

Gliwice, 27.04.2023 r.

dr hab. inż. Dariusz Grabowski, prof. PŚ

Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki i Informatyki
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Rotating objects balancing based on signal amplitude and phase analysis

Autor: mgr inż. Łukasz Kędzierski

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Siwek, profesor uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Radosław Roszczyk

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 27 marca 2023 r., zgodnie z Uchwałą nr 408/II/2022 r. Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 20 września 2022 r. w sprawie uzupełnienia lub poprawienia rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Łukasza Kędzierskiego.

I Ocena ogólna pracy

Niniejsza recenzja zawiera punkty wynikające z zaleceń dla recenzentów rozpraw doktorskich dla Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 3 marca 2020 r.

- 1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?**

Rozprawa dotyczy zagadnienia wyważania wirników poprzez wprowadzenie mas korekcyjnych, których celem jest zmniejszenie drgań i hałasu podczas pracy maszyn. Celem



rozprawy było „opracowanie i wdrożenie oryginalnego rozwiązania projektowego problemu niewyważenia maszyny wirującej, które doprowadzi do opracowania systemu pozwalającego na ulepszenie procedury wyważenia obiektu wirującego w łożyskach własnych maszyny” (org. „The goal of this dissertation is to develop and to deploy an original project solution to the rotating machinery unbalance problem, resulting in a system capable of performing the enhanced rotor balancing in the machine’s own bearings”). Cel został jasno sformułowany i określa oryginalne rozwiązanie problemu wyważania obiektu wirującego w oparciu o opracowanie projektowe i konstrukcyjne.

Zastrzeżeń nie budzi również teza rozprawy, która została zdefiniowana następująco: „System oparty na oryginalnym projekcie autora, wykorzystujący techniki ograniczenia wpływu zakłóceń elektromagnetycznych, weryfikację odpowiedzi modalnej uchwytów czujników, kalibrację i dostrojenie czujników, bezdotykowe metody wyważania oraz algorytm optymalizacyjny do określenia rozkładu mas korekcyjnych umożliwia poprawę wyników wyważania obiektów wirujących na podstawie predykcji kąta niewyważenia w trakcie tylko pojedynczego uruchomienia” (org. „A system based on author’s original project, which uses electromagnetic interference mitigation techniques, probes’ brackets modal response checks, probes calibration and adjustment, non-contact balancing methods and optimization algorithm for balance weights distribution is capable of providing enhanced rotor balancing results, comparing to existing solutions, while predicting the angle of the unbalance using just a single balancing run.”).

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

Bibliografia rozprawy obejmuje 87 pozycji, w tym 1 pozycję, której współautorem jest Autor rozprawy (Kędzierski, Ł., Sikorski, R.: *Rotating machinery single plane balancing non-contact method*. Przegląd Elektrotechniczny, vol. 96, no. 4, pp. 162–167, 2020).

Rozprawa zawiera rozdział 1.4 zatytułowany *Literature overview*, w którym dokonano w bardzo syntetyczny sposób przeglądu literatury i podsumowano stan wiedzy w zakresie wyważania obiektów wirujących. W rozdziale tym Autor powołuje się na 31 pozycji literatury z lat 1928-2021, w tym normy dotyczące wyważania obiektów wirujących, a także pozycje przeglądowe, które podsumowywały wyniki badań do roku 1991, 1998 oraz 2019. Wśród 31 pozycji uwzględnionych w rozdziale *Literature overview* znajduje się 11 pozycji zawierających rys historyczny oraz wyniki badań opublikowanych przed 2000 r. oraz 7 pozycji zawierających najnowsze wyniki opublikowane po 2015 r., w tym odnoszące się do zastosowań w przemyśle.



Przegląd literatury można uznać za wystarczający, ale nie pozbawiony uchybień. Jednym z problemów rozważanych w rozprawie jest automatyczne rozłożenie wyznaczonej masy korekcyjnej w dostępnych lokalizacjach kątowych w sposób minimalizujący różnicę między uzyskanym rozkładem, a obliczoną całkowitą masą korekcyjną. W bibliografii ograniczono się do zacytowania kilku pozycji z zakresu ogólnie pojętej optymalizacji, natomiast brak jest pozycji dotyczących definicji i rozwiązania samego problemu optymalizacyjnego postawionego w rozprawie. Wyniki badań w tym zakresie można znaleźć między innymi w:

- Messenger, T., Pyrz, M.: *Discrete optimization of rigid rotor balancing*. Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 27, pp. 2231–2236, 2013.
- Singh, P., Chaudhary, H.: *Optimum two-plane balancing of rigid rotor using discrete optimization algorithm*. World Journal of Engineering, vol. 16, no. 1, pp. 138-146, 2019.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienie, czy używał właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są zasadne?

Autor rozprawy rozwiązał postawione zagadnienie, które zgodnie z przyjętym celem pracy polegało na opracowaniu i wdrożeniu oryginalnego systemu pozwalającego na wyważenie maszyny wirującej. System składa się ze stanowiska badawczego oraz zestawu programów w środowisku LabView, pozwalających na akwizycję danych z wykorzystaniem kart pomiarowych i czujników zbliżeniowych, a także zawierających implementacje algorytmów wyważania na podstawie amplitudy oraz fazy sygnału pierwszego rzędu zarejestrowanego przez czujniki.

Metody zastosowane przez Autora są poprawne i szeroko stosowane do rozwiązania problemu wyważania obiektów wirujących. Wśród nich można wymienić techniki wyważania jednopłaszczyznowego (metoda wektorowa oraz metoda czterech uruchomień) oraz wielopłaszczyznowego (metoda współczynników wpływu).

W rozprawie poprawnie założono, że wyważanie powinno być przeprowadzane dla prędkości krytycznej, o ile znajduje się ona w zakresie pracy wyważanego obiektu. Ponadto przyjęto, że:

- drgania mierzone w płaszczyznach pomiarowych są liniowo zależne od niewyważenia,
- niewyważenie zmienia się znacznie wolniej od okresu obrotu (układ quasi-statyczny),
- wyważany obiekt jest ciałem sztywnym.

Są to standardowe założenia przyjmowane również w pracach innych autorów.



4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu wyważania obiektów wirujących przy użyciu zaprojektowanego i skonstruowanego dedykowanego systemu sprzętowego wraz z oprogramowaniem. Zbudowane stanowisko badawcze wykorzystuje najnowsze technologie. Cechami wyróżniającymi zaproponowane rozwiązanie są czas i dokładność wyważania oraz brak konieczności demontażu wału wirującego w celu przeprowadzenia procedury wyważania, co jest szczególnie istotne w przypadku bardzo dużych urządzeń.

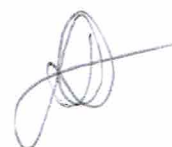
W ramach rozprawy zaimplementowano trzy, znane z literatury, metody wyważania obiektów wirujących:

- wektorową metodę wyważania jednopłaszczyznowego (ang. *vector method*),
- metodę wyważania jednopłaszczyznowego opartą o cztery cykle pomiarowe (ang. *four runs method*),
- metodę wyważania wielopłaszczyznowego opartą o współczynniki wpływu (ang. *influence coefficient method*).

Rozprawa zawiera wnioski dotyczące praktycznych aspektów zastosowania tych metod oraz zastosowania zmodyfikowanej procedury optymalizacyjnej zaproponowanej w pracy. Uwzględnienie tych wniosków pozwala na poprawę wyników procesu wyważania. Wnioski w odniesieniu do wymienionych powyżej metod wyważania w zasadzie pokrywają się z zaleceniami przedstawianymi we wcześniejszych pracach innych autorów, w tym również w pracach cytowanych w rozprawie. Nie umniejsza to znaczenia rozprawy jako oryginalnego rozwiązania problemu wyważania obiektów wirujących.

Samodzielny i oryginalny dorobek Autora obejmuje opracowanie programów komputerowych stanowiących implementacje wymienionych powyżej metod, a także szczegółową analizę wyników wyważania uzyskanych z wykorzystaniem opracowanego i zbudowanego stanowiska laboratoryjnego. Ponadto rozprawa zawiera kompletną procedurę wyważania prowadzącą do osiągnięcia optymalnych wyników wyważania z wykorzystaniem opracowanego stanowiska.

Wkładem własnym Autora w zakresie zastosowanych metod jest propozycja oraz implementacja zmodyfikowanego algorytmu optymalizacji MDE (Modified Differential Evolution) do określenia optymalnego doboru położenia i wielkości mas korekcyjnych. Algorytm pozwolił na poprawę średniego błędów wyważania przy zachowaniu w przybliżeniu tego samego czasu obliczeń.



5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Sposób przedstawienia uzyskanych wyników nie budzi zastrzeżeń. Przeprowadzone eksperymenty zostały dobrze zaplanowane oraz opisane w przekonujący i bardzo przejrzysty sposób. Wyniki zostały podane zarówno w formie tabelarycznej, jak i w postaci wykresów. Struktura pracy jest poprawna, a nieliczne uchybienia redakcyjne zostały przedstawione w dalszej części recenzji.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Doktorant zaprojektował i zrealizował stanowisko badawcze, które ma duże znaczenie i jest obecnie wykorzystywane w praktyce pozwalając na rozwiązanie rzeczywistego i trudnego problemu technicznego jakim jest wyważanie obiektów wirujących o dużych rozmiarach. W przyszłości stanowisko może być wykorzystane do modyfikacji istniejących lub opracowania nowych metod wyważania obiektów wirujących.

II Ocena szczegółowa pracy

1. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

- 1.1. Wibracje mogą wynikać nie tylko z niewyważenia. W jaki sposób uniknąć wyważania wirnika w przypadku, gdy wibracje mają inną przyczynę? Czy oprogramowanie nie powinno zawierać odpowiedniego zabezpieczenia przed próbą wyważenia w takim przypadku?
- 1.2. W rozprawie wyciągnięto wniosek o negatywnym wpływie zbyt małej lub zbyt dużej wartości masy korekcyjnej na uzyskane wyniki. Czy można podać ogólne zasady doboru tej masy i przybliżony przedział, w którym powinna zawierać się jej wartość w zależności od wyważanego obiektu?
- 1.3. Jak słusznie zauważa Autor (rozdział 2.4) pomiar wibracji może być zrealizowany z wykorzystaniem czujników do pomiaru przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia. Jakie problemy mogą wystąpić w przypadku numerycznego wyznaczania dowolnego z tych sygnałów na podstawie pomiarów wykonanych przy



użyciu czujnika jednego z pozostałych sygnałów (np. wyznaczenie przyspieszenia na podstawie pomiarów przemieszczenia)?

- 1.4. Od czego zależy i ile wynosi minimalna dopuszczalna częstotliwość próbkowania sygnałów w zaprojektowanym stanowisku?
- 1.5. Jak został obliczony błąd amplitudy i fazy w Tabeli 2?
- 1.6. W Tabeli 4 przedstawiono porównanie wyników standardowego algorytmu DE z zaproponowanym zmodyfikowanym algorytmem MDE stosując jako wskaźnik średni błąd bezwzględny („mean result”). Jak wygląda to porównanie w przypadku najlepszego uzyskanego wyniku („best result”) i jakie z tego wynikają wnioski? Według jakiej zależności obliczany był błąd?

2. Uwagi o charakterze redakcyjnym

2.1. Rozprawa napisana jest w języku angielskim. Jakość językową pracy oceniam bardzo wysoko. Niemniej jednak w poprawionej pracy nadal występują błędy językowe:

- „... Ali, Al-Tee and Al-Sarraj [10] who **has** simplified ...” (str. 11),
- “... the amplitude-only methods **has** been discussed ...” (str. 11),
- “The goal is to distribute the mass of the rotor **is** such a way that ...” (str. 18),
- “The structure of the software has been shown **on the** Figure 10” (str. 30),
- “This type of signal is called a chirp and **it’s** frequency response calculated using FFT is not a single peak ...” (str. 35),
- “the unbalance as a single **heave** spot in the rotor.” (str. 38),
- “... only around 60ms **od** data is displayed ...” (str. 40),
- “Example of a polar plot can be seen **on** figure 19 ...” (str. 42),
- “... and **obiously** is not the best solution ...” (str. 47),
- “... base run data **has** been analyzed ...” (str. 66),
- “... are presented in flow chart form **on the** Figure 35.” (str. 98),
- “... is shown **on the** Figure 39.” (str. 98),
- “... presented on the Figure 68;” (str. 156).



- 2.2. W rozprawie w przeważającej liczbie przypadków nie zastosowano spacji pomiędzy wartością liczbową a jednostką, np. „**2800rpm**, power **1.5kW**;” (str. 20).
- 2.3. Zgodnie z informacją podaną na str. 31 jedną z cech stworzonego oprogramowania jest monitoring własny, obejmujący między innymi „generating and monitoring of the **heart beat signal**”.
- 2.4. Nie przyjęto jednolitego formatowania pozycji bibliografii. Ponadto w wielu pozycjach podano niepełne informacje, np. brak numerów stron [2], [37], [55], [56], [61], [65], [82] itd., brak daty dostępu w przypadku pozycji internetowych [79] i [83]. W skrajnym przypadku ograniczono się do podania autorów, tytułu i roku wydania, co utrudnia identyfikację źródła, np. [45].

III Podsumowanie i wniosek końcowy

Poprawiona i rozszerzona rozprawa doktorska zawiera prawidłowo sformułowany cel i tezę oraz spełnia kryteria ustawowe stawiane pracom doktorskim. Zdefiniowany przez Autora cel został zrealizowany, teza udowodniona, a praca stanowi przykład opracowania i wdrożenia oryginalnego rozwiązania projektowego. Poprawność uzyskiwanych wyników została potwierdzona badaniami na rzeczywistych urządzeniach, w tym turbinach odrzutowych silników samolotowych o dużej mocy i rozmiarach.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji poprawiona rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Kędzińskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim wynikających z artykułu 187 ust. 1 i ust.2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.).

Dariusz Grabowski