

dr hab. inż. Grzegorz Klekot, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Warszawa, 10.01.2024 r.

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

17. 01. 2024

Wpłynęło dnia

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha STASZEWSKIEGO pt. „Badanie możliwości zastosowania niskomocowych urządzeń monitorowania wykorzystujących technologię MEMS do wykrywania uszkodzeń wybranych maszyn wirnikowych”

Podstawy formalne opracowania recenzji:

Recenzję pracy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Staszewskiego opracowano na podstawie umowy z dnia 17.11.2023 r. zgodnie z Uchwałą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

1. Uwagi o wyborze tematyki pracy

Zapewnienie bezpiecznej i bezawaryjnej eksploatacji współczesnych obiektów technicznych wymaga ciągłego doskonalenia narzędzi pozwalających lepiej przewidywać potencjalne awarie, lokalizować uszkodzenia i monitorować parametry eksploatacyjne poszczególnych zespołów. Do tego celu wykorzystuje się między innymi metody bazujące na badaniu zmian procesów fizycznych towarzyszących eksploatacji, w szczególności procesów wibroakustycznych.

Podczas oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych szeroko stosuje się wnioskowanie bazujące na zmianach drgań rejestrowanych w wybranych punktach



pomiarowych. Aktualnie wdrażane są koncepcje narzędzi diagnostycznych eliminujących konieczność angażowania człowieka do analiz rejestrowanych danych i automatyzujących procesy decyzyjne – dla których kluczowe znaczenie ma łatwość montażu przetworników wielkości mechanicznych oraz komunikacja między modułami.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że tematyka pracy jest aktualna, a badania nad stosowaniem przetworników pomiarowych MEMS do diagnostyki maszyn wirnikowych mają znaczenie użytkowe i naukowe.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny praca liczy 243 strony. Główna część merytoryczna zawiera 176 stron tekstu łącznie z rysunkami i tabelami; resztę stanowią: licząca 93 pozycje bibliografia, strony tytułowe (polskojęzyczna i anglojęzyczna), dedykacja, podziękowania, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, spis ilustracji, spis tabel, lista skrótów oraz 6 dodatków.

W pierwszym rozdziale zatytułowanym „Wstęp” Autor sygnalizuje główne przyczyny awarii maszyn i zwraca uwagę na zasadność monitoringu diagnostycznego, przedstawia cel i formułuje tezę rozprawy, oraz omawia układ pracy.

Rozdział drugi zawiera podstawowe informacje dotyczące systemów monitorowania stanu. Nacisk położono na przetwarzanie sygnałów drganiowych na potrzeby diagnostyki maszyn wirnikowych.

W kolejnym rozdziale Doktorant omówił wybrane parametry charakteryzujące drgania maszyn wirnikowych. Między innymi zwrócił uwagę na komponenty sygnałów będące efektem wymuszeń kinematycznych oraz zjawisk modulacyjnych.

Zagadnieniom wymagań funkcjonalnych systemu monitorowania stanu maszyn poświęcono rozdział czwarty. Doktorant z wykorzystaniem tablic morfologicznych omówił najważniejsze składniki systemu monitorowania stanu maszyn wirnikowych, szczegółowo przeanalizował możliwe warianty realizacyjne poszczególnych jego elementów.

Piąty rozdział zatytułowany „Analiza właściwości mechanicznych toru przenoszenia sygnału drgań” zawiera dyskusję wybranych aspektów użytkowych akcelerometrów MEMS wraz z oceną znaczenia umiejscowienia elementu przetwarzającego dla

charakterystyki częstotliwościowej przetwornika. Wnioski z obliczeń symulacyjnych metodą elementów skończonych zweryfikowano eksperymentalnie z wykorzystaniem wzbudnika elektrodynamicznego, opisano również próby wymuszenia akustycznego. Szósty rozdział Doktorant opracował poszerzając informacje zawarte w opisie patentowym PL 238650 „Sposób i urządzenie pomiarowo-transmisyjne do akwizycji danych pomiarowych układów mechatronicznych”. Przedstawił budowę, zadania, cechy i zastosowania projektowanego systemu, uwypuklił walory użytkowe przetworników MEMS jako elementów współczesnych systemów diagnostycznych.

W rozdziale siódmym Doktorant omówił badania weryfikacyjne zrealizowane na wyspecjalizowanym stanowisku laboratoryjnym. Przez porównanie przebiegów czasowych oraz widm amplitudowych sygnałów przyspieszeń drgań rejestrowanych akcelerometrem piezoelektrycznym i prototypowym przetwornikiem MEMS dla dwóch typowych przykładowych uszkodzeń (niewyrównoważenie wirnika i punktowy defekt bieżni łożyska tocznego) potwierdził przydatność przetwornika MEMS do zastosowań w systemach diagnostycznych maszyn wirnikowych.

Rozdział ósmy zawiera opis wybranych aspektów przetwarzania sygnałów poparty analizą rozwiązań do zastosowań diagnostycznych, zwłaszcza w systemach z przetwornikami MEMS. Kilkoma przykładami zilustrowano sposoby implementacji algorytmów obliczeniowych.

Podsumowanie uzyskanych efektów rozprawy Autor przedstawił w ostatnim, dziewiątym rozdziale. Przeprowadzone badania i analizy dowiodły, że można opracować przetwornik pomiarowy o określonych własnościach mechanicznych gwarantujący zachowanie wymaganej funkcjonalności diagnostycznej systemu. Osiągnięte rezultaty zachęcają do rozwijania metodyki poprzez opracowanie algorytmów samoczynnej synchronizacji danych w systemach rozproszonych oraz automatyzację wnioskowania diagnostycznego z dużych zbiorów danych.

Rozprawę uzupełnia 6 dodatków, przede wszystkim dokumentujących wykorzystanie środowiska MATLAB na potrzeby przeprowadzonych badań.

3. Ocena pracy

Praca ma charakter wielodyscyplinarny, obejmuje problematykę mieszczącą się w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych. Zakwalifikowanie pracy do dyscypliny

Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne wynika ze stosowania przez Doktoranta metod i środków przetwarzania informacji typowych dla obszaru tej dyscypliny.

Przedstawiony przegląd literaturowy jest opracowany właściwie. Odzwierciedla aktualny stan wiedzy, nawiązuje do dotychczasowych badań związanych z problematyką rozprawy prowadzonych w ośrodkach zagranicznych i krajowych. Wybór literatury przedstawiony przez Autora jest trafny a sposób cytowania poprawny, co świadczy o umiejętności posługiwania się materiałem bibliograficznym.

Bezpośrednie powiązanie odnośników literaturowych z konkretnymi rozdziałami ułatwia korzystanie z bibliografii.

Autor jako cel rozprawy wskazuje „*zbadanie możliwości zastosowania niskomocowych urządzeń wykorzystujących technologię MEMS do wykrywania uszkodzeń maszyn wirnikowych*” bezpośrednio powiązany z postawioną tezą „*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)*”. Komplikacja formy redakcyjnej sprawia, że zrozumienie istoty tezy staje się możliwe dopiero po głębszej analizie jej treści.

Dla osiągnięcia postawionego celu Doktorant zebrał i przeanalizował informacje o systemach monitorowania stanu maszyn ze szczególnym uwzględnieniem drgań generowanych przez maszyny wirnikowe. Następnie opracował (opisaną w czwartym rozdziale rozprawy) analizę wymagań funkcjonalnych dla systemu monitorowania maszyn. Nie ustrzegł się pewnych uproszczeń bądź nieściłości – przykładem akapit o treści „*Akcelerometry są elektronicznymi urządzeniami, które służą do pomiaru przyspieszenia, nachylenia, wibracji lub wstrząsów. ... Początkowo akcelerometry były stosowane głównie w przemyśle kosmicznym i lotniczym, jednak wraz z postępem technicznym ich zastosowania poszerzyły się.*”. Niemniej **opracowaną analizę uważam za mocną stronę pracy o znaczeniu aplikacyjnym**; według mojej oceny zaprezentowane rezultaty nadają się do bezpośredniego wykorzystania podczas realizacji projektu badawczego POIR.01.01.01-00-0052/22-00 „Cyfryzacja utrzymania ruchu w elastycznym modelu subskrypcyjnym”.

Kolejne działania prowadzące do uzasadnienia tezy rozprawy wymagały zbadania znaczenia wybranych parametrów konstrukcyjnych projektowanego przetwornika dla

wiarygodności odwzorowania sygnału drganiowego. Doktorant poprawnie wykonał obliczenia symulacyjne oraz weryfikację eksperymentalną umiejscowienia modułu MEMS. Właściwie zinterpretował rezultaty eksperymentów: jako reprezentatywne odpowiedzi częstotliwościowe uznał uzyskane podczas badań realizowanych wstrząsarką, natomiast zdyskwalifikował jako mało wiarygodne wyniki pomiarów drgań wymuszanych sygnałem akustycznym.

Ważną częścią realizacji celu rozprawy była analiza budowy, zadań, cech i zastosowań projektowanego systemu monitorowania uwzględniająca specyfikę przetworników MEMS jako elementów takiego systemu. Forma redakcyjna tego fragmentu pracy nawiązuje do sposobu opracowywania zgłoszeń patentowych – co świadczy o przygotowaniu Doktoranta do twórczych prac technicznych i dobrze prognozuje Jego działaniom inżynierskim.

Interesującym pomysłem weryfikacji przydatności przetwornika MEMS do diagnostyki maszyn wirnikowych jest równoległa rejestracja konwencjonalnym akcelerometrem drgań maszyny o znanych (zadanych) uszkodzeniach, a następnie porównanie zobrażenia obu sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości. Pozytywnie oceniam sposób wykorzystania specjalistycznego stanowiska laboratoryjnego w tym obszarze. Na uwagę zasługują również opracowane przez Doktoranta z wykorzystaniem środowiska MATLAB implementacje algorytmów wspierających przetwarzanie sygnałów diagnostycznych. Zostały one właściwie użyte podczas badań, mają też potencjał aplikacyjny.

Praca została zakończona poprawnym podsumowaniem i wskazaniem kierunków rozwojowych; uwypuklono autorski wkład Doktoranta.

Zrealizowano cel pracy i uzasadniono związaną z tym celem tezę, a wyniki badań mają znaczenie użytkowe, stanowią wkład w rozwój nauk inżynierjno-technicznych.

Całość działań przedstawionych w pracy oceniam pozytywnie pod względem merytorycznym i metodycznym. Autor poprawnie zrealizował badania literaturowe, właściwie zaplanował i wykonał symulacje numeryczne oraz eksperymenty stanowiskowe prowadzące do osiągnięcia celu pracy, opracował narzędzia cyfrowego przetwarzania sygnałów do wykorzystania w systemach diagnostycznych.



4. Szczegółowe uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasuwają się następujące uwagi i pytania:

- Opis realizacji eksperymentów stanowiskowych i przetwarzania sygnałów pomija kwestie zachowania spójności pomiarowej oraz niepewności pomiarów. Jak zrealizowano dobrą praktykę laboratoryjną w tym obszarze?
- Wyjaśnienia wymagają użyte do rozszyfrowania skrótów polskojęzyczne definicje kilku parametrów częstotliwościowych związanych ze współpracą elementów łożyska tocznego (BPFI, BPFO, BSF, FTF) i par kół zębatych (GMF). Zastosowana terminologia niewłaściwie odzwierciedla sens nazw anglojęzycznych, zaś rezygnacja z definicji matematycznej utrudnia zrozumienie istoty tych parametrów. Również opis skrótu MES w niezwykle uproszczony sposób nawiązuje do podstaw metody elementów skończonych.
- Autor posługuje się pojęciami „czujnik” i „przetwornik”. Czy oba pojęcia mają identyczne znaczenie? Jeśli nie – czym zdaniem Autora różni się czujnik od przetwornika?
- Jak należy rozumieć sformułowanie „*relacja czasu akwizycji do widma, która zależy od liczby obrotów maszyny*” (strona 27)?
- Tytuł rysunku 2.1 „*Zasada pomiaru przyspieszeń drgań*” w niewielkim stopniu nawiązuje do elementów tego rysunku.
- Nieprecyzyjny opis niektórych elementów reprezentujących dotkliwość usterki utrudnia zrozumienie istoty omawianych parametrów. Prawdopodobnie dyskusja wzrostu składowych odnosi się do amplitud (nie częstotliwości) tych składowych. Co oznacza symbol „SB” (strona 43, wiersz 8)?
- Trudny do jednoznacznej interpretacji jest schemat blokowy przedstawiony na rysunku 2.5 „*Typy i zadania systemów CMS*”.
- Autor niekiedy posługuje się dość poważnymi uproszczeniami, przykładem zdanie „*Wały generują wielokrotności prędkości wału*” (strona 60, p. 3.2.1); inny podobny przykład to użycie określenia „*prędkość*” zamiast „*prędkość obrotowa*” (strona 61).
- Niezrozumiały jest sens pierwszego (urwanego) zdania na stronie 70.

- Mało czytelny (rozmiar czcionki) opis bloków na schemacie z rysunku 4.1 utrudnia zrozumienie prezentowanych treści, analogiczne uwagi dotyczą rysunków 4.8 i 8.2.
- Niektóre rysunki zawierają anglojęzyczne fragmenty (w szczególności rysunki 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.8), natomiast w podpisach brak odwołań literaturowych. Jakie uzasadnienie ma tutaj terminologia obcojęzyczna?
- Czy przedstawienie zużycia energii w jednostkach natężenia prądu nie jest nadmiernym uproszczeniem (tabele 4.11, 4.12, 4.13, 4.15, tekst strona 114)?
- Niektóre wykresy (rysunki 5.9, 5.10, 5.12, 7.14) są trudne do interpretacji ze względu na pominięcie informacji o jednostkach skalujących osie.
- Błędem jest wskazanie SKF jako przedsiębiorstwa amerykańskiego (strona 149); jest to przedsiębiorstwo szwedzkie!
- Uwagi dotyczą również kwestii językowych.

Autor niekiedy łączy terminologię różnojęzyczną spolszczając terminologię (na przykład „...służy do przesyłania danych z mastera do sławów...”, strona 92; „...frameworków programistycznych...”, strona 115; „shaker”, strona 139; itp.).

Niektóre opisy są dość ogólnikowe i trudne do interpretacji, na przykład „Urządzenie wbudowane to specjalizowane urządzenie, które jest zaprojektowane do pełnienia określonych funkcji lub realizacji konkretnego zadania. Jest ono osadzone lub zawarte w innym obiekcie lub systemie i służy większym celom niż samo urządzenie” (strona 84).

Niewłaściwie użyto przysłówka „najbardziej” przed „optymalnych” (strona 69): przecież nie ma rozwiązania lepszego niż optymalne!

Razi zamienne stosowanie terminów „punkt czytania”, „punkt odczytu”, „punkt akwizycji” (strona 129) w odniesieniu do tego samego pojęcia czy też „sposób ekscytacji” zamiast „rodzaj wymuszenia” (strona 132).

Niewłaściwy szyk i konstrukcja zdania „...im bliżej MEMS do punktu mocowania czujnik, im mniejszy jest na niego wpływ niepożądane efekty propagacji drgań, może być również ważny.” (strona 137) utrudnia zrozumienie treści.

5. Uwagi o stronie edytorskiej rozprawy

Praca pod względem edytorskim jest opracowana dość starannie, niemniej Autor nie ustrzegł się błędów „literowych”. Poniżej kilka przykładów pomyłek nie wyeliminowanych podczas prac redakcyjnych.

- Błędem literowym o znaczeniu merytorycznym jest powołanie w streszczeniu wytycznych Polskiego Komitetu Organizacyjnego (zamiast Polskiego Komitetu Normalizacyjnego), streszczenie anglojęzyczne powieliła błąd;
- Strona 36, wiersz 7 – jest „Rysunek 2.1”, powinno być „Rysunek 2.2”;
- Strona 37, wiersz 23 – jest „rysunku 1.1”, powinno być „rysunku 2.1”;
- Strona 90, wiersz 23 – jest „nowoczesne systemy wbudowane”, powinno być „nowoczesnych systemów wbudowanych”;
- Strona 135, wiersz 7 od dołu – jest „możliwe było bezkontaktowe i precyzyjne”, powinno być „możliwy był bezkontaktowy i precyzyjny”;
- Strona 169, wiersz 4 od dołu – jest „10 mVg”, powinno być „10 mV/g”;
- Strona 180, wiersz 3 od dołu – jest „Rysunek x”, powinno być „Rysunek 8.2”;
- Strona 183, wiersz 12 – brak słowa „przez” między „rozwiązano” a „zastosowanie”;
- Błędna numeracja akapitów 4.4.3 i 4.4.4 na stronach 112, 114 oraz w spisie treści.

Zasygnalizowane powyżej mankamenty stylistyczne i edytorskie nie komplikują odbioru istoty pracy ani nie zmniejszają jej czytelności.

6. Wnioski końcowe

Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne nie obniżają pozytywnej całościowej oceny pracy. Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa jest wartościowa pod względem poznawczym i użytecznym, zawiera nowatorskie spojrzenie na wykorzystanie akcelerometrów MEMS do wykrywania uszkodzeń maszyn wirnikowych.

Mgr inż. Wojciech Staszewski wykazał się umiejętnością postawienia i rozwiązania problemu naukowego, jakim jest właściwe zaplanowanie i zrealizowanie badań

literaturowych, symulacyjnych, eksperymentalnych oraz wykorzystanie rezultatów do poprawnego formułowania wniosków; uznanie budzi opatentowany wynalazek. Doktorant wykazał, że ma odpowiedni zasób wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz, że potrafi samodzielnie prowadzić pracę naukową.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr. inż. Wojciecha Staszewskiego „Badanie możliwości zastosowania niskomocowych urządzeń monitorowania wykorzystujących technologię MEMS do wykrywania uszkodzeń wybranych maszyn wirnikowych” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2017 r. poz. 1789) w zw. z art. 179 ust. 1 i ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 r. poz. 1669 z późn. zm) i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.

