

Dr hab. inż. Iwona Komorska, prof. URad.
Katedra Mechaniki Stosowanej i Mechatroniki
Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Radomski
Ul. Malczewskiego 29
26-600 Radom

Wpłynęło dnia 15. 01. 2024
Zarejestrowano pod nr
Podpis *dm*

Radom, 27 grudnia 2023 r.

RECENZJA rozprawy doktorskiej

mgr inż. Wojciecha Staszewskiego pt. *Badanie możliwości zastosowania niskomocowych urządzeń monitorowania wykorzystujących technologię MEMS do wykrywania uszkodzeń wybranych maszyn wirnikowych*, w dyscyplinie Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne,

sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie
z dnia 27 października 2023 r.

Promotor pracy doktorskiej:
dr hab. inż. Adam Jabłoński, prof. AGH

I. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Wojciecha Staszewskiego pt.: *Badanie możliwości zastosowania niskomocowych urządzeń monitorowania wykorzystujących technologię MEMS do wykrywania uszkodzeń wybranych maszyn wirnikowych* została zredagowana na 242 stronach. Praca zawiera 28 tabel oraz 78 rysunków, wymagane streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów. Dla poprawy czytelności rozprawy rozwój algorytmów zastosowanych w aplikacji przedstawiono w pięciu dodatkach. Autor cytuje 93 publikacje bezpośrednio związane z analizą doniesień literaturowych dotyczących budowy i działania układów mechatronicznych, systemów wbudowanych, oraz metod cyfrowego przetwarzania sygnałów stosowanych w diagnostyce technicznej.

Rozprawa zawiera 10 rozdziałów. W rozdziale 1 Doktorant przedstawia motywację do podjęcia pracy, a także formułuje problem badawczy oraz definiuje cel, tezę i zakres pracy. W rozdziale 2 przedstawione są różne aspekty systemów monitorowania stanu, a więc zadania, klasyfikacja, architektura czy też etapy wdrażania. Rozdział 3 zawiera charakterystykę podstawowych elementów mechanicznych oraz opisuje ich wpływ na odpowiedź drganiową układu. Omawia pojęcie częstotliwości charakterystycznej i rzędu charakterystycznego. Rozdział 4, to przedstawienie wymagań funkcjonalnych dla nowoczesnego systemu monitorowania. Autor zamieszcza opracowane przez siebie tablice morfologiczne poszczególnych części składowych systemu, a także dokonuje przeglądu protokołów

komunikacyjnych i systemów wbudowanych rozważanych w prototypowym systemie pomiarowym. Jest to najobszerniejszy rozdział pracy. W rozdziale 5 Doktorant dokonuje analizy właściwości mechanicznych toru przenoszenia sygnału drgań. Opisuje przeprowadzone badania, w których wykorzystuje MES do projektowania układu pomiarowego. W rozdziale 6 Doktorant przedstawia projekt wbudowanego systemu monitorowania stanu. Rozdział 7 zawiera pomiary i walidację prototypu systemu monitorowania stanu. Jest to jedna z najważniejszych części pracy, w której oceniana jest dokładność, precyzja i wiarygodność opracowanego systemu. W rozdziale 8 Doktorant skupia się na metodach cyfrowego przetwarzania sygnałów drgań oraz obliczaniu wskaźników diagnostycznych. W rozdziale 9 Autor dokonuje podsumowania pracy i formułuje wnioski końcowe oraz przesłanki do dalszych badań. Bibliografię, odnoszącą się do poszczególnych rozdziałów, zawarto w rozdziale 10. Dodatkowo wytworzone algorytmy przetwarzania sygnałów zawarte są w sześciu załącznikach (dodatkach).

Praca doktorska została napisana starannie, używając właściwego języka technicznego odpowiedniego dla opisu wielu analizowanych procesów, zjawisk i technologii. Dodatkowo, praca jest uzupełniona czytelnymi tabelami oraz odpowiednio dobranymi ilustracjami graficznymi.

II. Ocena merytoryczna pracy

Monitorowanie stanu maszyn pomaga we wczesnym wykrywaniu wszelkich nieprawidłowości w maszynach wirujących, takich jak silniki, turbiny czy wentylatory. Dzięki temu możliwe jest zidentyfikowanie potencjalnych problemów przed ich eskalacją, co pozwala na planowanie konserwacji i unikanie długotrwałych przestoju oraz zmniejszenie kosztów eksploatacji. Czujniki drgań stanowią istotny element Przemysłowego Internetu Rzeczy (IIoT), który odnosi się do wykorzystania technologii internetu rzeczy w kontekście przemysłowym. Połączone z zaawansowanymi algorytmami analizy danych, umożliwiają prognozowanie i przewidywanie awarii maszyn. Systemy IIoT oparte na czujnikach drgań pozwalają na identyfikację wzorców, które mogą wskazywać na zbliżające się problemy, umożliwiając planowanie konserwacji przed awarią. Ponadto czujniki drgań w ramach IIoT mogą być zintegrowane z innymi systemami przemysłowymi, takimi jak systemy zarządzania produkcją, systemy ERP (Enterprise Resource Planning) czy systemy automatyzacji, co umożliwia pełną integrację procesów produkcyjnych. Nowoczesność technologii czujników MEMS (Mikrosystemy Elektromechaniczne) polega na zastosowaniu zaawansowanych metod produkcji mikroskalowych, które umożliwiają tworzenie bardzo małych, precyzyjnych i energooszczędnych urządzeń pomiarowych. Problematyka przedstawionej pracy doktorskiej jest więc jak najbardziej aktualna i zgodna ze światowymi trendami.

Za cel pracy Doktorant postawił sobie zbadanie możliwości zastosowania niskomocowych urządzeń monitorowania wykorzystujących nowoczesną technologię MEMS do wykrywania uszkodzeń maszyn wirnikowych. Sformułował następującą tezę: *Możliwe jest opracowanie sposobu na uzyskanie wymaganych własności mechanicznych czujnika (jako całego systemu) podczas kolejnych modyfikacji w zakresie architektury, układów elektronicznych i interfejsów*

komunikacji, przy zachowaniu wymaganej funkcjonalności diagnostycznej (tj. funkcji obliczeniowych). W tym celu Doktorant przestudiował literaturę, która zawiera zarówno podręczniki, jak i noty aplikacyjne elementów elektronicznych, ale większość to artykuły naukowe, w dużej części z ostatnich lat, dotyczące teorii diagnostyki technicznej, projektowania mechatronicznego i metod cyfrowego przetwarzania sygnału.

Praca ma charakter interdyscyplinarny. Łączy elementy elektroniki (systemy wbudowane, protokoły komunikacyjne, algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów) i mechaniki (własności mechaniczne czujnika, dynamika maszyn wirujących), z przewagą pierwszej dziedziny.

Praca Doktoranta zmierzała do opracowania inteligentnego czujnika o szerokim paśmie częstotliwości, niskim poziomie szumu, umożliwiającego obliczanie założonych wskaźników diagnostycznych. Na etapie projektowania Doktorant opracował tablice morfologiczne elementów systemu pomiarowego. Efektem prac projektowych jest współautorstwo patentu na wynalazek PL238650B1 pt. „Sposób i urządzenie pomiarowo-transmisyjne do akwizycji danych pomiarowych układów mechatronicznych” uzyskanego w 2021r. Następnie Doktorant wykonał modele MES dla kolejnych wersji czujnika oraz przeprowadził testy analizy modalnej w warunkach laboratoryjnych. W celu walidacji opracowanego prototypu czujnika wykonał testowe pomiary porównawcze na maszynie wirnikowej – stanowisku badawczym Vibstand 2, dla czujnika prototypowego i referencyjnego. Autor osiągnął pożądaną efekty: obniżony poziom szumu, szerokie pasmo przepustowe częstotliwości, porównywalne odpowiedzi częstotliwościowe, niski pobór mocy. O wadze prac Doktoranta świadczy współpraca z amerykańską firmą Analog Devices Inc. w latach 2019-22, w ramach której powstały prototypy nowoczesnych czujników drgań w technologii MEMS. Praca zespołu, w którym pracuje Doktorant, została również doceniona przez NCBiR. Projekt pt. ”Cyfryzacja Utrzymania Ruchu w elastycznym modelu preskrypcyjnym” został zakwalifikowany do finansowania.

Ponadto Doktorant opracował oryginalne algorytmy przetwarzania sygnałów drgań, w tym nowatorski algorytm obliczania obwiedni sygnału, algorytm szybkiego obliczania tendencji rozwojowych przebiegów czasowych i algorytm redukcji fałszywych alarmów.

Uważam, że Doktorant osiągnął swój cel postawiony w pracy. Dowiódł też swoimi badaniami i analizami, że opracowany prototypowy czujnik, cechujący się niskim poborem mocy, może służyć do ciągłego monitoringu i wykrywania uszkodzeń maszyn wirnikowych.

III. Uwagi krytyczne

W rozdziale 4 Doktorant przedstawia wybrane komponenty w charakterystyce sygnału drganiowego maszyn wirujących. W mojej opinii rozdział jest potraktowany bardzo skrótowo, ponieważ czytelnik specjalizujący się w dyscyplinie *Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne* nie jest zaznajomiony z zagadnieniami diagnostyki technicznej maszyn wirnikowych. W rozdziale 3.2 jako podstawowe elementy mechaniczne wymienione są wały i łożyska. Między wierszami wspomniane są przekładnie zębate (reduktor), które są jednymi z głównych generatorów drgań w układach technicznych i też powinny mieć swój podrozdział. Może należałoby zaznaczyć, że temat jest obszerny, ale Autor ogranicza się jedynie do opisu

zagadnień wykorzystywanych dalej do walidacji systemu pomiarowego. W rozdziale 3.4 Autor rozważając przyczyny modulacji sygnałów pisze o „modulacjach generowanych przez planety EG”, chociaż nie wspominał wcześniej o przekładniach planetarnych.

W podrozdziale dotyczącym łożysk tocznych, wprowadzając Doktorant podaje źródła literaturowe ze wzorami na obliczenie częstotliwości/rzędów charakterystycznych dla uszkodzeń BPFO, BPFI, FTF i BSF, ale nie zaszkodziłoby pracy podanie tych wzorów, zwłaszcza że częstotliwości te pojawiają się dalej w pracy.

Rysunki 3.1, 3.2, 3.3 są czytelne, ale lepiej byłoby, gdyby miały skalę, przynajmniej na osi odciętych.

Na str.64 w rozdziale 3.3.2 Autor pisze: „Wzrost amplitudy i liczby harmonicznych częstotliwości charakterystycznej REB jest oznaką rozwoju zwarcia REB”. Jest to niejasne.

W rozdziale 4.2 Doktorant opracował tablice morfologiczne dla poszczególnych komponentów systemu. W mojej opinii zbyt powierzchownie potraktował przetwornik analogowo-cyfrowy, który jest odpowiedzialny za bezpowrotną utratę części sygnału analogowego. Tablica morfologiczna obejmuje tylko dwie kategorie: przetwornik wbudowany i zewnętrzny. Natomiast należałoby szerzej rozważyć takie parametry jak rozdzielczość, zmienny zakres napięcia, czas odpowiedzi, itp.

W rozdziale 5, przy okazji analizy rys.5.10, należałoby podać wzór na funkcję koherencji i przedstawić krótko jej znaczenie w analizie częstotliwościowej.

Kolejne uwagi i pytania:

1. Analizując przebiegi czasowe dla czujnika referencyjnego PCB (rys.7.9) i prototypowego MEMS (rys.7.10) można zauważyć około 10-krotną różnicę amplitudy. Z czego to wynika? Jak wobec powyższego można porównać wartości VRMS podane w tabeli 7.2 dla czujnika prototypowego i referencyjnego?
2. Jaki wzór ogólny zastosowano do obliczenia VRMS? Na str.184 Autor pisze, że wartość VRMS wyznaczono zgodnie z twierdzeniem Parsewala według wzoru (4). Dlaczego we wzorze występuje wartość $\frac{1}{2}$?
3. Czy tłumienie przez czujnik określonych częstotliwości, które w pracy przedstawiane są jako zaleta czujnika, nie spowoduje wy tłumienia również sygnałów użytecznych diagnostycznie?
4. Dlaczego badane czujniki MEMS charakteryzują się niższym poziomem szumu niż czujniki referencyjne PCB? Czy obniżony poziom szumu czujnika MEMS nie spowoduje, że niskoenergetyczne składowe związane np. z uszkodzeniem łożysk tocznych, nie zostaną wykryte?

IV. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Praca została zredagowana w sposób staranny. Błędy edytorskie i tzw. literówki są nieliczne. Niemniej, nasuwa się kilka uwag związanych ze strukturą, terminologią i opisem rysunków:

- Na str. 34 i 35 Autor używa skrótów myślowych „pomiar maszyn wirujących” oraz „pomiar maszyn obrotowych”. Powinno być doprecyzowane o jaki pomiar chodzi
- Na str. 37 jest: ... *na rys. 1.1*; powinno być: ... *na rys.2.1*.

- Na str. 38 jest: *nie ważne*; powinno być *nieważne*.
- Na liście skrótów brakuje pojawiających się w pracy: SB (str.43), RUL (str.44), MHI (str.54), SIWZ (str.54), HI (tab.2.2, str.55)
- Na stronie 58 w zaleceniach dotyczących postępowania z danymi należałoby ujednolicić styl.
- W rozprawie Autor używa określeń "niewyrównoważenie" albo „niewyważenie”, ale w tab.2.1 na str.45 pojawia się pojęcie „niezrównoważenie”.
- Na str.60 co oznacza parametr „Kolejność wałów wolnych”. Czy nie powinno być „Rząd”?
- Str.70 punkt 4: niedokończone zdanie.
- Rozdział 4.3 zatytułowany *Protokoły* w mojej opinii powinien nazywać się *Protokoły komunikacyjne*.
- W tytule podrozdziału 5.3.2 powinno być *Wzbudzenie* zamiast *Pomiar*.
- Na rys.2.10 przedstawiono przebieg w funkcji czasu, czy widmo częstotliwościowe?
- Na rysunkach 5.2, 5.3, 5.4 brakuje opisów osi, a na rys. 5.12 - opisów osi i skali
- Rys.7.10 – błąd w podpisie rysunku: powinno być *prototypowego* a nie *referencyjnego*
- Na rys. 7.14 brak opisu osi rzędnych, a na osi odciętych *Frequency* powinno być w [Hz], a nie w [dB].
- Podrozdział 5.2 zawiera tylko jeden podrozdział 5.2.1.1.

V. Ocena pracy

Przedstawiona do oceny praca mgr inż. Wojciecha Staszewskiego pt. *Badanie możliwości zastosowania niskomocowych urządzeń monitorowania wykorzystujących technologię MEMS do wykrywania uszkodzeń wybranych maszyn wirnikowych* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest testowanie prototypów czujników drgań wraz z odpowiednio dobranym układami elektronicznymi i protokołem komunikacyjnym w zadaniu monitorowania stanu obiektu technicznego. Autor rozwiązał postawiony problem przez wykonanie modeli MES dla kolejnych wersji czujnika, wykonanie testów analizy modalnej, zastosowanie tablic morfologicznych dla koncepcji modelu czujnika, a następnie zaplanowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Przy okazji przedstawił dużo ciekawych analiz porównawczych dla różnych rozwiązań technicznych czujników, protokołów i interfejsów komunikacji znanych z literatury. Założone cele rozprawy doktorskiej zostały w pełni osiągnięte.

Autor wykazał się wiedzą teoretyczną na temat budowy i działania systemów wbudowanych, metod cyfrowego przetwarzania sygnałów, budowy i działania przemysłowych systemów monitorowania i diagnostyki maszyn wirnikowych. Wykazał się również dużymi umiejętnościami z zakresu projektowania mechatronicznego, tworzenia algorytmów do rozwoju zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów oraz samodzielnego planowania badań eksperymentalnych. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne i redakcyjne są tylko drobnymi niedociągnięciami lub pytaniami uściślającymi i nie przesłaniają istotnych wartości pracy i znaczenia dla zastosowań praktycznych.

Praca doktorska Pana mgr inż. Wojciecha Staszewskiego spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Przedstawione wyniki analiz, badania eksperymentalne oraz algorytmy przetwarzania sygnałów są oryginalne. Uzyskane wyniki mają znaczenie praktyczne i mogą być wykorzystane w systemach monitorowania maszyn.

Moja ocena pracy jest pozytywna. Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr inż. Wojciecha Staszewskiego do publicznej obrony swojej pracy doktorskiej.



dr hab. inż. Iwona Komorska, prof. URad

Radom, 27 grudnia 2023 r.