

dr hab. inż. Jacek Dziurdź, prof. uczelni  
Instytut Podstaw Budowy Maszyn  
Politechnika Warszawska

Warszawa, 14.09.2023 r.



**Recenzja pracy doktorskiej**  
**Pana mgr. inż. Mateusza Wróbla**  
**pt.: „Metodyka testowania odbiorczego asynchronicznych Silników elektrycznych”**  
(promotor: dr hab. inż. Roman Barczewski)

*Wykonano na zlecenie*

*Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej*

## **1. Wprowadzenie**

Rozwój systemów cyfrowych sprawił, że koszty wytworzenia systemów do akwizycji i analizy danych znacznie zmalały. Spowodowało to upowszechnienie urządzeń domowych do zapisu i odtwarzania dźwięku (a także obrazu i innych danych), a szczególnie wpłynęło na rozwój układów do śledzenia procesów produkcyjnych, rejestracji stanów i wszelkich układów diagnostycznych. Dzięki temu można stosować, nawet dla stosunkowo prostych urządzeń jakimi są asynchroniczne silniki elektryczne, systemy kontroli wykonania produktów.

Powszechnie stosowana diagnostyka wibroakustyczna dotyczy szerokiego zakresu maszyn w tym maszyn elektrycznych. Najprostszą formą ogólnego diagnozowania stanu technicznego jest porównanie wartości skutecznej prędkości drgań korpusu z wartościami dopuszczalnymi dla maszyny danego typu i wielkości (mocy). Pomiar drganiowe i akustyczne pozwalają na diagnostykę szczegółową stanu poszczególnych elementów maszyn przez analizę procesów resztkowych, których wielkość związana jest ze stopniem degradacji (lub dokładnością montażu–wykonania). W przypadku maszyn elektrycznych naturalną formą diagnostyki jest analiza podstawowych wielkości elektrycznych. Pojawiają się w literaturze ciekawe rozwiązania łączące analizy sygnałów wibroakustycznych z sygnałami elektrycznymi zastosowane do diagnostyki elementów związanych ze zjawiskami elektrycznymi (elektromagnetycznymi), ale także mechanicznymi.

Prowadzenie prac w kierunku zwiększania skuteczności metod testowania maszyn i wyszukiwania wad oraz niedokładności nowych produktów, nie tylko asynchronicznych

silników elektrycznych, należy uznać za słuszne. Przynajmniej część przedstawionych w rozprawie doktorskiej metod można zaadoptować do diagnostyki stanu (lub jakości wykonania) innych obiektów technicznych.

## **2. Ogólne omówienie pracy**

Przesłana do oceny rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, wydrukowana na 171 stronach i organizacyjnie podzielona na 6 rozdziałów głównych, z których każdy zawiera rozbudowany system podrozdziałów. Tekst został uzupełniony 124 rysunkami i 12 tabelami z danymi. Zamieszczony spis literatury zawiera 191 pozycji i nie budzi zastrzeżeń co do doboru materiałów źródłowych. Streszczenia w języku polskim oraz angielskim zamieszczono na początku rozprawy, po których przedstawiono wykaz ważniejszych akronimów i oznaczeń. Podział pracy można uznać za poprawny, choć być może za bardzo rozbudowano system podrozdziałów. Nie wpływa to jednak w znaczący sposób na czytelności pracy.

Autor w Rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem do pracy, przedstawia szacunkowe dane dotyczące wykorzystania napędów elektrycznych na świecie (około 50% całkowitego zapotrzebowania na energię zużywają napędy elektryczne, a w tym około 80% są to asynchroniczne, trójfazowe silniki elektryczne). Tak duża skala wykorzystania przekłada się na dużą liczbę wyprodukowanych egzemplarzy o różnych parametrach technicznych, co wymaga zastosowania, już na etapie produkcji, efektywnych metod wykrywania wad produkcyjnych. W tym rozdziale zawarto cel, którym było opracowanie i zaproponowanie nowej metodyki testowania. Zakres pracy obejmował m.in. przegląd literatury, przeprowadzenie eksperymentów czynnych na silniku testowym oraz silnikach produkowanych seryjnie i opracowanie prototypu stanowiska do prowadzenia testów odbiorczych wybranego modelu asynchronicznego silnika elektrycznego.

W rozdziale drugim Autor przedstawił asynchroniczny silnik elektryczny jako obiekt diagnozowania. Zaliczył silniki elektryczne do grupy obiektów dynamicznych będących przetwornikami energii elektrycznej na energię mechaniczną. Pokrótce przedstawił dane literaturowe dotyczące udziału poszczególnych typów uszkodzeń eksploatacyjnych silników elektrycznych, ale także stwierdził, że wady produkcyjne stanowią znacznie większy zbiór, który podzielił na dwie podstawowe grupy: wady natury mechanicznej i wady natury elektromagnetycznej. Wynikają one z przekroczenia dopuszczalnych błędów wykonania i nieprawidłowego montażu. Dalsza część rozdziału drugiego zawiera opis najczęściej

stosowanych metod diagnozowania i testowania silników elektrycznych, gdzie wiele z nich zawartych jest w normach PN-EN ICE oraz ISO i opartych głównie na analizie procesów resztkowych np. drgań mechanicznych, hałasu (czasami temperatury) oraz wielkości elektrycznych, najczęściej wartości zmian prądów. W pomiarach drgań mechanicznych zdefiniowane są parametry jakie musi spełniać podłoże lub zawiesie badanej maszyny elektrycznej, a sama analiza polega na wyznaczeniu wartości skutecznych prędkości lub przemieszczeń drgań w zalecanej paśmie dla trzech kierunków: osiowym, promieniowym i stycznym. Normowe metody pomiaru hałasu silników dotyczą wyznaczania poziomu mocy akustycznej i wartości poziomu dźwięku z korekcją skali A, metodami dokładnymi i technicznymi lub metodami orientacyjnymi. Największą grupę normowych metod stosowanych w diagnostyce asynchronicznych silników elektrycznych są analizy oparte na pomiarach napięć i prądów fazowych. Podstawową metodą jest analiza sygnatur prądowych CSA. Umożliwia wykrywanie dużej grupy uszkodzeń elementów elektrycznych oraz mechanicznych np.:

- 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 eksploatacyjnej silników pracujących w warunkach zbliżonych do nominalnych. Polega na analizie występowania składowych widma zarejestrowanego sygnału, charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia. Autor przedstawił wzory, na podstawie których można wyznaczyć wartości charakterystycznych częstotliwości związanych z najczęściej spotykanymi wadami i uszkodzeniami elementów elektrycznych oraz mechanicznych (np. łożysk tocznych). Następnie Autor przedstawił rozwijane metody badawcze wykorzystujące głównie jako sygnał rejestrację prądów fazowych, które następnie poddawane są podstawowym przekształceniom znanym z klasycznej analizy sygnałów, jakimi są transformaty Fouriera oraz Hilberta, uzupełnione o transformatę falkową, a także metodę dedykowaną specjalnie asynchronicznym silnikom elektrycznym: wektor Parka. Do innej grupy zaliczyć można przedstawiony operator energetyczny Teagera-Kaisera. Rozdział drugi zawiera także krótki opis stanowisk i systemów testowych opisywanych w literaturze i kończy się podsumowaniem metod diagnozowania silników elektrycznych, gdzie

w tabeli 2.3 przedstawiono w syntetyczny sposób porównanie metod, opisując ich wady i zalety.

W rozdziale trzecim Autor zaproponował metodykę testowania zawierającą zbiór metod testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych obejmujący sposób pozyskania sygnałów diagnostycznych, metody testowania, opis symptomów diagnostycznych, warunki prowadzenia testów oraz sposoby identyfikacji wad produkcyjnych oraz klasyfikacji silników. Szczegółowe informacje dotyczące obszaru działań zostały przedstawione w tabeli 3.1. Autor zwrócił uwagę, że jest istotne określenie wrażliwości wielkości i miar sygnałów diagnostycznych na wady produkcyjne. W końcowej części rozdziału, przedstawiono wpływ warunków przeprowadzenia pomiarów ze szczególnym uwzględnieniem lokalizacji przetworników, wpływu sposobu montażu i posadowienia silnika, wpływu jego zasilania oraz wpływu obciążenia testowego i warunków pracy nieustalanej (rozruch oraz wybieg, zmiany obciążenia, prędkości obrotowej i parametrów zasilania).

Kontynuacją rozważań z rozdziału trzeciego jest rozdział czwarty, w którym przedstawiono wybrane metody i techniki przetwarzania oraz analizowania sygnałów diagnostycznych wykorzystane w metodyce testowania asynchronicznych silników elektrycznych. Autor zaproponował jako jedną z metod parametryzacji sygnałów wibroakustycznych technikę uśredniania multisynchronicznego, dzięki której jest możliwe wyodrębnienie składowych sygnału związanych ze zjawiskami mechanicznymi (synchronicznymi z obrotami wirnika), elektromagnetycznymi (synchronicznymi z częstotliwością zasilania) oraz składowe niesynchroniczne oraz szum. Następnie przedstawił analizę wpływu położenia punktów pomiarowych na skuteczność uzyskiwania informacji diagnostycznej z rejestrowanych sygnałów (największy stosunek sygnału użytecznego do szumu). W tym celu wprowadził wskaźniki informujące o stosunku mocy sygnału użytecznego diagnostycznie do mocy sygnału zarejestrowanego. Otrzymane wartości wskaźników zostały wykorzystane do porównania pomiarów drgań dla głównych kierunków (osiowy, styczny, promieniowy) oraz rejestracji hałasu, a także procentowego udziału energii związanych ze zjawiskami mechanicznymi, elektromagnetycznymi oraz składowymi niesynchronicznymi wraz z szumem dla silnika jednofazowego. Podobne analizy zostały wykonane dla silnika trójfazowego przy różnych sposobach zasilania (bezpośrednie zasilanie z sieci trójfazowej, zasilanie jednofazowe z kondensatorem oraz zasilanie trójfazowe przez falownik). W dalszej części rozdziału czwartego przedstawiono wyniki analizy wpływu warunków prowadzenia testów silnika. Porównano m.in. wartości wyznaczonych zgodnie z normą poziomów mocy

akustycznej dla różnych sposobów zasilania oraz rozkładu energii w widmach hałasu. Podobne analizy przedstawiono dla widm sygnałów przyspieszeń drgań oraz widm uzyskanych metodą uśredniania multisynchronicznego. W następnym etapie Autor dokonał pomiaru i analizy rozkładu pola magnetycznego wokół silnika. W tym celu wykorzystał osobiście opracowany układ pomiarowy UPM-01. Jak sygnały diagnostyczne wykorzystano rejestrację zmian napięcia wyjściowego z układu pomiarowego. Przeprowadzono badania i analizy wpływu zasilania analogicznie jak dla pomiarów wibroakustycznych. Dodatkowo wyznaczono kilka wybranych miar (m.in. wartości skuteczne, szczytowe i średnie napięcia, współczynniki kształtu, szczytu i impulsowości oraz kurtozę). Ciekawe wyniki dotyczą mapowania natężenia pola magnetycznego (w trzech głównych kierunkach) w przestrzeni wokół silnika z wykorzystaniem układu UPM-02. W końcowej części rozdziału zamieszczone zostały wyniki wpływu sposobu montażu oraz posadowienia na drgania badanego silnika, wykonane z wykorzystaniem młotka impulsowego (modalnego) z rejestracją drgań w trzech głównych kierunkach dla montażu na sprężystym zawieszaniu, posadowieniu na gąbce oraz na stanowiskach testowych w pionowym i poziomym położeniu silnika.

Rozdział piąty poświęcono sprawdzenia trafności rozważań przedstawionych w poprzednich rozdziałach. Badania na obiektach rzeczywistych dotyczyły badawczego silnika asynchronicznego GUNT oraz czterech silników BESEL produkowanych seryjnie, trzy nowe bez wad, wykorzystane do określenia parametrów referencyjnych i jednego z wprowadzonymi wadami do wykonania eksperymentów czynnych. Silnik badawczy umożliwia kontrolowane wprowadzenie wad, związanych z błędami osiowości wirnika względem stojana, niewyważenie wirnika, zwiększenie rezystancji jednej z faz, odłączenie jednej z faz w trakcie pracy oraz wprowadzenie zwiększonych oporów ruchu. Do rejestrację sygnałów wykorzystano rozbudowany wielokanałowy system akwizycji danych z dwóch trójosiowych czujników przyspieszeń drgań, mikrofonu, trójosiowego układu pomiaru pola magnetycznego oraz czujnika tachometrycznego. Dodatkowo rejestrowano prądy fazowe i napięcie z cewki pola poosiowego. Wyznaczone wartości skuteczne przyspieszeń i prędkości drgań wykorzystano do porównania skuteczności miar na odwzorowanie wprowadzonych wielkości wad. Na podstawie przeprowadzonych analiz Autor stwierdził, że najczulszym symptomem na zmiany równoległego przesunięcia wirnika względem stojana jest wartość skuteczna przyspieszeń drgań mierzonych w kierunku stycznym. W ramach eksperymentu czynnego związanego wprowadzeniem błędów osiowości wyznaczono również częstotliwości Rice'a dla prędkości drgań, potwierdzając wrażliwość miary na zmiany dla drgań rejestrowanych

w kierunku stycznym. Wyniki potwierdziły wpływ wielkości niewyważenia na wartości podstawowych wskaźników (wartość skuteczna, wartość szczytowa i średnia przyspieszeń drgań oraz wartość skuteczna prędkości drgań) podobnie jak zwiększenie oporów ruchu. Zwiększenie oporności rezystancji jednej z faz nie wykazało żadnej wyraźnej zależności dla wskaźników opartych na sygnałach drganiowy. Badania wykazały, że zaimplementowana w pracy dekompozycja multisynchroniczna jest skutecznym narzędziem diagnostycznym. Określono minimalną liczbę uśrednień dla określonego błędu względnego estymacji wartości skutecznej przyspieszeń drgań składowych synchronicznych. W dalszej części rozdziału opisano pomiary i analizy akustyczne oraz przebiegów prądów fazowych. Obszerne wyniki zawierają m.in. przykładowe trajektorie końców wektorów prądów zasilania silnika GUNT bez wad oraz z przesunięciem równoległym wirnika względem stojana, niewyważeniem, zwiększeniem oporów pracy oraz zwiększeniem rezystancji jednej z faz i odłączeniem fazy. Poza tym przedstawiono wyniki detekcji wad na podstawie zmian prędkości poślizgu oraz analizy pola magnetycznego. Oddzielną grupą badań są analizy w stanach nieustalonych, w ramach których napisano aplikację komputerową do śledzenia faz pracy badanego silnika. Z przedstawionych danych wynika, że metoda śledzenia faz pracy silnika na podstawie sumy wektorowej obwiedni prądów fazowych może być pomocna przy identyfikowaniu zwiększonych oporów ruchu oraz nierównomierności rezystancji uzwojeń. W badaniach przeprowadzonych z silnikami seryjnymi BESEL wykorzystano ten sam system pomiarowy co dla silnika badawczego GUNT. Przedstawiono budowę prototypu stanowiska badawczego do testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych, z pionowym położeniem osi silnika. Dokonano analizy wpływu ośrodka sprzęgającego na drgania rejestrowane na głowicy pomiarowej oraz wpływu sposobu montażu silnika w trakcie testów na drgania przedniej pokrywy łożyskowej. Analiza sygnałów zarejestrowanych na silnikach produkcyjnych była przeprowadzona analogicznie jak dla silnika badawczego. W końcowej części rozdziału piątego Autor przedstawił metodykę oceny jakości wykonania i testowania odbiorczego asynchronicznych silników elektrycznych, gdzie w tabeli 5.6 zamieścił porównanie potencjału wykrywania wad produkcyjnych poszczególnych metod analizy i parametryzacji sygnałów diagnostycznych. Przedstawiony został także przykład płaszczyzny stanów wartości skutecznej prędkości drgań oraz częstotliwości Rice'a dla testowanych wariantów silników BESEL podstawie pomiarów drgań w kierunku stycznym. Rozdział ten kończy przedstawienie proponowanej metodyki testowania z podziałem na trzy główne etapy.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań Autor przedstawił wnioski będące treścią ostatniego rozdziału. Podzielił je na poznawcze oraz utylitarne oraz przedstawił przesłanki do dalszych badań.

### 3. Uwagi krytyczne i zapytania

Staranna lektura rozprawy skłania do zgłoszenia kilku uwag, uwzględnienie których może poprawić jakość pracy, a które także można uwzględnić w przyszłych publikacjach:

- Rysunek 2.3 przedstawia tylko graniczne wartości zależności, może warto zaznaczyć obszar spełniający warunek, że częstotliwość drgań własnych układu silnik–posadowienie nie może być większa niż 1/3 częstotliwości obrotowej silnika.
- Wzory dotyczące generacji częstotliwości składowych sygnałów diagnostycznych pochodzących od lokalnych uszkodzeń mechanicznych elementów łożysk tocznych (2.8-2.10) wywodzą się z badań wibroakustycznych i mimo, że można te składowe wykryć w sygnałach prądowych lepiej jest je opisać w części dotyczącej badań wibroakustycznych.
- Jednostką prędkości obrotowej są  $\left[\frac{\text{obr.}}{\text{min}}\right]$ , zapis  $\text{min}^{-1}$  jest niejednoznaczny.
- Należy pamiętać, że numery norm zawsze są uzupełniane rokiem ich wydania. Normy wydane w różnych latach mogą się znacznie różnić.
- Na stronie 24 Autor napisał: „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”. Czy na pewno to stwierdzenie jest prawdziwe.
- O ile sam opis dekompozycji multisynchronicznej jest jasny i nie budzi zastrzeżeń to wzory 4.1-4.4 zdecydowanie wymagają sprawdzenie i ewentualnie szerszego omówienia związków między nimi. W szczególności proponuję dokonać analizy zmian funkcji podanej we wzorze 4.4 dla różnych wartości  $N$ .
- Często widma, a w szczególności widma ciśnień akustycznych są bardziej czytelne w logarytmicznej skali amplitud. Wartości niskoenergetyczne różniące się o 40 dB (100 razy mniejsza amplituda) giną w grubości linii przy skali liniowej.
- Dokładniejsze określenie częstotliwości składowej widma dyskretnego przedstawioną metodą korekcji amplitudowo-częstotliwościowej jest możliwe,

ale tylko w przypadku gdy w otoczeniu analizowanej składowej widma nie ma innych składowych widmowych i zakłócenie szumem jest bardzo małe. Jest to bardziej możliwe przy analizie częstotliwości sieci zasilającej czy sygnału tachometrycznego ze względu na słabe zakłócenia, ale należy pamiętać że są mało skuteczne przy zastosowaniu sygnałów zakłóconych.

Pozostałe uwagi dotyczące drobnych błędów np. „literówek” czy interpunkcji pominąłem, jako najmniej istotne z punktu widzenia recenzji.

Uwagi dotyczące zapisanych wzorów:

- We wzorze 2.23 brakuje składnika związanego z przyspieszeniami drgań, co powoduje, że w przedstawionym przypadku nie zgadzają się jednostki wielkości fizycznych będący składnikami wzoru.
- We wzorze 2.25 w efekcie końcowym otrzymujemy inną jednostkę niż we wzorze 2.23! wynika to także z błędnego zapisania wzoru.
- W opisie zmiennej  $i_{TK}(t)$  ze wzoru 2.25 brakuje wyjaśnienia, że jest to składowa **zmienna** podzielona przez składową stałą funkcji  $\psi[i(t)]$ .
- We wzorze 2.29 jest znacznie wygodniej podawać wartość ciśnienia odniesienia jako  $20 \mu\text{Pa}$  (zresztą tak jest to podawane w normach) niż  $0,00002 \text{ Pa}$ .
- We wzorze 4.22 w mianowniku powinno być widmo siły wymuszającej.
- Wzór 5.6 jest słuszny tylko dla silników asynchronicznych o jednej parze biegunów (np. badany silnik GUNT). Dla silników o dowolnej liczbie par biegunów do określenia współczynnika poślizgu lepiej porównywać z częstotliwością (prędkością obrotową) stojana, częstotliwość (prędkość obrotową) wirującego pola wytwarzanego przez uzwojenie wirnika.

Po zapoznaniu się z recenzowaną pracą nasuwają się następujące pytania:

1. Jak należy wyznaczyć wypadkowy poziom ciśnienia akustycznego w punkcie pomiarowym dwóch źródeł (np. wykonując pomiary akustyczne tła i pomiary akustyczne badanej maszyny wraz z tłem)?
2. Proszę o szersze wyjaśnienie zagadnień związanych z transformatą Hilberta i sygnałem analitycznym wykorzystywanych do wyznaczania obwiedni sygnałów.



#### **4. Ocena końcowa**

Przedstawione uwagi mają głównie znaczenie formalne, mogą być częściowo dyskusyjne, ale nie zmieniają faktu, że Autor wykazał się umiejętnością rozwiązania problemu naukowego mającego także zastosowanie aplikacyjne. Potrafi poprawnie zaplanować i wykonać eksperymenty naukowe oraz przeprowadzić właściwą analizę wyników oraz wykazał się wiedzą z zakresu badanych zjawisk. Bezspornie zaletą przedstawionej do recenzji pracy jest bogata prezentacja wyników i analiz w postaci rysunków oraz wykresów ułatwiających zrozumienie prezentowanych zagadnień.

**Uważam zatem, że recenzowana praca doktorska Pana mgr. inż. Mateusza Wróbla spełnia wymogi Ustawy o Tytule i Stopniach Naukowych dla dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna (dawniej Mechanika i Budowa Maszyn). Stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony pracy doktorskiej.**

