

Poznań, dn. 28.04.2023 r.

dr hab. inż. Leszek Kasprzyk, prof. PP
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań
tel. 61 665 23 88 (-89)

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Kędzierski

Tytuł rozprawy: Rotating Objects Balancing Based on Signal Amplitude and Phase Analysis

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Krzysztof Siwek, prof. PW

Promotor pomocniczy: dr inż. Radosław Roszczyk

Dziedzina: nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Podstawa prawna opracowania: ocenę rozprawy doktorskiej przygotowano na zlecenie prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 27 marca 2023 r., zgodnie z uchwałą 408/II/2022 Rady Dyscypliny z dnia 20 września 2022 r. dot. uzupełnienia lub poprawienia rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Kędzierskiego.

Ocena tematyki rozprawy

Tematyka recenzowanej pracy doktorskiej dotyczy wyważania obiektów wirujących, przeprowadzanego na podstawie analizy amplitudowo-fazowej sygnałów pochodzących z czujników przyspieszenia i zbliżeniowych. Uważam, że w dobie powszechnej automatyzacji i robotyzacji jest to zagadnienie ważne i aktualne.

Na świecie poszukuje się rozwiązań technicznych umożliwiających minimalizację drgań układów wirujących, spowodowanych błędami produkcyjnymi oraz montażowymi lub innymi czynnikami wynikającymi z pracy urządzenia. Niewyważenie prowadzić może do wzrostu wibracji i hałasu, nadmiernego zużycia łożysk, a w konsekwencji do przedwczesnych awarii. Ze względu na

skomplikowaną budowę nowoczesnych maszyn obrotowych oraz systemów z nimi współpracujących, duże koszty ich naprawy, a nawet zagrożenie życia lub zdrowia ludzi, wciąż poszukuje się różnego rodzaju metod diagnostyki i wydłużania czasu eksploatacji takich urządzeń. W tym obszarze na świecie istnieje wiele prac naukowych dotyczących technologii wyważania. W bazie Web of Science z okresu zaledwie 3 ubiegłych lat (2020–2022) znaleźć można kilka tysięcy artykułów naukowych na temat wyważania systemów wirujących, co potwierdza ważność i aktualność omawianego problemu.

Temat rozprawy w dużej mierze dotyczy zagadnień mechaniki, jednak zważywszy na to, że do osiągnięcia zamierzonego celu wykorzystuje się nowoczesne techniki pomiarowe i analizy sygnałów uważam, że ocenianą rozprawę doktorską można zaliczyć **do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**. Ponadto uważam, że jest ona istotna z punktu widzenia rozwoju nauki oraz **wymagała przeprowadzenia badań o charakterze naukowym odpowiednim dla poziomu stawianego pracom doktorskim**.

Ocena układu rozprawy oraz jej celu i tezy

Poprawiona praca doktorska złożona została w formie monografii napisanej w języku angielskim. Zawiera 165 stron i jest podzielona na 6 rozdziałów. Składa się z wprowadzenia (rozdział 1), ogólnego przeglądu zagadnień dotyczących wyważania oraz optymalizacji rozkładu mas korekcyjnych (rozdział 2), rozdziałów zawierających opis rozwiązań wyważania jedno- i wielopłaszczyznowego (rozdziały 3 i 4) oraz podsumowania (rozdział 5) i bibliografii (rozdział 6). Układ pracy jest poprawny, poszczególne rozdziały są jasno wyróżnione, a rysunki, tabele oraz zależności matematyczne poprawnie opisane i ponumerowane. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 87 pozycji, w tym tylko 1 autorstwa Doktoranta, co jest skromnym osiągnięciem. Uważam, że liczba i jakość cytowanych materiałów świadczą o tym, że Doktorant ma dobre rozeznanie w prezentowanym obszarze, a przedstawiona literatura i jej obszerność jest wystarczająca.

W pierwszym rozdziale, po krótkim wprowadzeniu zawierającym motywację podjęcia badań, Doktorant przedstawił – zmodyfikowane w stosunku do pierwotnej wersji rozprawy – cel oraz tezę pracy. Celem postawionym przez Doktoranta było: *opracowanie i wdrożenie oryginalnego rozwiązania projektowego problemu niewyważenia maszyn wirujących, w postaci systemu umożliwiającego przeprowadzanie wyważania wirników w łożyskach własnych maszyny* (tłumaczenie własne). Natomiast teza została sformułowana następująco: *system oparty na oryginalnym projekcie autora, wykorzystujący techniki ograniczania wpływu zakłóceń elektromagnetycznych, sprawdzanie odpowiedzi modalnej uchwytyów sond, kalibrację i regulację czujników, bezdotykowe metody wyważania oraz algorytm optymalizacji rozkładu mas korekcyjnych umożliwia poprawę wyników wyważania wirnika w porównaniu z istniejącymi rozwiązaniami, określając kąt niewyważenia na podstawie pojedynczego uruchomienia* (tłumaczenie własne).

Uważam, że układ pracy jest poprawny, a cel i teza pracy prezentują poziom odpowiedni dla rozpraw doktorskich.

Analiza zawartości rozprawy

W rozdziale pierwszym, oprócz celu i tezy, znaleźć można obszerny przegląd stanu wiedzy na temat metod wyważania układów wirujących, zrealizowany na podstawie książek oraz artykułów naukowych.

W rozdziale drugim Doktorant zdefiniował niewyważenie wirników oraz przedstawił znane metody ich wyważania. Opisał zaprojektowane przez siebie stanowisko testowe, zbudowane na potrzeby badań. Dokładnie scharakteryzował wykorzystane elementy systemu do wyważania obiektów wirujących. Opisał także autorską aplikację służącą do sterowania stanowiskiem testowym oraz akwizycji danych, składającą się z trzech podrzędnych programów: FPGA, modułu czasu rzeczywistego oraz graficznego interfejsu użytkownika.

W dalszej części rozdziału drugiego przedstawił znane z literatury metody przetwarzania sygnałów, nazywane analizą rzędów (wykorzystujące FFT), służące do diagnozowania niewyważania wirników. Opisał użyteczność tych metod w celu analizy danych zarejestrowanych przez system wyważania, zaprezentował sposób przejścia z dziedziny czasu do dziedziny kąta, porównał transformatę Fouriera dla sygnału w dziedzinie czasu oraz kąta, wykazując jednocześnie, w jaki sposób sygnał pierwszego rzędu odzwierciedla rzeczywiste niewyważenie wirnika. Następnie przedstawił metody prezentacji danych na wykresach Bodego i Nyquista oraz opisał możliwości ich wykorzystania do wyznaczania poziomu i kąta niewyważenia wirnika.

Scharakteryzował również problem montażu masy korekcyjnej w wirniku, służącej do przeciwdziałania niewyważeniu, oraz zaprezentował różne rozwiązania tego problemu, skupiając się na sytuacji, w której w wirniku dostępna jest ograniczona liczba lokalizacji kątowych, w których można zainstalować ograniczoną liczbę kombinacji mas. Do rozwiązania problemu znalezienia odpowiedniej lokalizacji, Doktorant przedstawił kilka metod optymalizacyjnych. W poprawionej wersji rozprawy rozbudował rozdział opisujący autorską modyfikację optymalizacyjnego algorytmu genetycznego metodą ewolucji różnicowej (zmodyfikowany algorytm oznaczano w pracy skrótem MDE, a pierwotną jego wersję DE). Do dalszych analiz Doktorat wybrał ostatecznie metody: przeszukiwania przedziałów (brute force) oraz genetycznego algorytmu ewolucji różnicowej (MDE). Oba algorytmy zaimplementował z wykorzystaniem LabView Global Optimization Software i porównał w aspekcie czasu optymalizacji i skuteczności wyboru lokalizacji miejsc montażu mas korekcyjnych. Porównał wyniki optymalizacji wykorzystującej standardowy algorytm genetyczny metodą ewolucji różnicowej (DE) oraz jego wersji zmodyfikowanej (MDE). Następnie przedstawił opis aplikacji komputerowej służącej do analizy sygnałów zarejestrowanych w trakcie pracy wirnika, na podstawie których określana jest faza oraz poziom niewyważenia wirnika. Rozdział drugi kończy – dodany w poprawionej wersji – rozdział, w którym szczegółowo opisał procedurę wyważania prowadzącą do osiągnięcia optymalnych rozkładów mas korekcyjnych.

W rozdziale 3 Doktorant opisał dwie powszechnie znane i stosowane metody wyważania jednopłaszczyznowego – metodę wektorową oraz metodę czterech uruchomień. Przedstawił zależności matematyczne oraz opisał aplikacje komputerowe, wykorzystujące wspomniane metody, służące do określania masy korekcyjnych i ich rozłożenia. Rezultaty działania obu aplikacji przedstawił szczegółowo w tabelach 5 – 7 oraz porównał i skomentował.

W kolejnym rozdziale Doktorant opisał znaną metodę współczynników wpływu służącą do wyważania wielopłaszczyznowego, będącą rozszerzeniem metody wektorowej, uogólniającym na wiele płaszczyzn korekcji. Przedstawił algorytm postępowania podczas wyważania tą metodą. Scharakteryzował autorską aplikację komputerową (Multi Plane Balancing Software Tool), służącą do wyznaczania obciążenia równoważącego w sześciu płaszczyznach, oraz zbudowane przez siebie stanowisko badawcze, składające się ze stalowego wirnika (stalowego wału wraz z zamontowanymi czterema stalowymi kołami). Następnie wykorzystując to stanowisko w trzech konfiguracjach, Doktorant zaproponował serię analiz skuteczności wyważania w 13 scenariuszach (dla różnych prędkości obrotowych, mas dostępnych odważników wyważających itp.). Pierwsza konfiguracja stanowiska badawczego służyła do wyważania w czterech płaszczyznach, z których każda płaszczyzna miała dedykowaną sondę zbliżeniową. Druga konfiguracja służyła do wyważania w dwóch płaszczyznach z dwoma czujnikami zbliżeniowymi. Natomiast trzecia konfiguracja przeznaczona była do wyważania w dwóch płaszczyznach (w każdej zamontowano sondę zbliżeniową). Szczegółowe wyniki przeprowadzonych badań Doktorant przedstawił w tabelach i na wykresach na str. 111 – 150 rozprawy i skomentował. Uważam, że badania przeprowadzone zostały poprawnie i wymagały bardzo dużej wiedzy inżynierskiej, a uzyskane efekty są zadawalające.

Pracę kończą wnioski, w których Doktorant napisał, że przygotowane stanowisko zostało wykorzystane do badań certyfikacyjnych turbowentylatorowego silnika odrzutowego w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa. Doktorant wymienił zrealizowane w pracy zadania, uzasadnił innowacyjność swoich prac i przedstawił plany na przyszłe badania. Część wniosków jest płytka, a niektóre zbyt bezkrytyczne np. "zaproponowany system można wykorzystać do wyważania wirnika praktycznie (...) w każdej możliwej do wyobrażenia sytuacji (...)".

Uwagi krytyczne i pytania dodatkowe

1. W rozdziałach merytorycznych pracy brakuje informacji na temat ewentualnej nieliniowości układu, która ma istotny wpływ na skuteczność opisanych metod. W przypadku metody współczynników wpływu zakłada się, że odpowiedź układu w każdej płaszczyźnie pomiarowej jest związana zależnością liniową z wymuszeniem zadanym w płaszczyznach korekcji. Czy Doktorant analizował możliwość występowania nieliniowości układu oraz elementów konstrukcyjnych?
2. Czy Doktorant – pisząc o możliwości wykorzystania opracowanych przez siebie technik do wyważania obiektów wirujących w łożyskach własnych – brał pod uwagę możliwość występowania anizotropii zewnętrznej sztywności układu?
3. Na str. 34 i 38 założono, że w trakcie rozpędzania wirnika prędkość obrotowa podczas jednego obrotu jest stała, krótko wyjaśniając, że zmiana prędkości obrotowej jest nieistotna. Czy Doktorant mógłby odnieść się do tej kwestii i uzasadnić możliwość zastosowania tego założenia?
4. Jaki typ sprzęgła znajduje się w badanym stanowisku i jak przenoszony jest napęd? Jaki może być udział tych elementów w uzyskanych wynikach niewyważenia?
5. Na rysunku 23 (podobnie na niektórych innych wykresach) zauważyć można, że dla niskich prędkości obrotowych, amplituda drgań maleje mimo wzrostu prędkości i jest najniższa w

momencie gwałtownej zmiany kąta fazowego na ujemny. Jak Doktorant to wyjaśni? Zazwyczaj początkowo amplituda drgań rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, a kąt fazowy zmienia się przy prędkości krytycznej, dla której drgania są największe.

6. Na str. 111 – 150 Doktorant w tabelach i na wykresach przedstawił wyniki przeprowadzonych badań dla kilku scenariuszy, w których zaplanował wyważanie dla prędkości 2500 obr./min lub 3000 obr./min. Proszę o uzasadnienie wyboru tych prędkości obrotowych. Jakie będą prędkości obrotowe układów, do których jest przeznaczony zaprojektowany system?
7. Dlaczego zakres badanych prędkości obrotowych w większości przypadków wynosi od 1100 obr./min do 3000 obr./min? W szczególności, dlaczego brakuje początkowej części charakterystyki? Takie podejście może sprawić, że pominięta zostanie prędkość krytyczna.
8. Czy do określenia rozłożenia masy wyważającej jest potrzebna optymalizacja? Czy Doktorant rozpatrywał możliwość wyznaczania jej położenia na podstawie zależności fizycznych i rachunku wektorowego?
9. Dlaczego w rozprawie nie przedstawiono funkcji celu oraz ograniczeń optymalizacyjnych?
10. Dlaczego jako metodę optymalizacyjną wybrano zmodyfikowany algorytm ewolucji różnicowej?
11. Czy Doktorant mógłby wyjaśnić różnice w wynikach optymalizacji uzyskanych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego metodą ewolucji różnicowej (DE) oraz jego wersji zmodyfikowanej (MDE), wyjaśniając jednocześnie czym różnią się od siebie obie metody?
12. W przypadku wyznaczania niewyważania za pomocą czujników zbliżeniowych, często zachodzi konieczność uwzględnienia nierówności materiału oraz drgań przenoszonych przez elementy konstrukcyjne podtrzymujące czujniki, ponieważ mogą one powodować błędy w pomiarach. Doktorant w swojej pracy o tym nie wspomina. Czy Doktorant wziął pod uwagę te czynniki? Czy potrafi ocenić ich wpływ na uzyskane przez siebie wyniki?
13. Co oznaczają podkreślenia wyników w niektórych tabelach (np. tab. 5 – 7)?
14. Na str. 47 pracy jest napisane, że techniki deterministyczne np. metody gradientowe służą do znajdowania optimum globalnego. To jest nieprawda.
15. W wielu miejscach w pracy znaleźć można niepoprawnie oznaczane jednostki będące miarą niewyważenia – zamiast [g·mm] w pracy regularnie powtarza się zapis [g-mm] (np. tab. 1).
16. Na rysunkach 41 – 66, przedstawiających wykresy, oś rzędnych jest niepodpisana, znajdują się na niej tylko jednostki ([μm]).
17. Odwołanie do niektórych rysunków występuje dopiero po rysunku (np. rys. 1), do rysunku 24 nie ma w ogóle odwołania, a na str. 67 jest odwołanie do rysunku 38, który znajduje się dopiero na str. 97.
18. Legenda na niektórych rysunkach jest nieczytelna, np. rys. 41 (a na niektórych podobnych wyraźna np. 65).

Ponadto w pracy można znaleźć kilka drobnych błędów językowych, które nie mają istotnego wpływu na ogólną pozytywną ocenę stylu pracy i zastosowanego piśmiennictwa.

Ocena merytoryczna rozprawy

W przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej, mgr inż. Łukasz Kędziński podjął się rozwiązania zadania istotnego i złożonego od strony naukowej, związanego z dyscypliną naukową *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*. **Założone cele pracy zostały osiągnięte, a postawiona teza udowodniona** na drodze przeprowadzonych symulacji eksperymentalnych obejmujących analizę poziomu niewyważania badanych obiektów oraz jego położenia kontowego, a także wyważanie z wykorzystaniem autorskiego systemu wspomagającego rozłożenie mas korekcyjnych.

W porównaniu do pierwotnej wersji rozprawy – w której doktorant wskazywał jako osiągnięcie naukowe opracowanie metod wyważania jedno- i wielopłaszczyznowego, nie wskazując jednocześnie żadnych różnic w stosunku do metod znanych z literatury – poprawiona wersja nie zawiera już informacji o nowatorskich metodach wyważania, ale została rozszerzona o elementy projektowe i wdrożeniowe. Doktorant dodał również opis szeregu eksperymentów, wykazując skuteczność i wysoką jakość zaprojektowanego przez siebie systemu do wyważania. W nowej wersji pracy znaleźć można również modyfikację metody służącej do optymalizacji rozkładu mas korygujących.

Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych w rozprawie należy zaliczyć zaprojektowanie i zbudowanie kompletnego systemu, tj. stanowiska oraz grupy aplikacji komputerowych: *Aplikacji Sterowania Stanowiskiem Testowym, Aplikacji Analizy Rzędów, Aplikacji Wyważania Jednopłaszczyznowego* oraz *Aplikacji Wyważania Wielopłaszczyznowego*, służącego do estymacji wartości i kąta niewyważania w trakcie pracy badanego obiektu w dwóch wariantach:

- a) jednopłaszczyznowym – wykorzystującym metodę wektorową oraz czterech uruchomień,
- b) wielopłaszczyznowym (do sześciu płaszczyzn) – wykorzystującym metodę współczynników wpływu.

Wniosek końcowy

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Kędzińskiego dotyczy ważnego i aktualnego zagadnienia, mieszczącego się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz **spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym** (Dz.U. 2018 poz. 1668 z póź. zm.), w związku z tym **wniosuję o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Kędzińskiego do publicznej obrony**.

dr hab. inż. Leszek Kasprzyk, prof. PP