczynniki (impulsowości i szczytu) wykazują małą wrażliwość na wprowadzane wady tj. niecentryczność wirnika i niewyważenie. Po wprowadzeniu wad większe zróżnicowanie zaobserwowano w przypadku wartości szczytowej, średniej i skutecznej parametryzujących sygnał z przetwornika pola magnetycznego. Jednak zmiany tych miar nie są znaczne po wprowadzeniu wad do silnika GUNT.

Pomiar pola poosiowego (z zastosowaniem cewki) okazał się skuteczny do wykrywania niecentryczności wirnika względem stojana (Rys. 5.41).



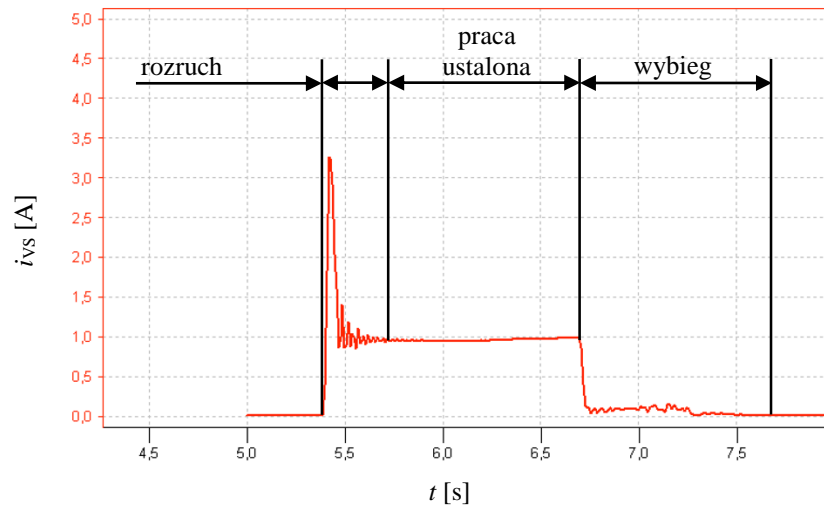
Rys. 5.41. Wykres zależności napięcia indukowanego w cewce pola poosiowego od wprowadzonej niecentryczności - przesunięcia wirnika względem stojana.

Zależność pokazana na rysunku 5.41 jest silnie liniowa, a natężenie pola poosiowego spada wraz ze zwiększaniem się niecentryczności.

5.2.3.6. Detekcja wad na podstawie analizy stanów nieustalonych

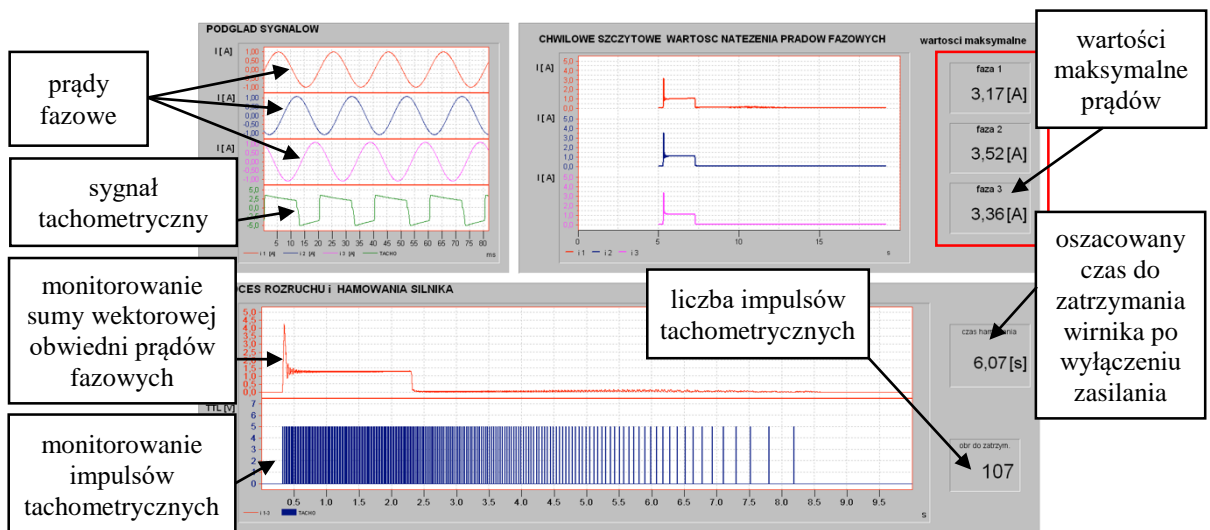
Praca asynchronicznego silnika elektrycznego podczas testowania będzie charakteryzowała się trzema fazami: rozruchem, pracą ustaloną i wybiegiem. Po włączeniu zasilania następuje rozruch silnika, podczas którego prądy fazowe mogą osiągnąć wartości 5-8 razy większe niż w trakcie pracy ustalonej. Wybieg silnika to faza pracy po odcięciu zasilania. Mimo, że nie jest dostarczana energia do układu wirnik nadal obraca się, stopniowo zmniejszając swoją prędkość obrotową proporcjonalnie do oporów ruchu (np. tarcia

w łożyskach czy oporów aerodynamicznych). Przykład faz pracy silnika asynchronicznego przedstawiono na rysunku 5.42.

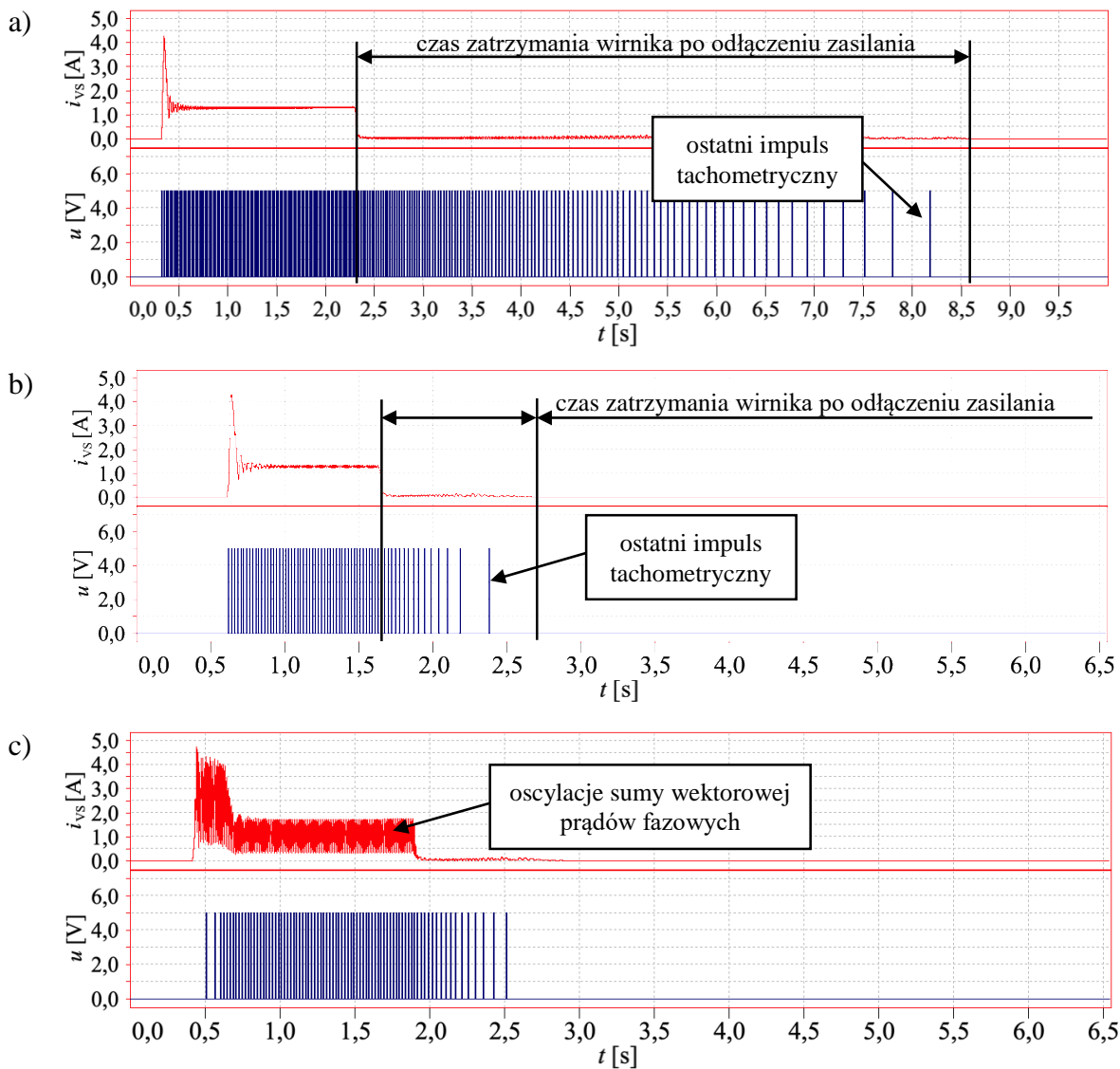


Rys. 5.42. Suma wektorowa obwiedni prądów fazowych i_{vs} stojana z zaznaczonymi fazami pracy asynchronicznego silnika elektrycznego GUNT PT500.19 - załączenie zasilania na ok. 1,5 s.

Na przebiegu sumy wektorowej obwiedni prądów fazowych (rys. 5.42) można zauważyć fazę rozruchu trwającą ok. 0,3 s. Po nagłym, ponad 3-krotnym wzroście i_{vs} następuje proces stabilizacji, a następnie wejście w fazę pracy ustalonej na czas ok. 1 s. Po wyłączeniu zasilania silnik przechodzi w fazę wybiegu, a przekładniki prądowe wbudowane w układ pomiarowy rejestrują prądy indukowane w uzwojeniach stojana w wyniku bezwładnościowych obrotów wirnika (praca generatorowa/prądnicowa). Gdy wirnik przestaje się obracać i następuje całkowite zakończenie pracy silnika suma wektorowa prądów przyjmuje wartość zerową. W ramach pracy została napisana aplikacja do śledzenia faz pracy silnika, którą zaprezentowano na rysunku 5.43.



Rys. 5.43. Widok aplikacji do śledzenia faz pracy ASE - silnik GUNT bez wad.



Rys. 5.44. Porównanie postaci charakterystyki $i_{vs}(t)$ i impulsów z sondy tachometrycznej dla silnika GUNT a) bez wprowadzonych wad, b) z wprowadzonymi oporami ruchu oraz c) ze zwiększoną rezystancją fazy L3 o 30Ω

Aplikacja umożliwia podgląd sygnałów prądów fazowych oraz sygnału tachometrycznego prędkości obrotowej, a także odczyt czasu zatrzymania, czy maksymalnych prądów rozruchowych. Czas zatrzymania wirnika obliczany jest na podstawie zaniku prądów indukowanych. Sygnał z czujnika tachometrycznego to impulsy TTL przyjmujące wartość TTL-High raz na obrót. Może to powodować problemy z precyzyjnym określeniem czasu zatrzymania silnika, a tym samym oporów ruchu. Na rysunku 5.44 porównano postacie charakterystyk $i_{vs}(t)$, impulsów z sondy tachometrycznej oraz zaznaczono czasy zatrzymania po odłączeniu zasilania i wprowadzeniu różnego typu wad. Zwiększenie oporów ruchu spowodowało spadek czasu zatrzymania silnika prawie 6-krotnie (Rys. 5.44b),

a prądy fazowe zwiększyły swoje wartości skuteczne. W przypadku zwiększonej rezystancji fazy L3 (Rys. 5.44c) w fazie biegu ustalonego występują duże oscylacje sumy wektorowej obwiedni prądów fazowych, co może być symptomem charakterystycznym dla tego typu wady.

Podsumowując, metoda śledzenia faz pracy silnika na podstawie sumy wektorowej obwiedni prądów fazowych może być pomocna przy identyfikowaniu zarówno zwiększonych oporów ruchu wynikających z nadmiernego tarcia, a także nierównej rezystancji uzwojeń. Pomiary i analizy wykonane w tym zakresie mogą być wykonywane jako badania uzupełniające w procesie testowania odbiorczego.

5.3. Weryfikacja metodyki - silniki produkowane seryjnie BESEL 2SIEK 63-4A2

5.3.1. Opis obiektu

W ujęciu utylitarnym celowe było przeprowadzenie badań na silnikach produkowanych seryjnie. Obiektami badań były 4 silniki BESEL 2SIEK 63-4A2 o parametrach przedstawionych w tabeli 5.5.

Tab. 5.5. Parametry techniczne silnika BESEL 2SIEK 63-4A2 [176]

parametr	wartość [jednostka]
moc znamionowa	0,18 [kW]
napięcie pracy Δ/Y	245/420 [V]
częstotliwość sieci	50-60 [Hz]
prędkość obrotowa (znamionowa)	1360 [min^{-1}]
typ pracy	S1 (praca ciągła)

W jednym egzemplarzu silnika BESEL przednia tarcza łożyskowa silnika została zmodyfikowana w taki sposób, aby umożliwić wprowadzanie przesunięcia wirnika względem stojana - niecentryczności (Rys. 5.45).

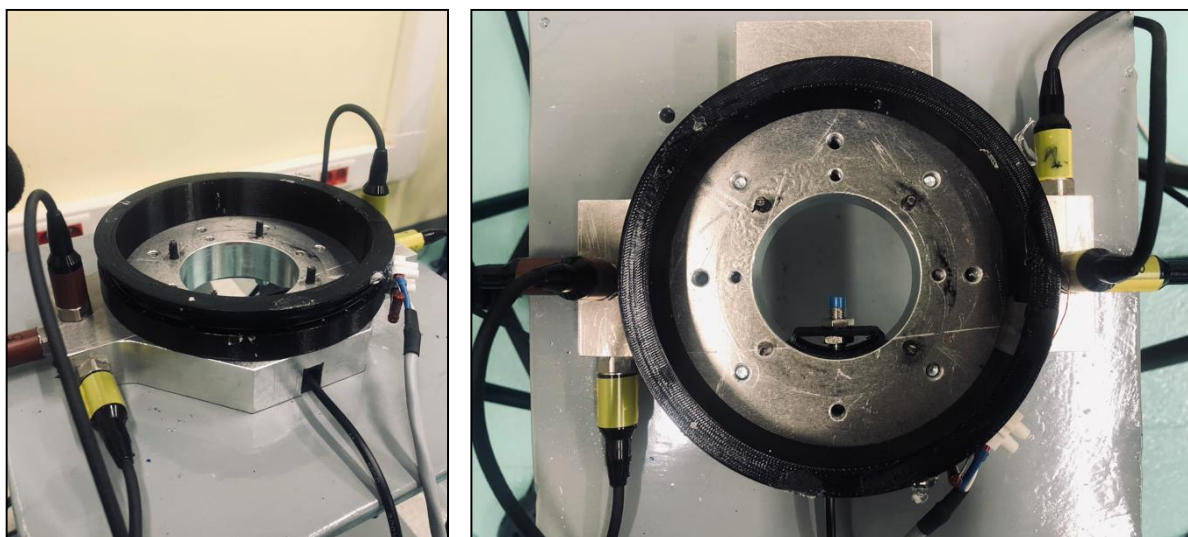


Rys. 5.45. Widok wewnętrznej części tarczy łożyskowej silnika BESEL z widoczną modyfikacją umożliwiającą wprowadzenie niecentryczności.

Pozostałe 3 silniki były w fabrycznie nowym stanie technicznym. Wprowadzanymi wadami produkcyjnymi do zaadaptowanego do eksperymentu czynnego silnika były: niecentryczność (od 0 do 0,3 mm), niewyważenie (60 g·mm) oraz zwiększenie rezystancji fazy w podobnym zakresie jak w przypadku silnika GUNT PT500.19.

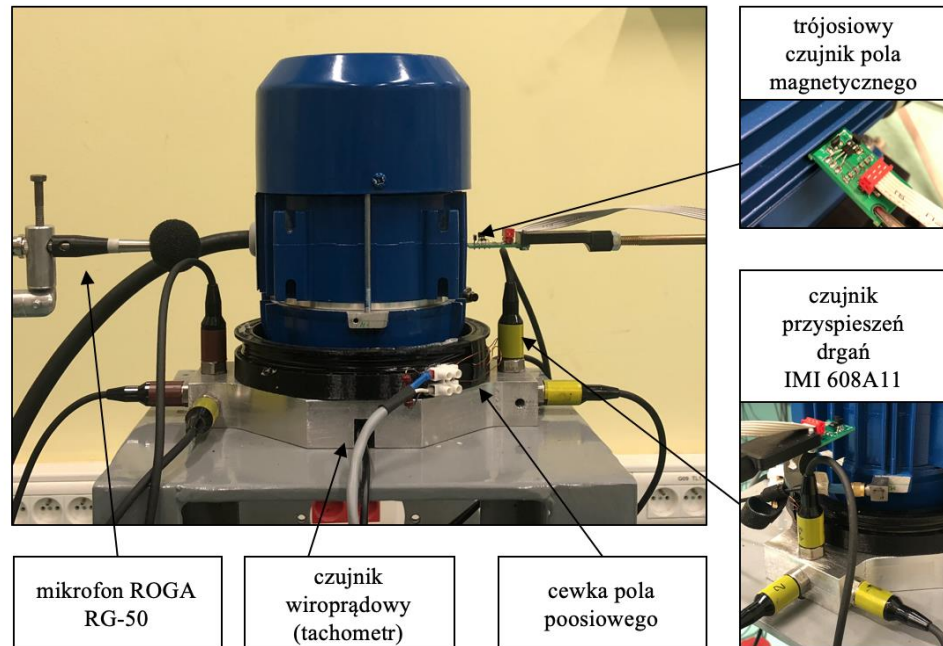
5.3.2. Opis stanowiska badawczego

W celu przeprowadzenia testów silnika zaprojektowano i wykonano prototyp stanowiska do testowania silników kołnierowych. Silnik w trakcie testów osadzony był na aluminiowej płycie (stanowiącej wraz z zamontowanymi do niej czujnikami zintegrowaną głowicę pomiarową). Głowica posiada w górnej części kołki prowadzące, zapewniające stabilną pozycję silnika podczas testów. Widok głowicy zaprezentowano na rys. 5.46.



Rys. 5.46. Widok zintegrowanej głowicy pomiarowej stosowanej do testowania silników asynchronicznych BESEL 2SIEK 63-4A2.

W głowicy zamontowano czujnik tachometryczny, a także 6 czujników przyspieszeń drgań IMI 608A11. Czujniki przyspieszeń drgań zostały zamontowane w sposób umożliwiający pomiar drgań w 3 prostopadłych kierunkach pomiarowych po obu stronach silnika. Zastosowanie zintegrowanej głowicy pomiarowej może umożliwić skrócenie czasu przygotowawczo-zakończeniowego do przeprowadzenia testów odbiorczych. Atutem takiego rozwiązania jest brak konieczności montowania każdorazowo czujników na korpusie silnika oraz powtarzalne warunki pomiarów. Widok całego prototypu stanowiska przedstawiono na rysunku 5.47.

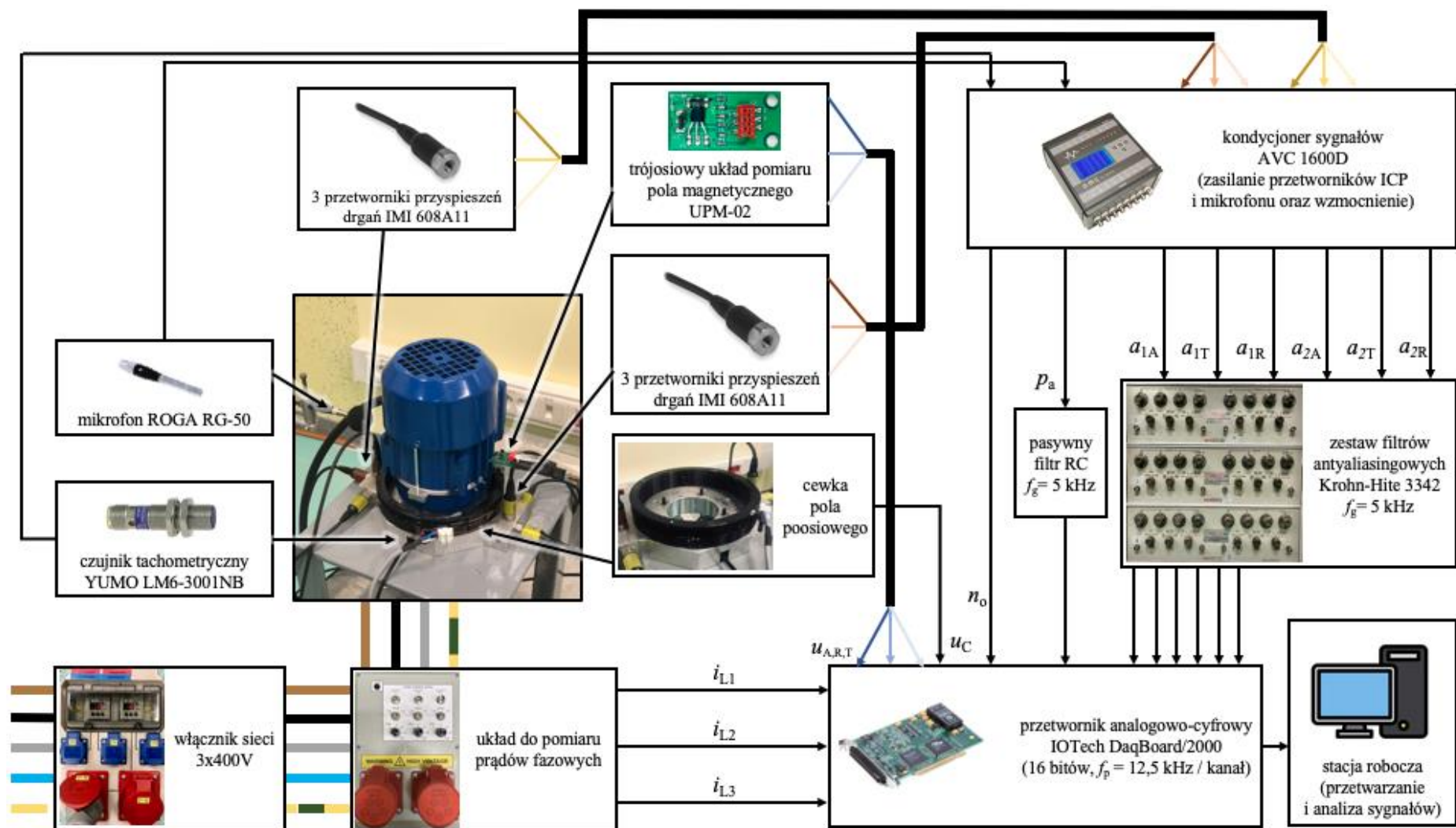


Rys. 5.47. Prototyp stanowiska do testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych BESEL 2SIEK 63-4A2.

Schemat połączeń elementów systemu stosowanego podczas badań silników BESEL zaprezentowano na rysunku 5.48. Emitowany przez testowany silnik hałas rejestrowano mikrofonem ROGA RG-50 w odległości 50 mm od korpusu silnika. Cewka pola poosiowego została również zintegrowana z głowicą pomiarową, w okolicy przedniej tarczy łożyskowej. Cewka nie stykała się bezpośrednio z korpusem silnika. Pozostała część sygnałów diagnostycznych oraz zastosowanych układów pomiarowych jest identyczna jak w przypadku silnika GUNT PT500.19 (opisana w rozdziale 5.2.2).

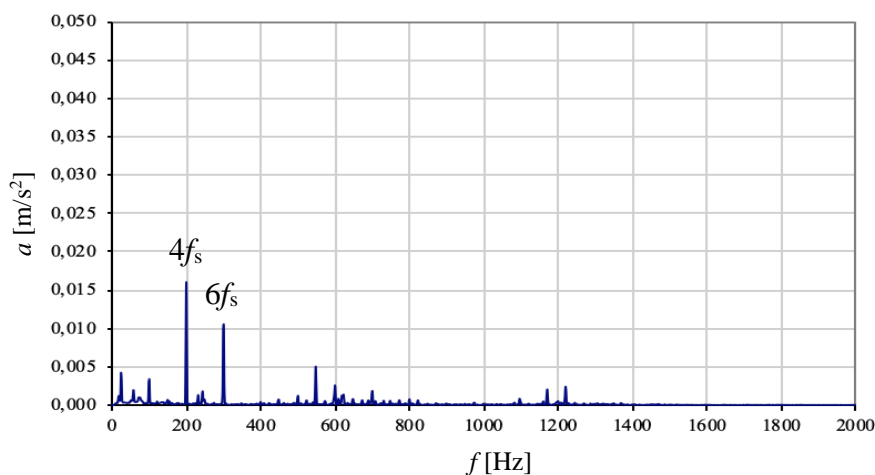
5.3.3. Wpływ ośrodka sprzęgającego na drgania rejestrowane na głowicy pomiarowej

Aby transmisja drgań z obiektu do przetwornika była limitowana w jak najszerszym paśmie częstotliwości producenci przetworników drgań zalecają, aby były one montowane do obiektu poprzez połączenie gwintowe lub z zastosowaniem np. wosku pszczelego (połączenie adhezyjne) [177, 178]. Założeniem prototypu stanowiska było zintegrowanie przetworników drgań z głowicą pomiarową, na której osadzony jest testowany silnik. Zgodnie z zaleceniami producenta przetworniki drgań IMI 608A11 zostały przykręcone do głowicy pomiarowej. Pomiar drgań realizowany był zatem na podstawie silnika, a nie na jego korpusie czy tarczy łożyskowej, co może wprowadzać zmiany w składzie widmowym drgań. Jest to spowodowane tłumieniem drgań przy kontakcie silnika z głowicą oraz tłumieniem samego materiału głowicy

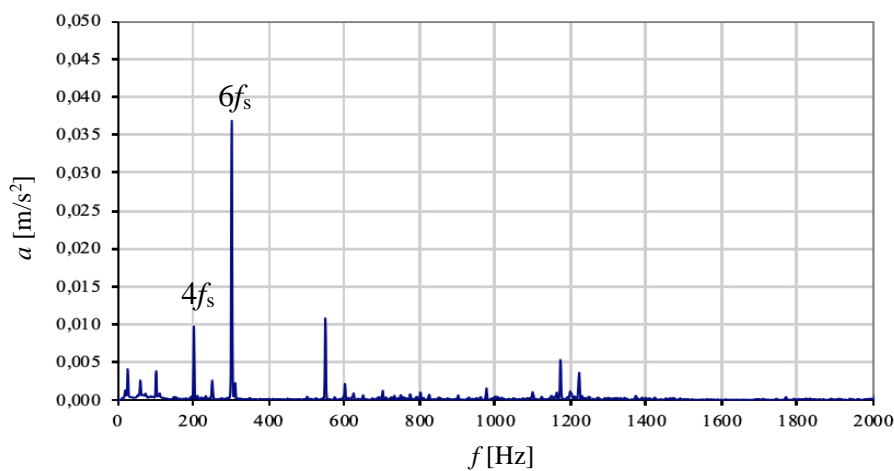


Rys. 5.48. Schemat połączeń układu pomiarowego wykorzystany w testach silników BESEL 2SIEK 63-4A2.

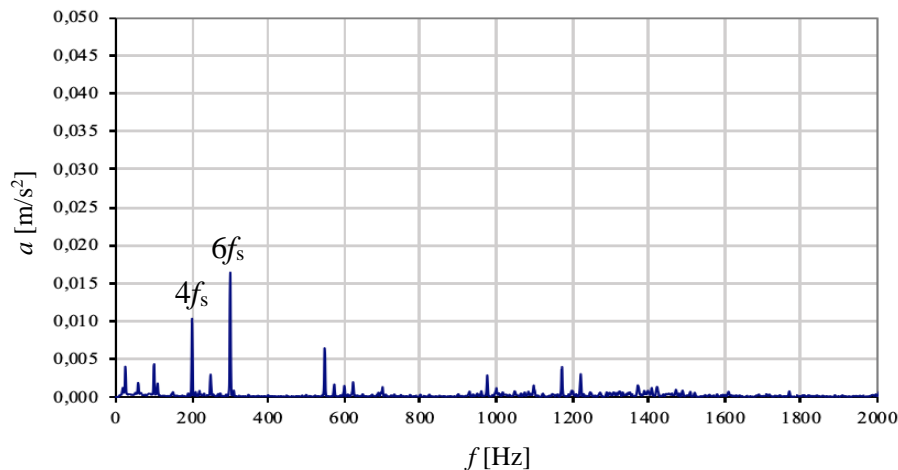
(aluminium). Rozważono zastosowanie jako ośrodka sprzęgającego oleju o wysokiej lepkości lub smaru stałego pomiędzy aluminiową podstawą, a silnikiem w celu zapewnienia lepszej transmisji z silnika do przetworników. Wykonano 6 pomiarów dla każdego ze sposobów kontaktu silnika z głowicą pomiarową: połączenie na sucho, połączenie z zastosowaniem oleju o wysokiej lepkości oraz połączenia poprzez smar stały. Badania przeprowadzono dla dwóch nowych silników i silnika po modyfikacji przedniej tarczy łożyskowej. Dokonano porównania widm przyspieszeń drgań dla każdego z typów połączeń. Przykładowe widma drgań głowicy pomiarowej z zamontowanym i pracującym silnikiem BESEL (wymuszenie operacyjne) zaprezentowano na rysunkach 5.49 - 5.51. Największe różnice w składzie widmowym odnotowano dla kierunku promieniowego. Alternatywnie można także zastosować wymuszenie młotkiem modalnym (test impulsowy) i porównać transmitancje dla różnych sposobów sprzężenia silnika z głowicą pomiarową.



Rys. 5.49. Widmo przyspieszeń drgań zintegrowanej głowicy pomiarowej w kierunku promieniowym dla kontaktu suchego silnika z głowicą.



Rys. 5.50. Widmo przyspieszeń drgań zintegrowanej głowicy pomiarowej w kierunku promieniowym dla kontaktu silnika z głowicą poprzez ciekłą warstwę oleju o wysokiej lepkości.



Rys. 5.51. Widmo przyspieszeń drgań zintegrowanej głowicy pomiarowej w kierunku promieniowym dla kontaktu silnika z głowicą poprzez cienką warstwę smaru stałego.

Na widmach wyraźne różnice występują w paśmie powyżej 400 Hz. Różnice w wartościach składowych $4f_s$ i $6f_s$ są również zauważalne. Wyboru sposobu sprzężenia silnika z podstawą dokonano na podstawie stosunków uśrednionych wartości skutecznych a_{RMS} (pasmo do 5 kHz) wyznaczonych dla kontaktu poprzez olej ($a_{RMS,O}$) lub smar ($a_{RMS,S}$) do uśrednionych wartości skutecznej a_{RMS} dla kontaktu bez ośrodka sprzęgającego ($a_{RMS,D}$). Średnie wartości a_{RMS} obliczono dla pomiarów wszystkich silników we wszystkich kierunkach pomiarowych. Uzyskano stosunki:

$$\frac{\bar{a}_{RMS,O}}{\bar{a}_{RMS,D}} = 1,302 \quad (5.13)$$

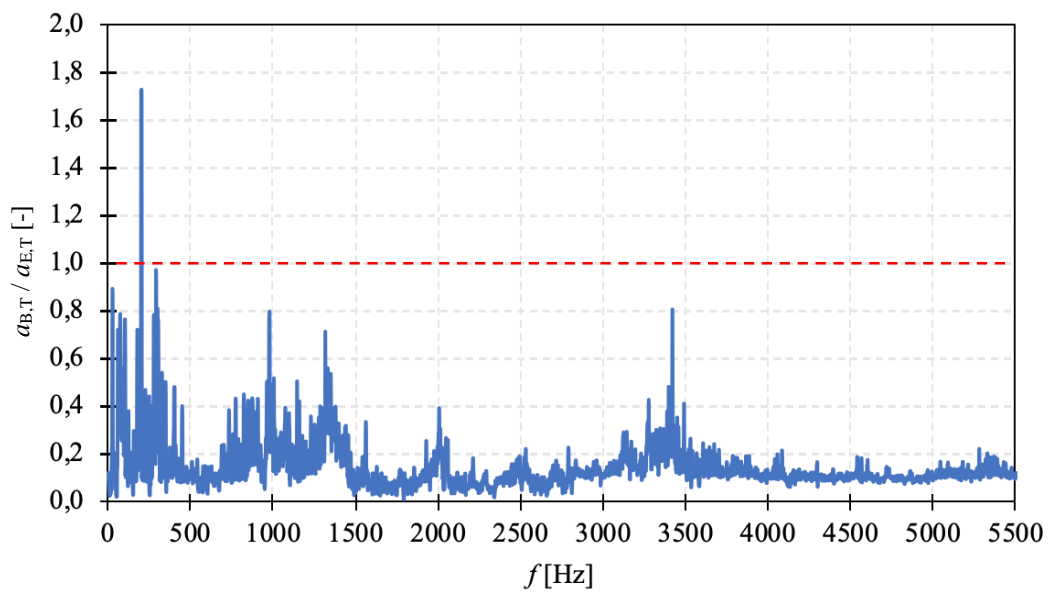
$$\frac{\bar{a}_{RMS,S}}{\bar{a}_{RMS,D}} = 1,207 \quad (5.14)$$

Różnice wyznaczonych współczynników są niewielkie, jednak większy współczynnik uzyskano dla kontaktu silnika z głowicą pomiarową poprzez olej. Dlatego do dalszych badań wybrano sprzężenie silnika z głowicą przy pomocy warstwy oleju o wysokiej lepkości.

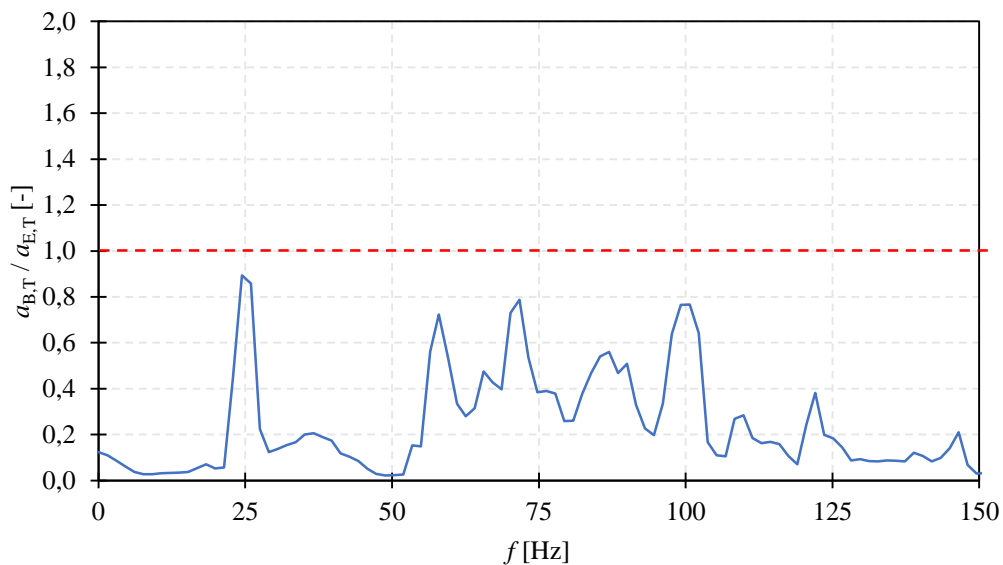
Porównano również drgania rejestrowane na przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL i drgania rejestrowane na głowicy pomiarowej. Sporządzono charakterystyki będące stosunkiem wartości składowych widma sygnału rejestrowanego na głowicy pomiarowej (B) do wartości składowych widma sygnału rejestrowanego bezpośrednio na tarczy łożyskowej (E). Do rejestracji drgań na tarczy łożyskowej wykorzystano trójosiowy czujnik przyspieszeń drgań DYTRAN 3023M2 (Rys. 5.52). Przykładowe postacie tych charakterystyk dla kierunku stycznego przedstawiono na rysunkach 5.53 - 5.56.



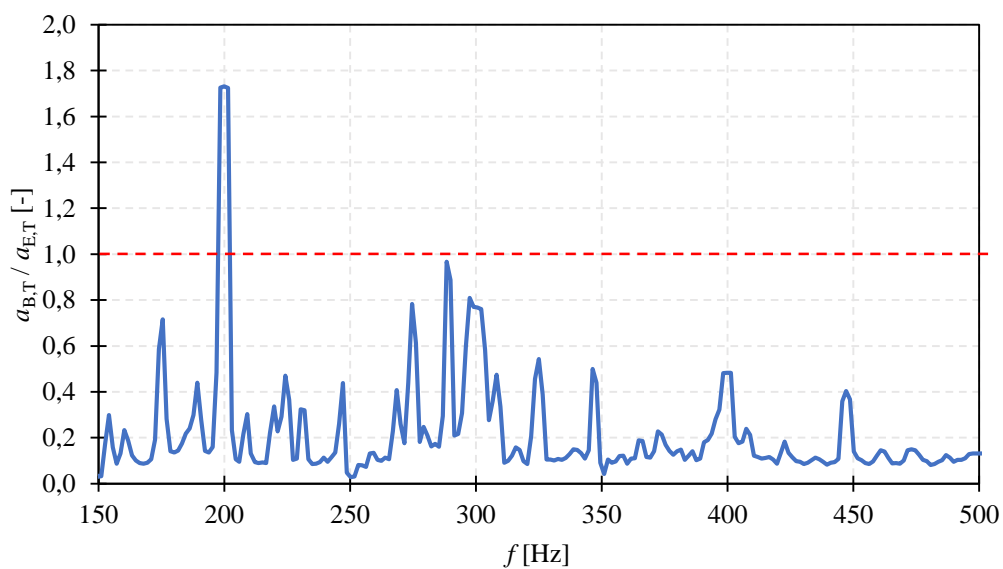
Rys. 5.52. Sposób montażu czujnika DYTRAN 3023M2 na przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL 2SIEK 63-4A2.



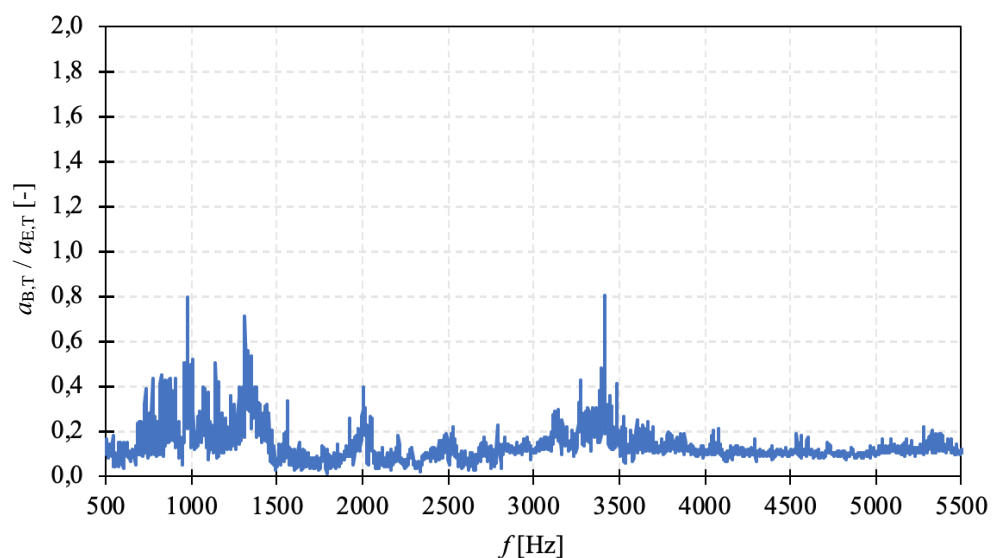
Rys. 5.53. Stosunek widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na głowicy pomiarowej w kierunku stycznym do widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL w kierunku stycznym (pasmo pomiarowe do 5 kHz).



Rys. 5.54. Stosunek widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na głowicy pomiarowej w kierunku stycznym do widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL w kierunku stycznym (zoom do 150 Hz).



Rys. 5.55. Stosunek widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na głowicy pomiarowej w kierunku stycznym do widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL w kierunku stycznym (zoom od 150 Hz do 500 Hz).



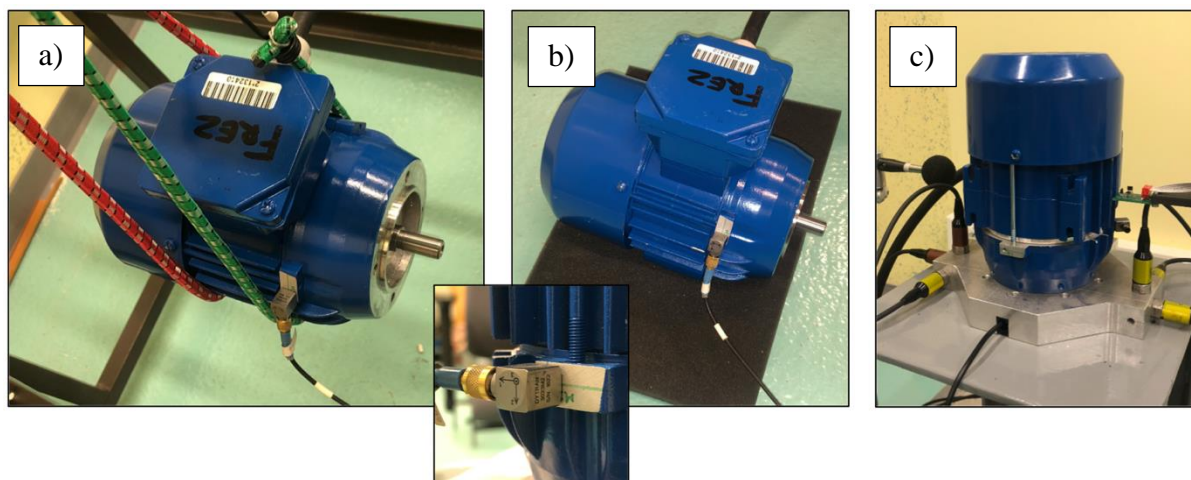
Rys. 5.56. Stosunek widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na głowicy pomiarowej w kierunku stycznym do widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na przedniej tarczy łożyskowej silnika BESEL w kierunku stycznym (zoom od 500 Hz do 5000 Hz).

Z porównania charakterystyk pokazanych na rysunkach 5.53-5.56 wynika, że prawie w całym paśmie sygnał rejestrowany na głowicy pomiarowej jest osłabiony. Wyjątkiem są lokalne maksima (wzmocnienia) widoczne na wykresach w niektórych pasmach, prawdopodobnie związane z rezonansami strukturalnymi całego układu silnik-głowica pomiarowa-podstawa stanowiska. Widoczne wzmocnienie sygnału następuje w obszarze 200 Hz. Poprawna interpretacja wyników testowania odbiorczego realizowanych na ww. stanowisku powinna uwzględniać charakterystykę przejścia sygnału drganiowego z silnika do przetworników. Powyższe charakterystyki mogą być podstawą do wyznaczenia krzywej korekcyjnej, umożliwiającej odwzorowanie sygnałów zarejestrowanych na silniku podczas pomiarów wykonywanych na czujnikach zamontowanych do głowicy. Można też w ramach dalszych prac rozważyć wykonanie eksperymentalnej analizy modalnej układu silnik-stanowisko.

5.3.4. Wpływ sposobu montażu silnika w trakcie testowania na drgania przedniej tarczy łożyskowej

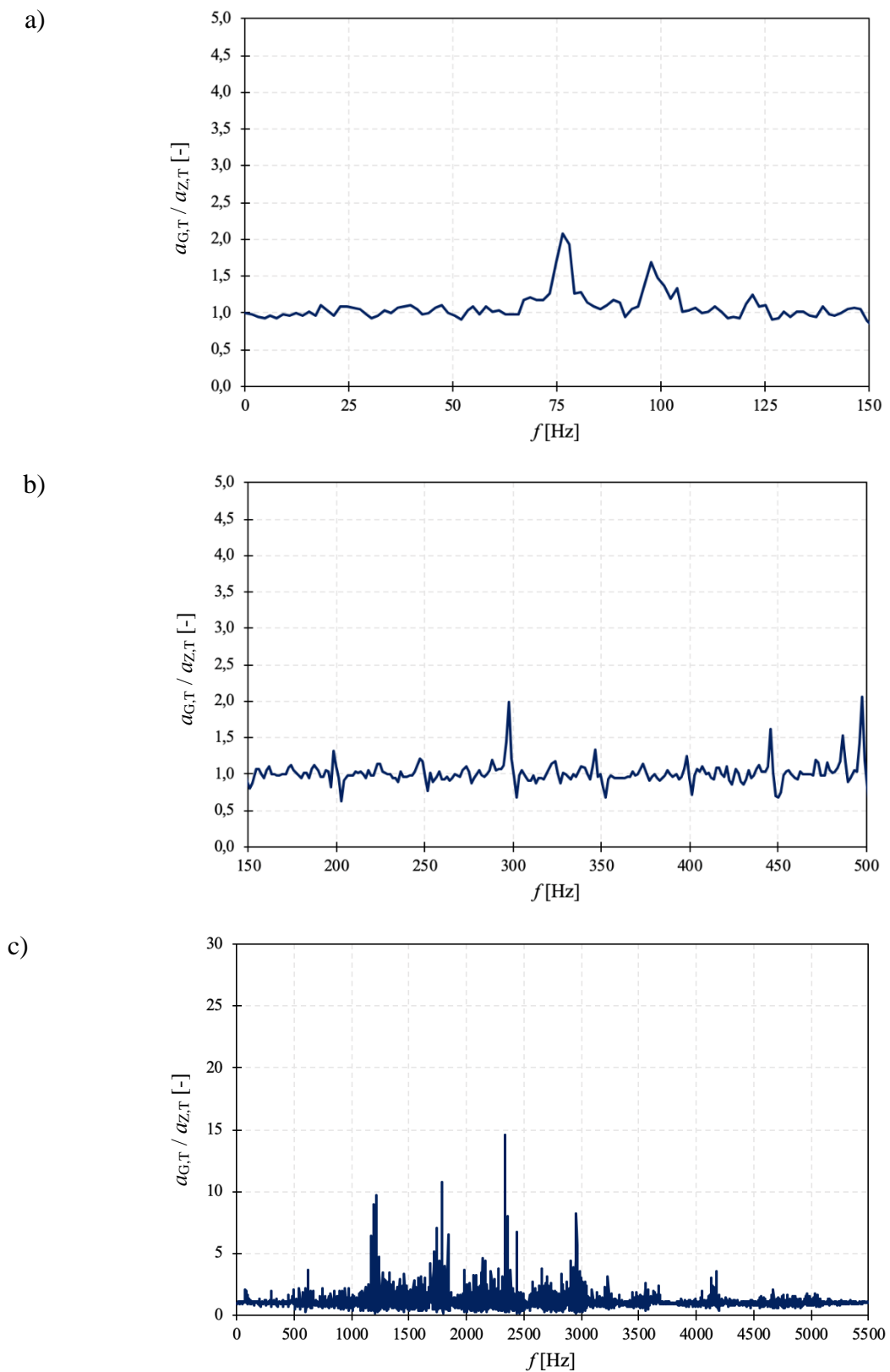
Dla silników BESEL przeprowadzono również analizę wpływu montażu/posadowienia silnika na drgania przedniej tarczy łożyskowej. Rozpatrzono trzy rodzaje sposobu montażu/posadowienia silnika w trakcie testów: zawiesie sprężyste, gąbka i prototyp stanowiska w ustawieniu pionowym. Drgania rejestrowano trójosiowym czujnikiem

DYTRAN 3023M2. Widoki ww. sposobów montażu/posadowienia przedstawiono na rysunku 5.57.

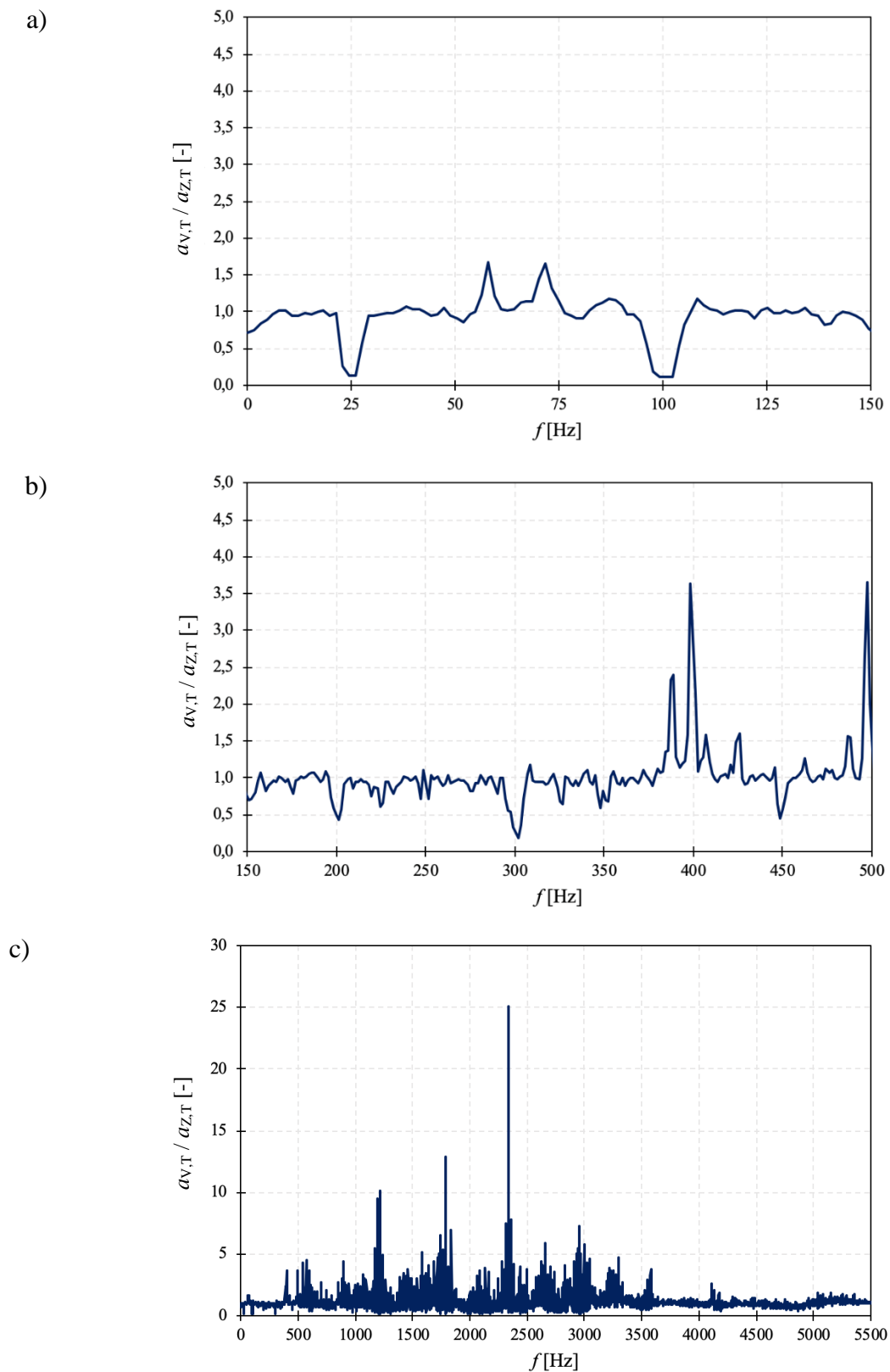


Rys. 5.57. Silnik BESEL 2SIEK 63-4A2 w trakcie testów: a) na zawieszonym sprężystym, b) na gąbce, c) na prototypie stanowiska w ustawieniu pionowym.

Wyznaczono stosunki widm przyspieszeń drgań rejestrowanych na silniku zamontowanym na gąbce (a_G) oraz na prototypie stanowiska w ustawieniu pionowym (a_V) do widma przyspieszeń drgań rejestrowanych na zawieszonym sprężystym (a_Z) - widmo referencyjne. Przykładowe postacie uzyskanych charakterystyk dla kierunku stycznego zaprezentowano na rys 5.58. i 5.59.



Rys. 5.58. Stosunek widma przyspieszeń drgań silnika BESEL zamontowanego na gąbce i zawiesiu sprężystym (kierunek styczny): a) zoom do 150 Hz, b) zoom od 150 do 500 Hz, c) pasmo do 5 kHz.



Rys. 5.59. Stosunek widma przyspieszeń drgań silnika BESEL zamontowanego na prototypie stanowiska w kierunku pionowym i zawiesiu sprężystym (kierunek styczny): a) zoom do 150 Hz, b) zoom od 150 do 500 Hz, c) pasmo do 5 kHz.

W odniesieniu do widma referencyjnego (montaż na zawieszaniu) posadowienie silnika na gąbce wykazało niewielkie wzmocnienia w okolicy 75, 100, 300 i 500 Hz. Można stwierdzić, że gąbka nie powoduje znacznej zmiany składu widmowego przyspieszeń drgań w stosunku do montażu na zawieszaniu sprężystym. Natomiast w przypadku montażu silnika na stanowisku w ustawieniu pionowym widoczne są osłabienia składowych sygnału o częstotliwościach 25, 100, 200 i 300 Hz. Są to odpowiednio składowa obrotowa f_o i parzyste nadharmoniczne częstotliwości sieciowej f_s . Warto zatem zwrócić uwagę na charakter drgań w zależności od sposobu montażu silnika na wybranym stanowisku testowym. W ramach dalszych badań prototypu stanowiska zostaną wyznaczone i uwzględnione charakterystyki korekcyjne, które pozwolą na odwzorowanie pomiarów prowadzonych na zawieszaniu sprężystym w trakcie wykonywania testów odbiorczych silników z użyciem prototypu stanowiska testowego.

5.3.5. Wyniki pomiarów i analiz

Sygnały zarejestrowane na silniku BESEL 2SIEK 63-4A2 poddano tym samym analizom i parametryzacji co sygnały pozyskane z silnika GUNT PT500.19. Uzyskane wyniki badań wykazują niewielkie różnice w stosunku do wyników pomiarów i analiz przeprowadzonych na silniku badawczym GUNT PT500.19. Wyniki wybranych badań silników BESEL zamieszczono w załącznikach do pracy. Nieznaczne różnice pomiędzy silnikami produkowanymi seryjnie, a silnikiem badawczym mogą wynikać zarówno z warunków prowadzenia testów, jak i samej konstrukcji obu rodzajów obiektów. Silnik GUNT PT500.19 jest silnikiem w całości zmodyfikowanym. Tarcze łożyskowe nie mają bezpośredniego kontaktu z obudową uzwojeń stojana. Ze względu na swoją konstrukcję charakteryzują się dużą podatnością na drgania w kierunku osiowym i poziomym, czego skutkiem były wyższe wartości drgań rejestrowane na przetworniku 1 - zamontowanym na górnej części tarczy łożyskowej, w porównaniu do pomiarów realizowanych na przetworniku 2 zamontowanym na bocznej części tarczy łożyskowej. Charakter drgań mierzonych na głowicy pomiarowej w trakcie testów silników BESEL również mógł być odmienny w stosunku do drgań na silniku GUNT. Wartości składowych widm w przypadku silników BESEL były zdecydowanie niższe niż w przypadku silnika GUNT.

5.4. Proponowana metodyka oceny jakości wykonania i testowania odbiorczego ASE

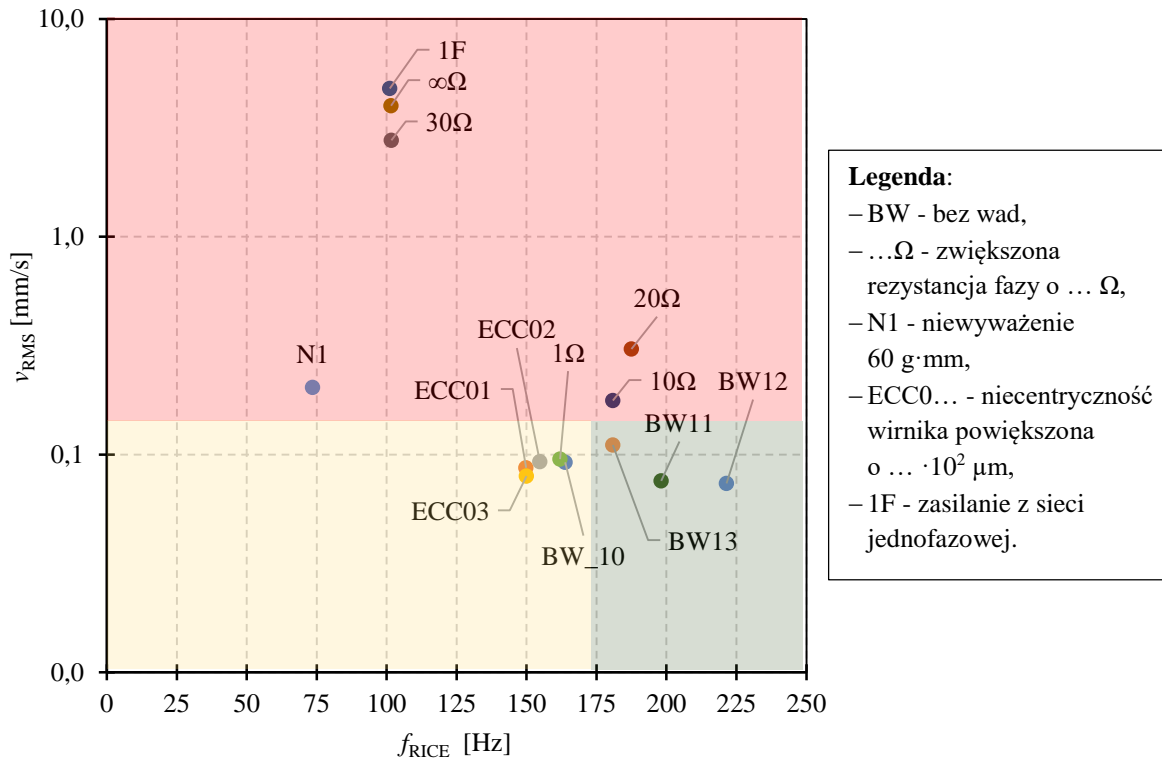
Określenie przydatności poszczególnych metod i technik parametryzacji i analiz sygnałów diagnostycznych do detekcji wad produkcyjnych ASE przedstawiono w tabeli 5.6.

Wskazano przydatność metod analizy i parametryzacji sygnałów diagnostycznych rejestrowanych na silnikach BESEL. Zastosowanie analizy wielosymptomowej może wspomóc proces detekcji wad produkcyjnych, a także pozwolić na określenie ogniwa produkcyjnego generującego te wady. W ramach dalszych badań planowane jest podjęcie współpracy z producentem silników oraz pozyskanie reprezentatywnej próbki silników bez wad oraz ze zidentyfikowanymi wadami produkcyjnymi. Taki zestaw testowy pozwoli na pełną walidację proponowanej metodyki testowania odbiorczego oraz określenie wartości kryterialnych oceny jakości wykonania ASE.

Wyniki pomiarów i analiz wykonanych dla silnika modelowego GUNT PT500.19 oraz dla zestawu silników BESEL 2SIEK 63-4A2 umożliwiły zarysowanie metody oceny jakości wykonania asynchronicznych silników elektrycznych dokonywanej w ramach testowania odbiorczego. Podstawą do oceny są dwie miary: v_{RMS} oraz częstotliwość Rice'a wyznaczona na podstawie sygnału prędkości drgań w paśmie do 1000 Hz. Wartości skuteczne prędkości drgań są miarą określającą intensywność drganiową badanego obiektu. Miara ta jest powszechnie stosowana jako podstawowy parametr świadczący o stanie technicznym maszyn wirujących w kontekście amplitudowym. Częstotliwość Rice'a natomiast pozwala na określenie średniej częstotliwości analizowanego procesu np. drgań. Jest to zatem miara umożliwiająca oszacowanie charakteru oddziaływań dynamicznych silnika w aspekcie częstotliwościowym. Korzystając z obu tych miar możliwe jest utworzenie płaszczyzny obserwacji stanów $v_{RMS} - f_{RICE}$ umożliwiającej uproszczoną klasyfikację silników zarówno w ujęciu amplitudowym, jak i częstotliwościowym. Przykład płaszczyzny $v_{RMS} - f_{RICE}$ sporządzonej dla pomiarów drgań w kierunku stycznym dla silników BESEL przedstawiono na rys. 5.60.

Tab. 5.6. Porównanie potencjału wykrywania wad produkcyjnych poszczególnych metod analizy i parametryzacji sygnałów diagnostycznych [opr. własne]

			wady produkcyjne			
			niecentryczność	niewyważenie	zwiększona rezystancja fazy	zwiększone opory ruchu
metody detekcji wad produkcyjnych	pomiary i analizy drgań	podst. parametryzacja	✗ brak możliwości detekcji wad - wzrost intensywności drgań przy pogorszeniu stanu technicznego silnika			
		analiza widmowa	!detekcja wad możliwa w ograniczonym zakresie - może wystąpić problem w rozróżnieniu składowych sygnału identyfikujących wady produkcyjne			
		dekompozycja MSA	✓ możliwa detekcja	✓ możliwa detekcja	✓ możliwa detekcja	✓ możliwa detekcja
		częstotliwość Rice'a	✗ brak możliwości detekcji wad - wzrost częstotliwości Rice'a procesu przy pogorszeniu stanu technicznego silnika, możliwe określenie natury występujących wad			
	pomiary i analizy hałasu	analiza oktawa	✗ brak możliwości detekcji wad - występuje niewielka wrażliwość na zmianę stanu technicznego silnika			
		pomiar L_{in} i L_a	✗ brak możliwości detekcji wad - występuje niewielka wrażliwość na zmianę stanu technicznego silnika, pomocne w określeniu parametrów akustycznych			
		dekompozycja MSA	✓ możliwa detekcja	✓ możliwa detekcja	✓ możliwa detekcja	✓ możliwa detekcja
	pomiary i analizy prądów	podstawowa parametryzacja	✗ brak możliwości detekcji wad - występuje niewielka wrażliwość wartości skutecznych prądów na zmianę stanu technicznego silnika			
		analiza wektorów prądów fazowych	!detekcja wad możliwa w ograniczonym zakresie - widoczne podobne zmiany w trajektoriach wektorów		✓ możliwa detekcja	!detekcja wad możliwa w ograniczonym zakresie
	podstawowa parametryzacja pola magnetycznego		✗ brak możliwości detekcji wad - występuje niewielka wrażliwość miar na zmianę stanu technicznego silnika			
	pomiar i analiza poślizgu		✗ brak możliwości detekcji wady	✗ brak możliwości detekcji wad - wzrost poślizgu przy pogorszeniu się stanu technicznego		
	analiza stanów nieustalonych		✗ brak możliwości detekcji wady	!niewielkie wydłużenie czasu zatrzymania	✓ możliwa detekcja	✓ możliwa detekcja



Rys. 5.60. Przykład płaszczyzny stanów v_{RMS} - f_{RICE} dla testowanych wariantów silników BESEL (pomiar drgań w kierunku stycznym).

Zaprezentowana płaszczyzna została podzielona na 3 strefy:

- zielona - silniki najlepszej jakości charakteryzujące się np. cichobieżnością, bez istotnych wad produkcyjnych,
- żółta - silniki dobrej jakości z wadami wpływającymi w nieznaczny sposób na kulturę pracy np. podniesiony poziom hałasu w porównaniu do silników w strefie zielonej,
- czerwona - silniki z wadami produkcyjnymi, które nie powinny trafić na rynek konsumencki, znaczne wady produkcyjne (podwyższony poziom drgań/hałasu, znaczne niewyważenie wirnika, niesymetryczność rezystancji uzwojeń).

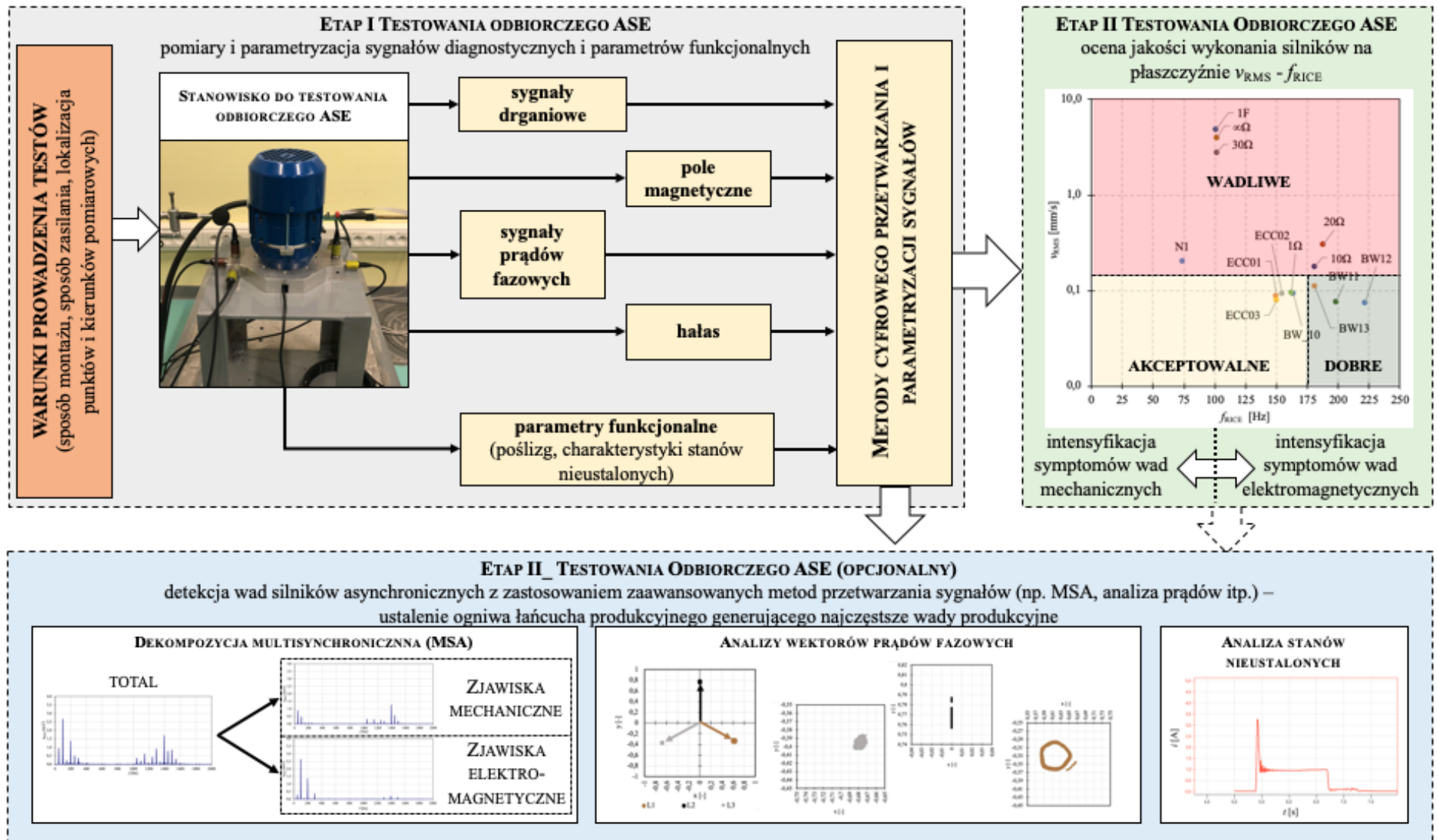
Jak widać wstępne określenie jakości wykonania silników po przeprowadzeniu testów odbiorczych jest możliwe. Fabrycznie nowe silniki (oznaczenia BW_11, BW_12 i BW_13) znajdują się w strefie zielonej. Silniki te charakteryzowały się cichą pracą, bez zakłóceń. Silniki z wadami nie objawiającymi się zwiększoną intensyfikacją zjawisk zarówno natury mechanicznej jak i elektromagnetycznej znajdują się w strefie żółtej (oznaczenia BW_10, ECC01, ECC02, ECC03 oraz 1Ω). Silniki, w których wprowadzone wady objawiały się znacznym pogorszeniem parametrów WA podczas testów znalazły się w strefie czerwonej (oznaczenia N1, 10Ω, 20Ω, 30Ω, $\infty\Omega$ i 1F). Można zatem stwierdzić, że w tym przypadku

klasyfikacja zestawu przetestowanych nowych silników BESEL oraz silnika BESEL z wprowadzonymi intencjonalnie wadami produkcyjnymi była skuteczna.

Wprowadzony podział stref jest podziałem określonym na podstawie przeprowadzonych badań dla jednego typu silnika. Aby powyższy sposób klasyfikacji był skuteczny potrzebna jest baza danych sygnałowych utworzona na podstawie większej grupy silników ze zidentyfikowanymi wadami. Dysponowanie taką bazą umożliwi zaimplementowanie metod uczenia maszynowego do określenia wartości progowych klasyfikacji. Na tej podstawie możliwe będzie zastosowanie np. metod sztucznej inteligencji do automatycznej oceny jakości wykonania silników.

Obecnie stosowane procedury testowania odbiorczego ASE bazują głównie na pomiarach elektrycznych tj. prądy i napięcia fazowe, pomiary mocy chwilowej, a także na prostej parametryzacji sygnałów wibroakustycznych. Detekcja wad produkcyjnych przy pomocy tych metod może być utrudniona lub wręcz niemożliwa. Wskazane jest zatem udoskonalenie obecnych lub opracowanie zupełnie nowych metod testowania odbiorczego ASE, umożliwiających detekcję wad produkcyjnych oraz wskazanie ogniw łańcucha produkcyjnego wprowadzającego najczęstsze wady.

W ramach niniejszej pracy zaproponowano nową metodykę testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych. Uproszczony algorytm nowej metodyki testowania zaprezentowano na rysunku 5.61.



Rys. 5.61. Uproszczony algorytm proponowanej metodyki testowania odbiorczego ASE.

Proponowana metodyka testowania składa się z trzech etapów:

ETAP I - pomiar i parametryzacja sygnałów diagnostycznych rejestrowanych w otoczeniu testowanego silnika (sygnały wibroakustyczne, prądy fazowe, sygnały związane z polem magnetycznym silnika, charakterystyki stanów nieustalonych itp.);

ETAP II - oceny jakości wykonania silnika w ujęciu amplitudowo-częstotliwościowym na płaszczyźnie $v_{RMS} - f_{RICE}$; klasyfikacja do jednej z 3 klas: dobry, akceptowalny i zły; test wykonywany w sposób szybki na dedykowanym stanowisku;

ETAP III (opcjonalny) - detekcja wad ASE na podstawie zaawansowanych procedur przetwarzania sygnałów tj. dekompozycja multisynchroniczna (MSA), analiza wektorów fazowych oraz sumy wektorowej prądów zasilających, czy analizy stanów nieustalonych; na tej podstawie określenie ogniwa procesu produkcyjnego wprowadzającego wady.

Taka procedura testowania ASE wraz z zastosowaniem dedykowanego stanowiska testowego umożliwi przeprowadzenie kontroli jakości wszystkich wyprodukowanych egzemplarzy silników elektrycznych przy jednoczesnym polepszeniu skuteczności detekcji wad produkcyjnych.

6. WNIOSKI

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy sformułowano następujące wnioski oraz przesłanki do dalszych badań w zakresie metodyki testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych.

WNIOSKI POZNAWCZE:

- Zalecane aktualnie w pomiarach normowych wartości skuteczne prędkości drgań mogą być jedynie podstawą do określenia intensywności drgań, jednakże na ich podstawie detekcja wad produkcyjnych jest praktycznie niemożliwa. Metody te powinny zostać wzbogacone o zaawansowane techniki przetwarzania i analizy sygnałów.
- Miejsce i orientacja przetworników drgań - przednia tarcza łożyskowa, preferowane kierunki rejestracji drgań silnika: styczny i promieniowy. Wynika to z wysokiej informatywności lokalnej sygnałów drganiowych zarówno dla poliharmonik związanych ze zjawiskami mechanicznymi jak i elektromagnetycznymi w tych kierunkach.
- Widma sygnałów z czujnika pola magnetycznego w ujęciu jakościowym mają charakter poliharmoniczny. W ujęciu ilościowym mierzalne różnice wywołane wprowadzonymi wadami odnotowano dla wartości szczytowych, średnich i skutecznych napięcia wyjściowego z układu pomiaru pola magnetycznego UPM-02.
- Analiza składu widmowego drgań po umieszczeniu silnika na głowicy pomiarowej prototypu stanowiska badawczego wykazała konieczność uwzględniania wpływu rezonansów strukturalnych stanowiska.
- Duży potencjał w aspekcie diagnostycznym wykazuje metoda dekompozycji multisynchronicznej MSA, która pozwala rozseparować składowe sygnału pochodzące od zjawisk elektromagnetycznych i mechanicznych, oraz określić ich udział ilościowy w sygnale WA. Sprecyzowanie wartości kryterialnych klasyfikacji ASE w ujęciu dobry-wadliwy wymaga przeprowadzenia eksperymentu bierno-czynnego we współpracy z producentem silników.

- Widma przyspieszeń drgań w porównaniu z widmami prędkości charakteryzują się większą informatywnością. Wynika to z lepszej reprezentacji składowych wysokoczęstotliwościowych (powyżej 1 kHz).
- Pomiary i analizy hałasu mogą być mało skuteczne do wykrywania wad produkcyjnych z powodu wysokiego udziału tła akustycznego zarówno w laboratorium, jak i na halach produkcyjnych. Niemniej, zastosowanie dekompozycji MSA w dużej mierze eliminuje wpływ środowiska pomiarowego.
- Proponowane pomiary i analizy chwilowych wartości skutecznych i przesunięć fazowych prądów są wrażliwe na wady produkcyjne - mogą być stosowane jako pomiary uzupełniające.
- Zastosowanie korekcji AFC do precyzyjnego wyznaczania poślizgu z dokładnością do 0,0001 [%] pozwoliło na zastosowanie tej miary do badań nieobciążonego silnika. Wykazano, że większość wad (z wyjątkiem niecentryczności wirnika względem stojana) wpływa na zwiększenie poślizgu.

WNIOSKI UTYLITARNE (dot. warunków testowania i stosowanych metod):

- W czasie testowania zalecane jest połączenie silnika bezpośrednio do sieci 3-fazowej. Pozostałe rozpatrywane sposoby zasilania nie są zalecane ze względu na występowanie w sygnałach drgań i hałasu składowych niepożądanych (falownik) lub niestandardowy tryb pracy (zasilanie jednofazowe).
- Pomiary pola magnetycznego silnika przy pomocy magnetometru powinny być prowadzone w jak najbliższej odległości od środka korpusu ASE w kierunku stycznym bądź promieniowym. Dla testowanych silników lokalizacja została wybrana na podstawie mapowania pola - zaleca się wykonanie podobnych badań dla silników innych typów (w zależności od ilości par biegunów).
- Pomiar pola poosiowego przy pomocy cewki jest wrażliwy na niecentryczność wirnika względem stojana. Może być zastosowany do detekcji tej wady.
- Prowadzenie wielosymptomowego wnioskowania diagnostycznego np. na płaszczyźnie $v_{RMS} - f_{RICE}$ umożliwia zarówno ocenę intensywności wad oraz identyfikacji ich charakteru (wady natury mechanicznej np. niewyważenie oraz natury elektromagnetycznej np. wpływu niecentryczności wirnika względem stojana)
- W analizie stanów nieustalonych warto bazować na śledzeniu sumy wektorowej obwiedni prądów fazowych. Po wyłączeniu zasilania niewielkie prądy indukowane w uzwojeniach stojana (w wyniku pracy generatorowej) pozwalają precyzyjnie określić

czas wybiegu. Metoda ta może stanowić alternatywę do śledzenia sygnałów tachometrycznych. Czas wybiegu może być pośrednią miarą strat mechanicznych wynikających z tarcia lub oporów ruchu obrotowego.

- Skrócenie czasu testowania odbiorczego można uzyskać poprzez:
 - zintegrowanie przetworników pomiarowych ze stanowiskiem (skraca to czas przygotowawczo-zakończeniowy),
 - optymalizację procedur przetwarzania sygnałów, w szczególności MSA poprzez zastosowanie overlappingu i przetwarzania wielowątkowego.

PRZESŁANKI DO DALSZYCH BADAŃ:

- Przeprowadzone w ramach pracy badania pozwoliły określić kierunki dalszych prac i rozwijania metodyki testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych. Celem jest przeprowadzenie eksperymentu bierno-czynnego (na zestawie silników pozyskanych od producenta ze zidentyfikowanymi wadami). Badania takie będą uzupełnieniem testów prowadzonych na silniku badawczym GUNT PT500.19. Wyniki badań we współpracy z producentami pozwolą na kompleksową walidację dotychczasowych założeń dotyczących warunków prowadzenia testów, skuteczności proponowanych metod przetwarzania i parametryzacji sygnałów oraz dobór docelowej metody klasyfikacji i sprecyzowanie wartości kryterialnych oceny wskazanych dla poszczególnych modeli ASE.

Literatura

- [1] Resa J., Cortes D., Marquez-Rubio J. F., Navarro D., *Reduction of Induction Motor Energy Consumption via Variable Velocity and Flux References*, Electronics (2019), vol. 8, no. 7, s. 740-754.
- [2] Ferreira F. J. T. E., de Almeida A. T., *Overview on energy saving opportunities in electric motor driven systems - Part 1: System efficiency improvement*, IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (2016), Detroit, USA, s. 1-8.
- [3] Zhou X., Sun M., Ma Y., Gao Z., *Research on asynchronous motor energy-saving technology*, 29th Chinese Control and Decision Conference (2017), Chongqing, China, s. 4015-4020,
- [4] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne (1982), Warszawa.
- [5] Plamitzer A. M., *Maszyny elektryczne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne (1982), Warszawa
- [6] Blake, M. P., *Vibration and Acoustic Measurement Handbook*, Spartan Books (1972), Nowy York/Waszyngton
- [7] Nandi S., Toliyat H. A., *Fault diagnosis of electrical machines-a review*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Proceedings (1999), s. 219-221.
- [8] Zhongming Y., Bin W., *A review on induction motor online fault diagnosis*, 3rd International Power Electronics and Motion Control Conference (2000), Beijing, China, vol. 3, s. 1353-1358.
- [9] Bonnett A. H., Soukup G. C., *Rotor Failures in Squirrel Cage Induction Motors*, IEEE Transactions on Industry Applications (1986), vol. IA-22, no. 6, s. 1165-1173
- [10] Drak B., *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*, Zeszyty problemowe - maszyny elektryczne (2011), no. 89, s. 7-14.
- [11] Drak B., *Nietypowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*, Zeszyty problemowe - maszyny elektryczne (2012), no. 83 s. 1-6.
- [12] Żółtowski B., Cempel C., *Inżynieria diagnostyki maszyn*, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji PIB (2004), Warszawa/Radom/Bydgoszcz.

- [13] Węglarz J., *Maszyny elektryczne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne (1968), Warszawa.
- [14] Kramakar S., et al., *Induction Motor Fault Diagnosis in Power Systems*, Springer (2016), Singapur.
- [15] Lipus J. et al., *Vibration And Related Diagnostics Of Motors And Generators*, MM Science Journal (2016), no. 6, s. 1639-1641.
- [16] Albrecht P. F., Sharma D. K., *Assessment Of The Reliability Of Motors In Utility Applications - Updated*, IEEE Transactiond of Energy Conversion (1986), vol. EC-1, no. 1, s. 39-46.
- [17] *IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE Std 493-1997.
- [18] Mustafa M. O., Nikolakopoulos G., Gustafsson T., *Faults Classification Scheme for Three Phase Induction Motor*, International Journal of System Dynamics Application (2014), vol. 3, no. 1., s. 1-20.
- [19] Rao B. K. N., *Handbook of Condition Monitoring*, Elsevier Science Ltd (1996), Oxford
- [20] Mehrjou M. R., et al., *Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine—A review*, Mechanical Systems and Signal Processing (2011), vol. 25, s. 2827-2848.
- [21] Dwojak J., Struzik I., *Diagnostyka Eksploatacyjna Silników Elektrycznych Na Podstawie Własnych Doświadczeń*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne (2010), no. 85, s. 39-45.
- [22] Finley W. R., *Troubleshooting induction motors*, 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (2000), Rome, Italy, vol.5, s. 3491-3498.
- [23] Siddique A., Yadava G. S., Singh B., *A review of stator fault monitoring techniques of induction motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion (2015), vol. 20, no. 1, s. 106-114.
- [24] Tavner P. J., *Review of condition monitoring of rotating electrical machines*, IET Electric Power Applications (2008), vol. 2, no. 4, s. 215-247.
- [25] Yeh C. C. et al., *A Reconfigurable Motor for Experimental Emulation of Stator Winding Interturn and Broken Bar Faults in Polyphase Induction Machines*, IEEE Transactions on Energy Conversion (2008), vol. 23, no. 4, s. 1005-1014.

- [26] Bloch H. P., Geitner F. K., *Practical machinery management for process plants. Volume 2: Machinery failure analysis and troubleshooting*, Exxon Chemical Co. (1983), Baytown.
- [27] Ciobanu A., Helerea E., *Diagnosis Of Faults In Induction Machine Manufacturing*, International Conference Of Scientific Paper (2011), Afases, Rumunia, s. 663-668.
- [28] PN-EN IEC 60034-23 - *Rotating electrical machines - Repair, overhaul and reclamation*.
- [29] PN-EN IEC 60034-14 - *Rotating electrical machines - Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher - Measurement, evaluation and limits of vibration severity*.
- [30] PN-EN IEC 60034-9 - *Rotating electrical machines - Noise limits*.
- [31] ISO 20958 - *Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Electrical signature analysis of three-phase induction motors*.
- [32] Dzwonkowski A., *Metoda Diagnostyki Łożysk Na Podstawie Analizy Przebiegów Prądu I Napięcia Zasilającego Silnik Indukcyjny*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej (2018), Gdańsk.
- [33] Swędrowski L., *Current measurements and analysis for induction motor diagnostic*, Metrology and Measurement Systems (2010), vol. 17, no. 1, s. 87-94.
- [34] Barczewski R., *Diagnostycznie zorientowane metody krótkoczasowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (2013), Poznań
- [35] Braun S., *Discover signal processing*, John Wiley & Sons Ltd (2008), England.
- [36] Heckbert P., *Fourier Transforms and the Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm w Notes for Computer Graphics 2*, Carnegie Mellon University (1998), Pittsburgh, USA.
- [37] Cameron J. R., Thomson W. T., *Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors*, IEE Proceedings (1986), vol. 133, no. 3.
- [38] Weinreb K., Sułowicz M., *Skuteczne wykrywanie ekscentryczności dynamicznej w silniku asynchronicznym*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne (2009), vol. 83, s. 207-212.
- [39] Kowalski C. T., Ewert P., *Zastosowanie analizy widmowej prądu stojana do monitorowania ekcentryczności silników indukcyjnych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały (2007), vol. 60, no. 27, s. 260-270.

- [40] Weinreb K. , Węgiel T. , Sułowicz M., *Nieinwazyjna diagnostyka wirnika maszyny asynchronicznej*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne (2004), vol. 69, s. 35-40.
- [41] Dybowski P., Elawgali, S. S. H., *Diagnostyka silnika indukcyjnego klatkowego - wykrywanie niecentryczności*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne (2015), vol. 2, no. 106, s. 29-33.
- [42] Ciszewski T., Swędrowski L., *Diagnostyka łożysk silnika indukcyjnego na podstawie prądu zasilającego przy użyciu sztucznych sieci neuronowych*, Pomiary Automatyka Kontrola (2013), vol. 59, no. 4, s. 316-318.
- [43] Swędrowski L., *Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej (2005), Gdańsk.
- [44] Ciszewski T., *Induction motor bearings diagnostic indicators based on MCSA and normalized triple covariance*, IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (2017), Tinos, Greece, s. 498-502.
- [45] Mehala N., Dahiya R., *Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis*, International Journal Of Systems Applications, Engineering and Development (2007), vol. 2, no. 1, s. 29-35.
- [46] Roczek K, Rogala T., *Induction motor diagnosis with use of electric parameters*, Diagnostyka (2019), vol. 20, no. 4, s. 65-74.
- [47] Messaoudi M., Lassaad S., *Multiple Faults Diagnosis in Induction Motor Using the MCSA Method*, International Journal of signal and Image processing (2010), vol. 1, s. 190-195.
- [48] Prakasam K., Ramesh S., *Testing and Analysis of Induction Motor Electrical Faults Using Current Signature Analysis*, Circuits and Systems (2016), vol.7, s. 2651-2662.
- [49] Miljković D., *Brief Review of Motor Current Signature Analysis*, Journal of Croatian Society for Nondestructive Testing (2015), vol. 5, s. 14-26.
- [50] Boudiaf M., Cherroun L., Benbrika M., *Real-time diagnosis of three-phase induction machine using Arduino-Uno card based on park's circle method*, Diagnostyka (2018), vol. 19, no. 3, s. 63-71.
- [51] Góra G., Karpiel G., Mars P., Sitek R., Goczał M., *Sprzętowa implementacja transformacji Clarka i Parka*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne (2017), vol. 1, no. 113, s. 23-28.

- [52] Vilhekar T. G., Ballal M. S., Suryawanshi H. M., *Application of Multiple Parks Vector Approach for Detection of Multiple Faults in Induction Motors*, Journal of Power Electronics (2017), vol. 17, no. 4, s. 972-982.
- [53] <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ug/wavelet-families-additional-discussion.html> (data dostępu 08. 04. 2023 r.)
- [54] Rakowski W., *Przekształcenia falkowe: Aspekty obliczeniowe w praktyce inżynierskiej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej (2018), Białystok
- [55] Józewczyk I., *Transformata falkowa wybranych sygnałów diagnostycznych*, Problemy Eksploatacji (2007), vol. 1, s. 167-178.
- [56] Kurowski W., Józewczyk I., *Transformacja falkowa w diagnostyce urządzeń mechanicznych*, Diagnostyka (2008), vol. 2, no. 46, s. 75-82.
- [57] Bolshunova O. M., Korolyov I. A., *Diagnostics of the technical state of electric motors using wavelet analysis*, International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (2015), Tomsk, Russia, s. 1-5.
- [58] Riera-Guasp M., *The Use of the Wavelet Approximation Signal as a Tool for the Diagnosis of Rotor Bar Failures*, IEEE Transactions On Industry Applications (2008), vol. 44, no.3, s. 716-726.
- [59] Da Costa C. et al., *Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition*, Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing (2015), vol. 1, s. 15-26.
- [60] Zhang, L., Zhao, L. et al., *Novel FEM-Based Wavelet Bases and Their Contextualized Applications to Bearing Fault Diagnosis*, Machines (2022), vol. 10, no. 440.
- [61] Yan R., Gao R. X., Chen X., *Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications*, Signal Processing (2014), vol. 96, Part A, s. 1-15.
- [62] Lee C. Y., Cheng Y.H., *Motor Fault Detection Using Wavelet Transform and Improved PSO-BP Neural Network*, Processes (2020), vol. 8, no. 1322.
- [63] Rad M., *Ciągła transformata falkowa jako narzędzie wspierające diagnostykę silników indukcyjnych*, Zeszyty problemowe – Maszyny Elektryczne (2007), vol. 77, s. 97-99.
- [64] Józefczyk I., *Dyskretna transformata falkowa dla wybranego modelu symulacyjnego sygnału wibroakustycznego*, Diagnostyka (2005), vol. 34, s. 137-141.
- [65] Shi, X., Zhang, Z. et al., *Application of Teager–Kaiser Energy Operator in the Early Fault Diagnosis of Rolling Bearings*, Sensors (2022), vol. 22, no. 17, s. 6673-6675.

- [66] Henriquez Rodriguez P., Alonso J. B., Ferrer M. A., Travieso C. M., *Application of the Teager–Kaiser energy operator in bearing fault diagnosis*, ISA Transactions (2013), vol 52, s. 278-284
- [67] Blaut J., Korbiel T., Batko W., *Application of the Teager-Kaiser Energy Operator to Detect Instability of a Plain Bearing*, Diagnostyka (2016), vol. 17, no. 4, s. 99-105
- [68] Swędrowski L., Ciszewski T., Ciszewska E., *Wybrane metody diagnostyki łożysk silników indukcyjnych oparte o pomiar prądu*, Pomiary Automatyka Kontrola (2014), vol. 60, no. 8, s. 618-621.
- [69] Pineda-Sanchez M., *Application of the Teager–Kaiser Energy Operator to the Fault Diagnosis of Induction Motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion (2013), vol. 28, no. 4, s. 1036-1044.
- [70] Noureddine L., Hafaifa A., Kouzou A., *Rotor fault detection of wind turbine squirrel cage induction generator using teager-kaiser energy operator*, Control and Intelligent Systems (2017) vol. 45., no.1, s. 10-18.
- [71] Agah G. R., Rahideh A., Khodadadzadeh H., Khoshnazar S. M., Hedayatikia S., *Broken Rotor Bar and Rotor Eccentricity Fault Detection in Induction Motors Using a Combination of Discrete Wavelet Transform and Teager–Kaiser Energy Operator*, IEEE Transactions on Energy Conversion (2022), vol. 37, no. 3, s. 2199-2206
- [72] Maouche Y., Oumaamar M., Boucherma M., Khezzar A., *Instantaneous power spectrum analysis for broken bar fault detection in inverter-fed six-phase squirrel cage induction motor*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems (2014), vol. 62, s. 110-117.
- [73] Didier G., Razik H., Caspary O., Ternisien E., *Rotor cage fault detection in induction motor using global modulation index on the instantaneous power spectrum*, Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (2003), Atlanta, USA, s. 104 - 109.
- [74] Irfan M., Saad N., Ibrahim R. et al. *An Intelligent Fault Diagnosis of Induction Motors in an Arbitrary Noisy Environment*, Journal of Nondestructive Evaluation (2016), vol. 35, no. 12.
- [75] Abdellah C., Miloud H., Azeddine B. et al., *Instantaneous Power Spectrum Analysis To Detect Mixed Eccentricity Fault In Saturated Squirrel Cage Induction Motor*, 3rd International Conference on Automation, Control Engineering and Computer Science (2016) , Tunisia.

- [76] Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A., *Induction motor diagnostic system based on spectra analysis of current and instantaneous power signals*, IEEE SOUTHEASTCON (2014), Lexington, USA, s. 1-7.
- [77] Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A., *Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals*. Przegląd Elektrotechniczny (2012), vol. 88., no. 12b, s. 221-224.
- [78] Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A., *A Comparison of Informative Value of Motor Current and Power Spectra for the Tasks of Induction Motor Diagnostics*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, (2014), Antalya, Turkey.
- [79] Ewert P., *Use of axial flux in the detection of electrical faults in induction motors*, International Symposium on Electrical Machines (2017), Nałęczów, Poland, s. 1-6.
- [80] Assaf T., Henao H., Capolino G. A., *Simplified axial flux spectrum method to detect incipient stator inter-turn short-circuits in induction machine*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (2004), vol. 2, Ajaccio, France, s. 815-819.
- [81] Kokko V., *Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements*, Department of Electrical Engineering, Optoelectronics and Measurement Techniques Laboratory, University of Oulu (2003), Oulu.
- [82] Duda A., Petryna J., Sułowicz M., Guziec K., *Metoda wstępnej oceny stanu wirnika silnika indukcyjnego przy pomocy dedykowanego przyrządu opartego na pomiarze strumienia poosiowego*, Zeszyty Problemowe- Maszyny Elektryczne (2015), vol. 2, no. 106, s. 59-63.
- [83] Petryna J., Sułowicz M., Duda A., *Wykorzystanie Strumienia Poosiowego Do Badania Stanów Dynamicznych Maszyn Indukcyjnych Małej i Dużej Mocy*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne (2014), vol. 2, no. 102, s. 165-171.
- [84] Tulicki J., Petryna J., Sułowicz M., *Fault diagnosis of induction motors in selected working conditions based on axial flux signals*, Technical Transactions (2016), vol. 113, no. 3-E, s. 99-113.
- [85] Ismagilov F., Pashali D., Vavilov V. et al., *Diagnostics of electrical components by means of their external magnetic field*, Russian Engineering Research (2017), vol. 37, s. 467-470.

- [86] Ceban A., Pusca R., Romary R., *Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis*, IEEE Transactions on Industrial Electronics (2012), vol. 59, no. 5, s. 2082-2093.
- [87] Mróz J., *Aura magnetyczna silnika indukcyjnego jako sygnał diagnostyczny*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne (2011), vol. 93, s. 179-183.
- [88] Benbouaza A., Elkihel B., Delaunois F., *Analysis and diagnosis of the different defects of asynchronous machines by vibration analysis*, International Journal on Computer Science and Engineering (2013), vol. 5, no. 4, s. 258-269
- [89] Ágoston K., *Fault Detection of the Electrical Motors Based on Vibration Analysis*, Procedia Technology (2015), vol. 19, s. 547 – 553.
- [90] Bate G. H., *Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives*, Bruel&Kjcer (2007).
- [91] Biernat A., Góralski P., *Analysis of state of operation of asynchronous motor with stator slot frequency beat vibration*, International Symposium on Electrical Machines (2017), Nałęczów, Poland, s. 1-4.
- [92] Cameron J.R., Thomson W.T., Dow A.B., *Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors*, IEE Proceedings (1986), vol. 133, no. 3, s. 155-163.
- [93] Arabaci H., Bilgin H., *Diagnosis of broken rotor bar faults by using frequency spectrum of stator current envelope*, XXth International Conference on Electrical Machines (2012), Marseille, France, s. 1643-1646.
- [94] Seninete S., Mimi M., Cherif B. D. E., Ould Ali A., *Vibration Signal Analysis for Bearing Fault Diagnostic of Asynchronous Motor using HT-DWT Technique*, 6th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (2019), s. 1-5.
- [95] Gong X., Zhang W., Jing Y., Du W., Jing Y., *Bearing fault diagnosis for coupling faults of rotor system using spectral kurtosis and wavelet packet*, International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (2019), Beijing, China, s. 479-483.
- [96] Wang Z., Yang J., Li H. et al., *Improved cyclostationary analysis method based on TKEO and its application on the faults diagnosis of induction motors*, ISA Transactions (2022), vol. 128, Part A, s. 513-530.
- [97] Ciupitu L., Tudor A., Turcan D., Sandor D., *Vibration Diagnosis of Electric Motor's Bearings*, Advanced Materials Research (2012) vols. 463-464, s. 1725-1728.

- [98] Jin C., Ompusunggu A. P., Liu Z., Ardakani H. D., Petré F., Lee J., *A Vibration-Based Approach for Stator Winding Fault Diagnosis of Induction Motors: Application of Envelope Analysis*, Annual Conference of the PHM Society (2014), vol. 6, s. 167-175.
- [99] Zhao L., Guo Y., *Time domain synchronous averaging based on accurate alignment reference signal*, 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (2017), Kunming, China, s. 199-203.
- [100] Figlus T., Wilk A., *Zastosowanie analiz widma obwiedni sygnału drganiowego do wykrywania wykruszenia zęba koła w obecności uszkodzeń łożysk tocznych przekładni*, Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska (2005), vol. 57, s. 67-62.
- [101] Dwornik M., *Analiza czasowo-częstotliwościowa. Transformata Hilberta*, Teoria Sygnałów Dyskretnych (2023), Kraków.
- [102] Sobolewski A., *Znaczenie harmoniczných żłobkowych w diagnostyce uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego*, Diagnostyka (2006), vol. 4, no. 40, s. 59-64.
- [103] Rata G., Rata M., Graur I., Milici L., (2009). *Induction Motor Speed Estimator Using Rotor Slot Harmonics*, Advances in Electrical and Computer Engineering (2009), vol. 9, no. 1, s. 70-73.
- [104] Silva W. L., Oliveira A., *Analysis of spectral signatures of stator currents on a three-phase induction motor operating in non stationary mode for rotational speed and slip detection using rotor slot harmonics*, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (2013), Minneapolis, USA, s. 884-888.
- [105] Silva W. L., Lima A. M. N., Oliveira A., *Speed Estimation of an Induction Motor Operating in the Nonstationary Mode by Using Rotor Slot Harmonics*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (2015), vol. 64, no. 4, s. 984-994.
- [106] Supangat R., Ertugrul N., Soong W. et al., *Estimation of the Number of Rotor Slots and Rotor Speed in Induction Motors Using Current, Flux, or Vibration Signature Analysis*, Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering (2008).
- [107] Prainetr S., Wangnippanto S., Tunyasirut S., *Detection mechanical fault of induction motor using harmonic current and sound acoustic*. 5th International Electrical Engineering Congress (2017), Pattaya, Thailand, s. 1-4.
- [108] Ellison A. J., Moore C. J., *Acoustic noise and vibration of rotating electric machines*, IEE Proceedings (1970), vol. 117, no. 3, s. 555-560.
- [109] Craggs J. L., *Specifying and measuring the noise level of electric motors in operation*, IEEE Transactions on Industry Applications (1993), vol. 29, no. 3, s. 611-615.

- [110] Beran L., Mejdr F., *Single-phase induction motor noise caused by improper manufacturer design*, IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (2015), Liberec, Czech Republic, s. 1-6.
- [111] Sarrazin M., Gillijns S., Janssens K., Van der Auweraer H., Verhaege K., *Vibro-acoustic measurements and techniques for electric automotive applications*. INTERNOISE - 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control (2014), Melbourne, Australia.
- [112] Kirluk M., *Podstawy akustyki*, NTL-M. Kirpluk (2021), Warszawa.
- [113] Marignetti F., Rubino G., Boukadida Y., et al., *Noise and vibration analysis of an inverter-fed three-phase induction motor*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (2020), Sorrento, Italy, s. 157-161.
- [114] Delgado-Arredondo P. A., Morinigo-Sotelo D., Osornio-Rios R. A. et al., *Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals*, Mechanical Systems and Signal Processing (2017), vol. 83, s. 568-589.
- [115] Akçay H., Germen E., *Identification of acoustic spectra for fault detection in induction motors*, Africon, Pointe aux Piments (2013), Mauritius, s. 1-5.
- [116] Abdo A., Siam J., Abdou A., Mustafa R., Shehadeh H., *Electrical Fault Detection in Three-Phase Induction Motor Based on Acoustics*, IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (2020), Madrid, Spain, s. 1-5.
- [117] Janda M., Vitek O., Skalka M., *Noise diagnostic of induction machine*, The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM (2010), Rome, Italy, s. 1-4.
- [118] Salazar-Villanueva F., Ibarra-Manzano O. G., *Spectral analysis for identifying faults in induction motors by means of sound*, CONIELECOMP 23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing (2013), Cholula, Puebla, Mexico, s. 149-153.
- [119] Romano R., Dragonetti R., Mercogliano F., Sabato F., *A procedure for measuring electric motor noise in noisy environments*, Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA (2013).
- [120] Babu E., Francis J., Thomas E. et al., *Predictive Analysis of Induction Motor using Current, Vibration and Acoustic Signals*, 2nd International Conference on Power

- Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (2022), Mathura, India, s. 1-7.
- [121] Glowacz A., Glowacz A., Glowacz Z., *Rozpoznawanie monochromatycznych obrazów cieplnych silnika synchronicznego z zastosowaniem kwadratowo-drzewowej dekompozycji i sieci neuronowej*, Eksploatacja i Niezawodność (2014), vol. 16, no. 1, s. 92–96.
- [122] Glowacz A., Glowacz Z., *Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging*, Infrared Physics & Technology (2017), vol. 81, s. 7-16.
- [123] Baranski M., Polak A., *Thermal diagnostic in electrical machines*. Przegląd Elektrotechniczny (2011), vol.87, no. 10, s. 305-308.
- [124] Eftekhari M., Moallem M., Sadri S., Hsieh Min-Fu, *A novel indicator of stator winding inter-turn fault in induction motor using infrared thermal imaging*, Infrared Physics & Technology (2013), vol. 61, s. 330-336
- [125] Barczewski R., Soliński K., *Optimization of Transducers Localization Based on Vibration Signal Informativity Analysis*, 4th International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists (2011), Poznań, Polska s. 102-106.
- [126] Enache S., Campeanu A., Vlad I., Enache M. A., *Aspects Regarding Tests of Three-Phase Asynchronous Motors with Single-Phase Supply*, 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (2019), Varna, Bulgaria, s. 1-6.
- [127] Vahedi H., Rahmani S., Al-Haddad K., *Pinned mid-points multilevel inverter (PMP): Three-phase topology with high voltage levels and one bidirectional switch*, IECON 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2013), Vienna, Austria, s. 102-107.
- [128] Miller R., Miller M. R., *Industrial Electricity and Motor Controls*, McGraw-Hill Education (2008), United States
- [129] Gottlieb I., *Practical Electric Motor Handbook*, Elsevier (1997), Oxford
- [130] Przepiórkowski J., *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*, Wydawnictwo BTC (2007) Warszawa
- [131] Deda S., de Kock J. A., *Induction motor efficiency test methods: A comparison of standards*, International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (2017), Cape Town, South Africa, s. 1-6.
- [132] Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP (2007), Warszawa

- [133] Wallace A., von Jouanne A., Rollman T., *A fully regenerative, high power testing facility for motors, drives and generators*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record (1997), Milwaukee, USA, s. MB2/13.1-MB2/13.3.
- [134] Xia K., Lu J., Dong B. et al., *A new test system for torque testing and efficiency measurement of three-phase induction motor*, IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (2016), Hefei, China, s. 256-261.
- [135] Subtirelu E. G., *Advanced System for Testing of Three-Phase Induction Machines*, International Conference on Applied and Theoretical Electricity (2018), Craiova, Romania, s. 1-6.
- [136] Guo F., Liu M., Jia P. et al., *Application Research of Small and Medium-Sized Three-Phase Asynchronous Motor Energy Efficiency Testing System*, 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (2018), Beijing, China, s. 1-3.
- [137] Ganchev M., *Control unit for a laboratory motor test bench for monitoring and controlling PMSM and induction motors*, European Conference on Power Electronics and Applications (2007), Aalborg, Denmark, s. 1-8.
- [138] Armando E., Boglietti A., Bojoi R. et al., *Test rig for induction motor quasi-static electromechanical characteristic determination*, IECON - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (2014), Dallas , USA, s. 919-924.
- [139] Lewis M., Redlaff A., *Instrumentation for the automatic testing of three-phase induction motors*, IEE Colloquium on Instrumentation of Rotating Electrical Machines (1991), London, UK, s. 8/1-8/5.
- [140] Izhar T., Ali M., Sohaib M., Nazir A., *Development of a motor test bench to measure electrical/mechanical parameters*, International Conference on Energy Conservation and Efficiency (2017), Lahore, Pakistan, s. 64-67.
- [141] Marko R., Miloš B., Miroslav B., Lepasava R., *Electrical motor testing station with electromagnetic load emulator: An overview of design, construction and calibration with examples of use*, 3rd International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (2014), Paris, France, s. 1-6.
- [142] Durantay L., Velly N., Pradurat J. F., Chisholm M., *New testing method for large high speed induction motors*, IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (2015), Houston, TX, USA, s. 1-8.
- [143] Teixeira W. C. E., Viajante G. P., Marra E. G. et al., *Proposal of a test bench for switched reluctance motors and fractional-horsepower single-phase induction motors*,

- IEEE International Electric Machines and Drives Conference (2009), Miami, USA, s. 1135-1139.
- [144] Mzungu H., Manyage M.J., Khan M. et al., *Application of induction machine efficiency testing standards in South Africa*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference (2009), Miami, USA .
- [145] Kinyua J. M., Khan M. A., Barendse P., *Development and efficiency estimation of a regenerative test rig for induction motor testing*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (2016), Milwaukee, USA, s. 1-6.
- [146] Schreiber R., Fuchs P., Jaksch I., *An automatic measurement, testing and diagnostic system for induction motors*, IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (2015), Liberec, Czech Republic, s. 1-6.
- [147] Burriel-Valencia J., Puche-Panadero R., Martinez-Roman J. et al., *Automatic Fault Diagnostic System for Induction Motors under Transient Regime Optimized with Expert Systems*, Electronics (2019), vol. 8, no. 6
- [148] Manop C., Senavongse W., Kinnares V., Tangsiriworakul C., *A low cost prototype for testing stator winding shorted turns in 3-phase induction motors*, IEEE International Conference on Industrial Technology (2005), Hong Kong, China, s. 734-738.
- [149] Zheng D., Li H., Zhang Z., Wu J. and Xu J., *Study on the life prediction of induction motors based on accelerated degradation testing method*, The Proceedings of 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (2011), Guiyang, China, s. 1101-1106.
- [150] Kim Y. H., Kim H. J., Moon J. W., Kim Y. H., Jung S. Y., *A study on the estimation of bearing life of electric motor using ISO 281 and accelerated life test*, 2nd International Conference on System Reliability and Safety (2017), Milan, Italy, s. 223-226.
- [151] McFadden P. D., Toozhy M. M., *Application Of Synchronous Averaging To Vibration Monitoring Of Rolling Element Bearings*, Mechanical Systems and Signal Processing (2000), vol. 14, no. 6, s. 891-906.
- [152] Adameczyk J., Krzyworzeka P., Łopacz H., *Systemy Synchronicznego Przetwarzania Sygnałów Diagnostycznych*, Collegium Columbinum (1999), Kraków.
- [153] Sharma V., Parey A., *Gear crack detection using modified TSA and proposed fault indicators for fluctuating speed conditions*, Measurement (2016), vol. 90, s. 560-575.

- [154] Bechhoefer E., Kingsley M., *A Review of Time Synchronous Average Algorithms*. Annual Conference of the PHM Society (2021), vol. 1, no. 1., s. 1-10.
- [155] Ha J. M., Youn B. D., Oh H. et al., *Autocorrelation-based time synchronous averaging for condition monitoring of planetary gearboxes in wind turbines*, Mechanical Systems and Signal Processing (2016), vol. 70–71, s. 161-175.
- [156] Wu B., Saxena A., Romano P., Vachtsevanos G., *Vibration monitoring for fault diagnosis of helicopter planetary gears*. Proceedings of 16th IFAC World Congress, (2005).
- [157] Zhao L., Guo, Y., *Time domain synchronous averaging based on accurate alignment reference signal*, 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (2017), Kunming, China, s. 199-203.
- [158] Barczewski R., *Uśrednianie multisynchroniczne (MSA) diagnostycznie zorientowana metoda analizy sygnału wibroakustycznego*, Diagnostyka (2004), vol. 30, s. 13-17.
- [159] Bravo-Imaz I., Ardakani H. D., Liu Z., García-Arribas A., Arnaiz A., Lee J., *Motor current signature analysis for gearbox condition monitoring under transient speeds using wavelet analysis and dual-level time synchronous averaging*, Mechanical Systems and Signal Processing (2017), vol. 94, s. 73-84.
- [160] Ngote N., Ouassaid M., Guedira S., Cherkaoui M., *On the Detection of Induction-Motor Rotor Fault by the Combined Time Synchronous Averaging-Discrete Wavelet Transform Approach*, Journal of Electrical Engineering and Technology (2015), vol. 10, s. 2315-2325.
- [161] Barczewski R., *Zastosowanie Uśredniania Multisynchronicznego – MSA w Diagnostyce Silników Asynchronicznych*, Diagnostyka (2005), vol. 35, s. 105-112.
- [162] Wróbel M., Barczewski R., Jakubek B., Rukat W., *Influence of Mechanical and Electromagnetic Phenomena on Electric Motor Vibrations in Different Power Supply Options*, Vibrations in Physical Systems (2020), vol. 31, no. 1, s. 2020102-1-2020102-14
- [163] https://www.cantongroup.com/storage/download/files/3/4868_besel_silniki_3_fazo_we_ogolnego_przeznaczenia_catalogue_pl_en.pdf (data dostępu 10.04.2023)
- [164] Puzyna C., *Zwalczanie hałasu w przemyśle. Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne (1974), Warszawa
- [165] Rogiński R., Sadowski J., *Walka z hałasem w komunikacji i przemyśle*, Wydawnictwo Kominukacji i Łączności (1965), Warszawa
- [166] Hassal J. R., Zaveri K., *Acoustic Noise Measurements*, Bruel&Kjaer (1979), Denmark

- [167] ISO 3746:2011 - *Akustyka - Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego -- Metoda orientacyjna z zastosowaniem otaczającej powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk*
- [168] Barczewski R., Jakubek B., Wróbel M., *The Influence of Supply Options of an Asynchronous Electric Motor on Emitted Noise*, *Vibrations in Physical Systems* (2018), vol. 29, s. 2018006-1-2018006-8
- [169] https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11230126_G18.pdf (data dostępu 10.04.2023)
- [170] GUNT, *Experiment instructions - PT 500.19 Electromechanical vibrations kit*, (2010), Germany.
- [171] Bruel&Kjaer, *Technical Review. Teletechnical, Acoustical and Vibrational Research*, (1958), no. 3.
- [172] Barczewski R., *AFC - metoda korekcji widma amplitudowego*, Kongres Diagnostyki Technicznej (1996), Gdańsk, s. 49-54.
- [173] Barczewski R., *Stress assessment and integrity loss detection of a concrete beam on the basis of backbone curve changes analysis* w *Workshop of COST on NDT Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures*, Institute for Technology - NRI (2005), Radom.
- [174] Jakubowicz M., Wiczorowski M., Gapiński B., Marciniak-Podsadna L., Barczewski R., Jakubek B., raport z projektu POIR.01.01.01-00-0538/19, *Modułowy system pakowania produktów w zbiorcze opakowania tekturowe - Badania możliwości implementacji odprężania wibracyjnego ram maszyn pakujących*.
- [175] Łukasiewicz M., Kałaczyński T., Liss M., *Generowanie estymatorów sygnału drganiowego modulem programu sibi w środowisku obliczeniowym MATLAB*, *Studia i Materiały Informatyki Stosowanej* (2012), vol. 4, no.7, s. 22-28.
- [176] https://www.cantonigroup.com/storage/download/files/3/4842_besel_silniki_3_fazowe_klasy_ie2_catalogue_pl_en.pdf (data dostępu 10.04.2023).
- [177] Bruel&Kjaer, *Measuring Vibrations*, (1982) Denmark
- [178] <https://www.pcb.com/resources/technical-information/tips-from-techs/mounting-techniques> (data dostępu 10.04.2023).
- [179] Barczewski R., Wróbel M., Marecka S., *Porównanie wyników dekompozycji multisynchronicznej drgań i hałasu silników asynchronicznych w aspekcie zastosowań diagnostycznych*, *WibroTech: XIX Konferencja Naukowa Wibroakustyki*

- i Wibrotechniki; XIV Ogólnopolskie Seminarium Akustyka w Systemach Technicznych (2017), Pruszków, Polska, s. 11-12.
- [180] Barczewski R., Wróbel M., *Wpływ sposobu zasilania asynchronicznego silnika elektrycznego na wytwarzane pole magnetyczne*, Diagnostyka Maszyn: XLVIII Ogólnopolskie Sympozjum (2022), Wisła, Polska, s. 15.
- [181] Barczewski R., Wróbel M. *The Influence of Asynchronous Electric Motor Mounting on Vibration of its Body During Acceptance Testing*, 7th International Congress on Technical Diagnostics (2022), Radom, Polska, s. 66.
- [182] ORBIT Bently Nevada Sales Department, *Predictive maintenance*, (1986), vol. 7, no. 2.
- [183] Żółtowski B., *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej (1996), Bydgoszcz, Polska.
- [184] Alicando M. A. R., Ramos G. M., Ostia C. F., *Bearing Fault Detection of a Single-phase Induction Motor Using Acoustic and Vibration Analysis Through Hilbert-Huang Transform*, IEEE 13th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (2021), Manila, Philippines, s. 1-6.
- [185] Uddin M. N., Rahman M. M., *Online current and vibration signal monitoring-based fault detection of bowed rotor induction motor*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (2015), Montreal, Canada, s. 2988-2994.
- [186] Tsypkin M., *Induction motor condition monitoring: Vibration analysis technique - a twice line frequency component as a diagnostic tool*, International Electric Machines & Drives Conference (2013), Chicago, USA, s. 117-124.
- [187] Kabul A., Ünsal A., *An Alternative Approach for the Detection of Broken Rotor Bars and Bearing Faults of Induction Motor Based on Vibration Signals*, 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (2021), Antalya, Turkey, s. 126-131
- [188] Arthur N., Penman J., *Induction machine condition monitoring with higher order spectra*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, s. 1031-1041
- [189] Nandi S., Toliyat H. A., *Novel frequency-domain-based technique to detect stator interturn faults in induction machines using stator-induced voltages after switch-off*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 1, s. 101-109.

- [190] Majchrzak M., Słomiński M., *Opracowanie stanowiska do badań pola magnetycznego i hałasu emitowanego przez asynchroniczne silniki elektryczne - praca inżynierska*, Politechnika Poznańska (2023), Poznań.
- [191] https://www.mccdaq.com/pdfs/manuals/daqboard_1000_2000_series.pdf
(data dostępu: 10.04.2023).