

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Politechnika Rzeszowska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Kędzierskiego pt.: „Rotating Objects Balancing on Signal Amplitude and Phase Analysis”

Opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej w Warszawie z dnia 24.05.2022r.

oraz na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej reprezentowaną przez Przewodniczącego prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 20.09.2022r. w sprawie sporządzenia recenzji poprawionej rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Kędzierskiego.

Tematyka rozprawy

Przedłożona do recenzji poprawiona wersja rozprawy doktorskiej poświęcona jest zagadnieniom związanym ze wyważaniem obiektów wirujących na podstawie analizy amplitudowo-fazowej. W tym kontekście podjęte przez Doktoranta badania doskonale wpisują się w najnowsze trendy dotyczące technologii pracujących w lotnictwie.

W zmodyfikowanej rozprawie Doktorant główny nacisk położył na stwierdzenie, że osiągnięciem jest opracowanie systemu służącego do wyważania mas wirujących. Rozprawa w aktualnej formie zawiera zarówno aspekt naukowy jak i technologiczny, co w pierwotnej wersji mogło nie być jasne.

Przyczyną wibracji obiektów wirujących może być niewspółosiowość wału, luzy mechaniczne, niewyważenie wirnika oraz szereg innych niedoskonałości maszyny. Z wyżej wymienionych, najczęściej występującą przyczyną jest niewyważenie wirnika. Biorąc pod uwagę stale rosnącą liczbę maszyn napędzanych silnikami w przemyśle oraz ciągle przesuwaną granicę maksymalnej prędkości obrotowej, wyważanie obiektów wirujących w dokładny i niezawodny sposób jest niezbędne. Zlekceważenie niewyważenia wirnika może prowadzić do znacznego skrócenia żywotności podzespołów takich jak łożyska, przekładnie oraz sprzęgła, a w skrajnych przypadkach nawet do całkowitego zniszczenia maszyny. Metody wyważania obiektów wirujących mają na celu stłumienie wibracji wynikających z niewyważenia wirnika do akceptowalnego poziomu. Całkowita eliminacja tego typu wibracji nie jest możliwa z powodu niejednorodnej gęstości materiału, z którego wykonany jest wirnik, ubytku materiału w trakcie pracy maszyny, niedoskonałości produkcji maszyny oraz wielu innych. Największa amplituda wibracji obiektu wirującego występuje, gdy obraca się on z charakterystyczną dla niego prędkością krytyczną (rezonans), dlatego nawet wyważony wirnik nie powinien pracować przy

tej prędkości. Rozprawa doktorska będąca przedmiotem tego autoreferatu opisuje w jaki sposób można wykorzystać prędkość krytyczną do przeprowadzenia niezawodnego wyważania.

Większość metod wyważania wymaga demontażu wirnika z maszyny, a następnie jego instalacji w dedykowanej wyważarce. W przypadkach, gdy demontaż wirnika nie jest możliwy z powodu konstrukcji maszyny, konieczne jest przeprowadzenie wyważania w łożyskach własnych urządzenia. Metody wyważania zaproponowane przez autora mogą być zastosowane w każdym z opisywanych przypadków, ponadto do ich poprawnej implementacji można wykorzystać odpowiedni rodzaj czujników mierzących wibracje, takich jak akcelerometry (pomiar przyspieszenia) lub czujniki zbliżenia (pomiar odległości od obracającego się wału). Gdy do pomiaru wibracji wykorzystane są czujniki zbliżenia, takie jak na przykład czujniki wiropędowe, metody wyważania stają się metodami bezkontaktowymi.

Celem pracy było zaprojektowanie kompleksowego systemu umożliwiającego pomiary i transmisję wspomnianych wielkości oraz opracowanie aplikacji komputerowych wykorzystujących narzędzia z dziedziny przetwarzania sygnałów do analizy uzyskanych danych pomiarowych. Wynikiem przeprowadzonej analizy jest estymacja wielkości oraz kąta masy korekcyjnej służącej do jak największego stłumienia wibracji wywołanych niewyważeniem.

Teza pracy została sformułowana następująco:

System oparty na oryginalnym projekcie autora, w którym zastosowano techniki redukcji zakłóceń elektromagnetycznych, sprawdzanie odpowiedzi modalnej wsporników sond, kalibrację sond i regulację, bezkontaktowe metody wyważania oraz algorytm optymalizacji rozkładu ciężaru wyważania, jest w stanie zapewnić lepsze wyniki wyważania wirnika, w porównaniu do istniejących rozwiązań, przewidując kąt niewyważenia przy użyciu tylko jednego przebiegu wyważania.

Badania te zostały zrealizowane zarówno metodami obliczeniowymi jak i doświadczalnymi. Na podstawie tak określonego celu i zakresu pracy uważam że podjęte przez Doktoranta kwestie są aktualne. Realizowane badania umożliwiają opracowanie nowych rozwiązań, które w przyszłości mogą znaleźć zastosowanie praktyczne w różnych maszynach wirnikowych, stosowanych nie tylko w lotnictwie ale również w motoryzacji czy energetyce. Dlatego uważam że wybrana tematyka badań oraz sformułowany cel prac jest oryginalny pod względem poznawczym i odpowiada poziomowi pracy doktorskiej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Ogólnie omówienie rozprawy

Wraz z załącznikami i zestawieniem literatury poprawiona praca liczy 165 stron i jest podzielona na 6 rozdziałów. Doktorant dodał szereg akapitów rozszerzających treść i znacznie uściślających zrealizowaną tematykę. Na początku zamieszczono streszczenie rozprawy

doktorskiej. Treść pracy rozpoczyna się od przedstawienie motywacji do podjęcia badań w temacie wyważania obiektów wirujących oraz sformułowania celu i tezy rozprawy. Następnie dokonał kompleksowego przeglądu literatury (opis kilkudziesięciu książek oraz artykułów - przedział czasowy lat 50' XX wieku do dnia dzisiejszego, ze szczególnym skupieniem na najnowszych badaniach w dziedzinie - w temacie metod wyważania obiektów wirujących. W kolejnych rozdziałach dokonał opisu metod oraz narzędzi.

Autor przedstawił czym jest niewyważenie rotora oraz jakie są najczęstsze sposoby radzenia sobie z tym problemem, opisał stanowiska testowe zaprojektowane oraz zbudowane na potrzeby badań.

Rozprawa została w istotny sposób rozszerzona o szczegółowe przedstawienie stanowiska testowego, które zostało wykonane w trakcie realizacji pracy wraz z omówieniem problematyki przesyłania sygnałów pochodzących z czujników do komputera z uwzględnieniem redukcji zakłóceń elektromagnetycznych.

Doktorant zamieścił dodatkowo opis kompletnej procedury wyważania prowadzącej do osiągnięcia optymalnych wyników wyważania. Opis tej procedury może być bardzo istotny dla osób prowadzących podobne badania związane z wyważaniem. Osoby takie korzystając z zawartych tu instrukcji i podpowiedzi mogą uzyskiwać lepsze wyniki wyważania w swoich rozwiązaniach.

W części opisowej rozprawy zawartej w rozdziale 2 znajdują się:

- przedstawienie czym jest niewyważenie rotora oraz jakie są najczęstsze sposoby radzenia sobie z tym problemem,
- opis stanowiska testowego zaprojektowanego oraz zbudowanego na potrzeby badań; w trakcie prac nad rozprawą powstały kompleksowe narzędzia, zarówno sprzętowe jak i programistyczne, służące do wyważania obiektów wirujących; narzędzia, o których mowa są obecnie w ofercie Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa i odnoszą komercyjny sukces,
- opis aplikacji służącej do sterowania stanowiskiem testowym oraz do akwizycji danych; aplikacja, o której mowa składa się z trzech mniejszych aplikacji: aplikacji FPGA, aplikacji RT (obsługiwanej przez deterministyczny system czasu rzeczywistego) oraz aplikacji HMI (graficzny interfejs użytkownika); pokazany został szczegółowy schemat blokowy wszystkich aplikacji oraz sposób w jaki wymieniają one między sobą dane,
- przedstawienie metody z dziedziny przetwarzania sygnałów nazywanej analizą rzędów; opis użyteczności metody przy analizie danych zarejestrowanych przez system wyważania; zaprezentowanie sposobu przejścia z dziedziny czasu do dziedziny kąta w trakcie analizy danych; porównanie transformat Fouriera dla sygnału w dziedzinie czasu oraz dla sygnału w dziedzinie kąta; wprowadzenie pojęcia rzędów i pokazanie w jaki sposób sygnał pierwszego rzędu jest związany z niewyważeniem wirnika,

- porównanie dwóch sposobów przedstawienia fazy sygnału pierwszego rzędu (opóźnienie oraz wyprzedzenie fazowe) oraz wpływu wyboru jednej z tych konwencji na proces wyważania,
- przedstawienie sposobu prezentacji danych (w formie sygnału pierwszego rzędu) na wykresach Bodego oraz polarnych; opis użyteczności obu rodzajów wykresów w trakcie analizy sygnałów pod kątem estymacji kąta niewyważenia wirnika,
- opis problemu montażu obliczonej masy korekcyjnej (mającej na celu przeciwdziałanie niewyważeniu) w wirniku; zaprezentowanie różnych rozwiązań tego problemu, przy szczególnym skupieniu się na sytuacji, w której w wirniku dostępna jest ograniczona liczba kątowych lokalizacji, w których można zainstalować ograniczoną liczbę kombinacji mas w postaci śrub oraz podkładek; przedstawienie podejścia siłowego (*brute force*) oraz zoptymalizowanego (wybrany został genetyczny algorytm ewolucji różnicowej) do rozwiązania problemu; porównanie wyników osiągniętych przez oba algorytmy,
- opis napisanej na potrzeby badań aplikacji komputerowej służącej do analizy sygnałów zarejestrowanych przez system akwizycji danych w trakcie pracy wirnika; analiza prowadzona za pomocą aplikacji w znacznym stopniu ułatwia określenie fazy oraz poziomu niewyważenia wirnika,
- nowością jest rozdział opisujący opracowany przez Doktoranta algorytm optymalizacji MDE (modified differential evolution); algorytm ten jest co prawda niewielką modyfikacją znanego algorytmu optymalizacji DE (differential evolution), natomiast pozwala uzyskać dużo lepsze wyniki wyważania; Dyplomant dodał tabele z analizą porównawczą stosowanych algorytmów optymalizacji.

Rozdział trzeci zawiera przedstawienie metod wyważania jednopłaszczyznowego:

- przedstawienie metody wektorowej: prezentacja kroków metody; opis podstaw matematycznych estymacji wielkości oraz kąta masy korekcyjnej; prezentacja aplikacji komputerowej realizującej obliczenia za pomocą metody wektorowej,
- przedstawienie metody czterech wirowań: prezentacja kroków metody; przedstawienie graficznego podejścia do określenia kąta masy korekcyjnej; opis podstaw matematycznych estymacji wielkości oraz kąta masy korekcyjnej; prezentacja aplikacji komputerowej realizującej obliczenia za pomocą metody czterech wirowań,
- porównanie wyników wyważania takich samych wirników za pomocą metody wektorowej oraz metody czterech wirowań.

W rozdziale czwartym zawarto metody wyważania wielopłaszczyznowego:

- opis podstaw metody współczynników wpływu służącej do wyważania wielopłaszczyznowego,
- prezentację kroków metody; przedstawienie kroków metody w formie schematu blokowego; opis wpływu liczby płaszczyzn wyważania na liczbę kroków metody,

- opis różnych konfiguracji stanowiska testowego wykorzystanych do badania różnych scenariuszy wyważania wielopłaszczyznowego,
- opis podstaw matematycznych estymacji wielkości oraz kąta masy korekcyjnej; prezentacja obliczeń wektorowych w formie graficznej,
- prezentację aplikacji komputerowej realizującej obliczenia za pomocą metody współczynników wpływu,
- przedstawienie wyników przeprowadzonych badań oraz płynących z nich wniosków.

Rozdział piąty jest podsumowaniem rozprawy i zawiera:

- przedstawienie zadań (w formie listy) zrealizowanych w trakcie prac nad rozprawą,
- przedstawienie innowacyjnych osiągnięć (w formie listy) zrealizowanych w trakcie prac nad rozprawą,
- przedstawienie pomysłów (w formie listy) na dalsze badania w temacie opisanym w rozprawie.

Na końcu rozprawy przedstawiono wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz, omówiono nowe elementy rozprawy oraz wskazano kierunki dalszych badań.

Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej tworzą logiczną całość, a struktura pracy ułatwia czytelnikowi zapoznanie się z jej kolejnymi rozdziałami. Cała praca jest napisana w jasny dla czytelnika sposób, przy użyciu dobrze dobranego słownictwa technicznego. Pełne zrozumienie treści pracy ułatwia też bogata szata graficzna, składająca się z wielu schematów tabel czy wykresów. W rozprawie dodano fotografie zaprojektowanego i zbudowanego stanowiska pomiarowego oraz badanych urządzeń.

Podczas czytania natknąłem się na kilka drobnych usterek edytorskich i terminologicznych, które w żaden sposób nie umniejszają wartości merytorycznych rozprawy.

Ocena merytoryczna rozprawy

Doktorant na początku rozprawy wprowadza czytelnika w tematykę pracy oraz omawia wyzwania stojące przed badaczami i praktykami zajmującymi się zastosowaniem technologii w lotnictwie. Cytowana literatura została właściwie dobrana i obejmuje zarówno publikacje wydane we wiodących międzynarodowych czasopismach naukowych, czasopismach polskich, materiałach z konferencji międzynarodowych jak i monografie. Zestawienie literatury jest aktualne i uwzględnia również publikacje z ostatnich pięciu lat.

Przedstawiona praca prezentuje rozwiązanie pozwalające na pomiar drgań wirującego wału wykorzystujące bezkontaktowe czujniki zbliżeniowe. Sposób ten w przeciwieństwie do rozwiązań powszechnie stosowanych nie wymaga demontażu urządzenia i nie ingeruje w nie w sposób mechaniczny. Ponadto opisana metoda pozwala na wykonanie wstępnej korekcji już przy pierwszym obrocie wyważanego elementu, co pozwala na skrócenie czasu wyważania

oraz minimalizuje możliwość uszkodzenia wyważanego obiektu. Aktualnie wykorzystywane urządzenia wyważające zwykle nie posiadają takich możliwości.

Opracowany system do wyważania ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Wyważanie jest procedurą bardzo często spotykaną od zastosowań w skali mikro (małe obiekty wirujące – wirniki mikromaszyn) do skali makro (np. olbrzymie turbiny silników odrzutowych). W rozprawie znalazł się nowy fragment opisujący zastosowanie opracowanego systemu do wyważania istniejących, dużych obiektów wirujących.

Algorytmy oraz metody pomiarowe zaproponowane przez Doktoranta pozwalają na wprowadzenie nowoczesnego i oryginalnego sposobu rozwiązywania ważnego z punktu widzenia nauk inżynierjno-technicznych, problemu wyważania obiektów wirujących.

W wyniku prac nad tematem rozprawy opracowano następujące wnioski:

- wyważanie na podstawie zaproponowanej metody zawsze skutkuje ograniczeniem wibracji związanych z niewyważeniem (najgorszy osiągnięty wynik to zmniejszenie poziomu wibracji o 65%, co i tak pozwoliło na osiągnięcie zadowalającego rezultatu wyważania),
- ilość wirowań niezbędnych do wykonania wyważania jest zależna od ilości płaszczyzn wyważania n i jest równa $n+1$,
- zazwyczaj tylko jedna iteracja metody jest wystarczająca do osiągnięcia zadowalającego rezultatu wyważania – podczas testowania metody średni wynik pierwszej iteracji to zmniejszenie poziomu wibracji o 77%,
- średni wynik wyważania składającego się z dwóch iteracji metody, to zmniejszenie poziomu wibracji o 84% w odniesieniu do bazowej odpowiedzi układu oraz zmniejszenie poziomu wibracji o 31% w odniesieniu do odpowiedzi układu po pierwszej iteracji metody,
- przeprowadzenie drugiej iteracji metody jest zawsze zalecane – nawet jeśli odpowiedź układu ulegnie pogorszeniu, zawsze można powrócić do poprzedniej konfiguracji,
- im lepszy wynik wyważania (zmniejszenie poziomu wibracji w większym stopniu) tym szybciej odpowiedź układu zaczyna rosnać dla prędkości obrotowych powyżej prędkości, dla której prowadzone było wyważanie – wynika z tego ważny wniosek, mówiący iż system nigdy nie powinien pracować z prędkością większą niż prędkość wyważania,
- im mniejsza ilość płaszczyzn wyważania tym lepsze rezultaty,
- bezpośredni pomiar wibracji płaszczyzn wyważania pozwala na osiągnięcie lepszych jego rezultatów niż w sytuacji, gdy pomiar wibracji odbywa się w innych lokalizacjach wzdłuż osi wirnika,
- wielkość mas kalibracyjnych ma olbrzymi wpływ na rezultat wyważania – zazwyczaj im mniejsza prędkość wyważania tym większa powinna być masa kalibracyjna,

- najlepsze rezultaty wyważania osiągnano, gdy zainstalowana masa kalibracyjna powodowała znaczną zmianę odpowiedzi układu,
- w przypadku wykorzystania zbyt małej masy kalibracyjnej, finalnie obliczona masa korekcyjna może być przewymiarowana i w skrajnych przypadkach prowadzić nawet do pogorszenia odpowiedzi układu,
- masy kalibracyjne powinny być zawsze instalowane w lokalizacji kątowej wynikającej z analizy niewyważenia na wykresie polarnym – w ten sposób osiąga się nie tylko lepsze rezultaty wyważania, ale także upewnia się, że masa kalibracyjna spowoduje zmniejszenie odpowiedzi układu, a co za tym idzie ograniczona zostanie szansa uszkodzenia wirnika.

Na tle aktualnego stanu wiedzy Doktorant sformułował cel pracy, którym jak już wcześniej wspomniano, było wykonanie badań oraz opracowanie i zbudowanie kompletnego systemu wraz z aplikacją komputerową pozwalającą na rozwiązanie ważnego problemu wyważania obiektów wirujących. Zastosowane narzędzia oraz algorytmy z dziedziny przetwarzania sygnałów w połączeniu z bezdotykowymi czujnikami rejestrującymi wibrację powstałe w trakcie pracy obiektów wirujących pozwoliły na zrealizowanie założonego celu w innowacyjny sposób zmieniający punkt widzenia na pomiary tego typu.

Za najbardziej istotne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie autorskiej metody wyważania w łożyskach własnych maszyny dla zdefiniowanego zakresu prędkości obrotowych,
- opracowanie metody pozwalającej na wyważanie w dowolnych warunkach z wykorzystaniem wyłącznie bezkontaktowych czujników,
- predykcja kąta niewyważenia już w trakcie bazowego wirowania stanowiska,
- zaproponowanie i realizacja metody optymalnego rozłożenia dostępnych konfiguracji mas korekcyjnych w dostępnych lokalizacjach kątowych wirnika.

Po poprawie rozprawy należy wymienić dodane osiągnięcia:

- zbudowanie stanowiska do analizy modalnej,
- opracowanie kompletnej procedury wyważania,
- zaproponowanie i użycie nowego algorytmu optymalizacji MDE.

Wymienione osiągnięcia w sposób istotny potwierdzają wkład naukowy i technologiczny Doktoranta w rozwój Dyscypliny naukowej oraz poprzez zaprojektowanie stanowiska pomiarowego i kompletnej procedury wyważania stanowią oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

Lista potencjalnych uwag krytycznych

Lektura rozprawy doktorskiej skłoniła mnie do sformułowania kilku uwag krytycznych, które wymagają wyjaśnień Doktoranta.

1. Dlaczego do rozwiązania problemu optymalizacji został wybrany algorytm ewolucji różnicowej? Dostępnych jest wiele algorytmów, które mogą dać potencjalnie lepsze wyniki.
2. Z opisu stanowiska testowego wynika, że w układzie obecny jest przemiennik częstotliwości służący do sterowania prędkością obrotową silnika. Czy zostały zastosowane środki mające na celu ograniczenia wpływu zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez przemiennik częstotliwości na analogowe sygnały wibracji rejestrowane przez system akwizycji danych? Jeśli tak, to jakie?
3. Czy zostały wykorzystane środki mające zapobiegać przesłuchom między kanałami (pomiaru wibracji wykonywane przez czujniki zbliżenia) w trakcie wyważania wielopłaszczyznowego, gdy wykorzystywane jest kilka kanałów pomiarowych?
4. Pomiar wibracji wirnika realizowany jest za pomocą czujników zbliżenia - czy wpływ nierówności powierzchni wirnika na sygnał wibracji został wzięty pod uwagę?
5. Czujniki zbliżenia zostały zamontowane na wspornikach – czy wpływ wibracji samych wsporników, a także ich ewentualny rezonans, jest rekompensowany?
6. W opisie stanowiska testowego mowa jest o dwóch rodzajach wałów – jednym wykonanym ze stali oraz jednym wykonanym z aluminium. Jaki był cel stosowania wałów wykonanych z różnych materiałów?
7. Na prezentowanych wykresach z wyników badań nie ma pokazanych prędkości wirnika zaczynających się od zera. Czym jest to spowodowane?
8. Dlaczego nie zostały wykonane obliczenia symulacyjne 3D drgań przy użyciu np. programu Ansys.

Należy podkreślić, że Doktorant w rozprawie doktorskiej wykazał, że posiadał wiedzę i umiejętności samodzielnej pracy naukowej wymagane na tym stopniu rozwoju naukowca. Poprzez zaproponowanie i opracowanie nowych metod oraz ich przetestowanie Autor wniósł istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej, co jest podstawą do wystąpienia o stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne. W mojej ocenie przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i zastosowanie wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, co wyczerpuje wymagania stawiane przez właściwą Ustawę. Uważam, że cele założone w pracy zostały spełnione a teza potwierdzona.

Sformułowane w recenzji uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie umniejszają w żaden sposób wysokiej wartości recenzowanej rozprawy.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr inż. Łukasza Kędzierskiego pt. „*Rotating Objects Balancing on Signal Amplitude and Phase Analysis*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) oraz w art. 14 ust. 2 pkt. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (D. U. z 2017 r. poz 1789). Wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Damien Metiv