

Warszawa, 12.05.2023 r.

Dr hab. inż. Józef Zawora  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Warszawska

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Olko pt.: „*Wpływ parametrów procesu wyważania wolnoobrotowego na dokładność wyznaczania niewyważenia resztkowego wybranych elementów wirujących silnika lotniczego*”**

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Kawalec, promotorka pomocnicza: dr inż. Anna Bazan, opiekun z Pratt & Whitney Rzeszów S.A.: dr inż. Krzysztof Raga.

Podstawa opracowania: pismo nr RM-530-06-02/2022 z dnia 30 listopada 2022 r.  
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz

### 1. Ocena aktualności tematyki rozprawy

Dokładność wyznaczania niewyważenia resztkowego elementów wirujących silników lotniczych jest bardzo ważnym zagadnieniem technicznym decydującym o jakości pracy silników. Zbyt duże niewyważenie resztkowe wszelkich elementów wirujących maszyn, zwłaszcza wirujących z dużymi prędkościami obrotowymi w istotnym stopniu wpływa na intensywność drgań tych elementów, zespołów w skład, których wchodzi oraz całych maszyn wirnikowych. Typowym przykładem są m.in. wirniki przepływowych silników lotniczych. Poziom drgań tych elementów jest bezpośrednio związany z niezawodnością i bezpieczeństwem pracy silnika lotniczego oraz całego statku powietrznego, na którym jest on zamontowany. Jest to główny powód zakwalifikowania do 1. klasy w przepisach lotniczych wszelkich działań związanych z kształtowaniem i modyfikacją elementów wirujących silnika lotniczego w odniesieniu do warunków wyważania tych elementów.

Wirniki silników lotniczych muszą więc być dokładnie sprawdzane m.in. pod kątem wielkości niewyważenia resztkowego i występujących drgań. Niewyważenie resztkowe i drgania tych wirników muszą być dokładnie zmierzone. Nadmierne niewyważenie musi być zredukowane do poziomu dopuszczalnego poprzez zastosowanie odpowiednich procesów technologicznych, polegających na usunięciu masy, dodaniu lub przesunięciu w wyznaczonym miejscu. Zarówno masa, jak i jej położenie określone są w procedurze wyważania. Wyważanie prowadzone jest w jednej płaszczyźnie korekcyjnej (np. w przypadku wąskich elementów wirujących, tarcz, pierścieni, itp.) lub w dwóch płaszczyznach korekcyjnych (np. w przypadku wirników o cechach wirników sztywnych). Celem jest to, aby niewyważenie resztkowe nie było większe od niewyważenia dopuszczalnego. Jednymi

z koniecznych warunków, aby ten cel, tj. zapewnienie warunku, że niewyważenie resztkowe nie przewyższało niewyważenia dopuszczalnego, regularnie osiągać jest to, aby zarówno używane wyważarki podkrytyczne i nadkrytyczne, jak i ich oprzyrządowanie przeznaczone dla przemysłu lotniczego, a także stosowane procedury wyważania spełniały wysokie wymagania, określone w przepisach i rekomendowanych praktykach lotniczych. Tematyka przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej dotyczy właśnie tego, bardzo istotnego zagadnienia określenia warunków oraz sposobów ich spełnienia, dotyczących zapewnienia odpowiedniej dokładności i powtarzalności pomiarów niewyważenia resztkowego elementów wirujących silnika lotniczego.

Powyższe uwarunkowania potwierdzają zarówno **aktualność**, jak i **bardzo istotne znaczenie** – ze względu na **niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji** maszyn wirnikowych, w tym m. in. silników lotniczych – identyfikacji zasadniczych parametrów wyważania elementów wirujących oraz właściwego doboru parametrów wyważania, stanowiących zasadniczą część recenzowanej pracy doktorskiej. **Uważam, że w zakresie bardzo dużego znaczenia i aktualności wyważania elementów wirujących, w szczególności wirujących elementów silników lotniczych oraz stale zwiększanych wymagań dotyczących dopuszczalnego niewyważenia resztkowego tych elementów, podjęta w dysertacji tematyka badań, skupiona na dokładności i powtarzalności procesu wyważania wolnoobrotowego oraz wpływających na nie czynników, jest w pełni uzasadniona, a prowadzone w tym obszarze badania naukowe są bardzo cenne zarówno z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.**

## **2. Zakres i charakterystyka oraz ocena poziomu naukowego rozprawy**

Rozprawa doktorska przedstawiona do recenzji składa się ze strony tytułowej, spisu treści (3 strony), wykazu ważniejszych oznaczeń (2 strony), 7 numerowanych rozdziałów (191 stron), wykazu cytowanej bibliografii (11 stron), 5 załączników oznaczonych, od A do E (43 strony), spisu rysunków (12 stron), spisu tablic (4 strony), streszczenia w języku polskim (2 strony) i angielskim (2 strony) oraz dokumentu wydanego przez dyrektora Zakładu Kół Zębatych Pratt & Whitney Rzeszów S.A., potwierdzającego wdrożenie wyników badań w ww. firmie (1 strona). Cała dysertacja liczy 265 stron.

We **wprowadzeniu** Autor dysertacji w zwięzłej formie odnosi się do zagadnienia roli wyważania w wytwarzaniu i eksploatacji elementów maszyn na przestrzeni wielu lat rozwoju techniki. Podkreśla m. in. bardzo dużą rolę wyważania elementów obrotowych nowoczesnych napędów lotniczych. Analizę obecnego stanu wiedzy z zakresu wyważania wirników sztywnych oraz istotę i znaczenie wyważania wolnoobrotowego Autor przedstawia w **rozdziale 2**. Charakteryzuje tam również wymagania dotyczące wyważania, metody korekcji niewyważenia i procesy wyważania. Zwraca uwagę na błędy wyważania i metody sprawdzania wyważarek. Analizuje warunki i ograniczenia, które mogą wystąpić w przypadku wyważania elementów konstrukcji maszyn w procesie ich wytwarzania. **Uważam, że wymienione w bibliografii publikacje, do których Autor odwołuje się w całej rozprawie, a w szczególności w rozdziale poświęconym analizie stanu wiedzy w zakresie tematów poruszonych w rozprawie, są dobrane i cytowane prawidłowo.**

Autor formułuje konkluzje, wynikające zarówno z przeglądu opublikowanego stanu wiedzy oraz analizy rozwoju procesów produkcji napędów lotniczych, z których jednoznacznie wynika celowość realizacji badań, których podjął się przy realizacji pracy doktorskiej. **Bardzo trafnie identyfikuje problem badawczy** pisząc, że „... *analiza dostępnych publikacji wskazuje na ważne czynniki procesu wyważania, których wpływ na dokładność*

*i powtarzalność wyników wyważania nie został w ogóle opisany lub nie został w wystarczającym stopniu wyjaśniony”.*

Analiza stanu wiedzy na podstawie dostępnych publikacji książkowych, artykułów naukowych i licznych norm jest wykonana bardzo wnikliwie. Autor z należytą uwagą odnosi się do prawie każdej cytowanej w rozprawie pozycji literatury. **Świadczy to o Jego dużej wiedzy, doświadczeniu i dobrym przygotowaniu merytorycznym do rozwiązywania złożonych problemów technicznych i naukowych.**

W **rozdziale 3** Autor przedstawia cel, hipotezę i zakres realizowanej pracy. Cel pracy został skupiony głównie na:

1. określeniu istotnych parametrów procesu wyważania wolnoobrotowego oraz ich wpływu na dokładność wyznaczania niewyważenia resztkowego wybranych elementów wirujących silnika lotniczego;
2. opracowaniu wytycznych i procedur wyważania wolnoobrotowego, które pozwolą wyznaczyć niewyważenie resztkowe elementów wirujących z możliwie najmniejszym błędem systematycznym i możliwie największą powtarzalnością oraz w ograniczonym czasie;
3. wykonaniu badań wybranych typów wyważarek pod kątem porównania, uzyskiwanych z ich pomocą, wyników pomiarów niewyważenia elementów konstrukcyjnych wirujących części silników lotniczych.

Sformułowana hipoteza pracy wskazuje parametry, co do których istnieje przypuszczenie, że mogą one w największym stopniu wpływać na dokładność wyznaczania niewyważenia resztkowego oraz wskazuje na potencjalną możliwość opracowania wytycznych i procedur wyważania, dzięki którym można wyznaczyć niewyważenie resztkowe wybranych elementów wirujących silnika lotniczego w ograniczonym czasie z najmniejszym błędem systematycznym i największą powtarzalnością spośród wartości osiąganych dla danej pary wirnik-wyważarka.

**Uważam, że przyjęty cel pracy i sformułowana hipoteza właściwie identyfikują zagadnienie naukowe i kierunki badań.** Potwierdzają to m.in. wnioski z analizy literatury oraz opisane w dalszej części rozprawy wyniki badań wstępnych. Przedstawiony w 10 punktach **zakres pracy został prawidłowo zdefiniowany.** Ponadto, przedstawione w 2 punktach **badawcze aspekty pracy oraz w 4 punktach jej aspekty aplikacyjne są prawidłowo sformułowane. Podział badań na etap badań wstępnych i etap badań zasadniczych jest logiczny i związany z założonym planem realizacji zadań pracy doktorskiej.** Zadania te dotyczą głównych zagadnień, które powinny być rozwiązane przy realizacji pracy doktorskiej.

W **rozdziale 4** rozprawy Autor przedstawia metodykę badań, plan badań, stanowisko badawcze oraz wirniki przewidziane do użycia w badaniach zasadniczych. W **rozdziale 5** opisuje badania wstępne, obejmujące m. in. opracowane modele matematyczne obracającego się wirnika. Modele te umożliwiają bliższe poznanie procesu wyważania i czynników mogących wpływać na przemieszczenia elementów wirnika w ruchu drgającym, wywołanym obracającymi się wokół osi siłami odśrodkowymi niewyważenia resztkowego, w celu oszacowania, w drodze symulacyjnych obliczeń numerycznych, spodziewanych przemieszczeń. **Moim zdaniem, przedstawione modele matematyczne, analityczne i numeryczne, są prawidłowo opracowane a ich wyniki właściwie przeanalizowane. Są one pomocne na etapie badań wstępnych, poprzedzających badania eksperymentalne.** Na etapie badań wstępnych Autor analizuje również wyniki wykonanych przez siebie badań eksperymentalnych, które pozwalają wskazać na te czynniki, które należy zbadać i przeanalizować w ramach badań zasadniczych, gdyż mogą mieć istotne znaczenie w dążeniu do uzyskania możliwie najlepszej dokładności i powtarzalności wyważania wybranych elementów wirujących silnika w ograniczonym czasie wyważania. **Treść również tej części rozprawy**

**potwierdza właściwe, metodyczne podejście Autora do wykonania podjętych badań i analizy uzyskanych wyników pomiarów.**

W **rozdziale 6** Autor opisuje badania zasadnicze, uzyskane w nich wyniki oraz płynące z nich szczegółowe wnioski. Badania te koncentrują się na zagadnieniach powtarzalności i dokładności wyważania oraz zidentyfikowanych na etapie badań wstępnych czynnikach, wpływających na ww. powtarzalność i dokładność wyważania. Przedstawia 9 najważniejszych zadań badawczych. Do oceny wyników wyważania Autor stosuje m.in. testy weryfikacyjne, dotyczące osiągalnego właściwego niewyważenia resztkowego  $e_{mar}$  oraz wskaźnika zmniejszenia niewyważenia URR, według normy SAE AS8617. Przedstawione w podrozdziale 6.11 wnioski z badań zasadniczych są w pełni uzasadnione wynikami badań eksperymentalnych. **Ten etap pracy, tj. badania zasadnicze, oceniam wysoko, za rzetelnie wykonane badania, wnikliwą analizę wyników oraz zidentyfikowanie czynników, które w największym stopniu wpływają na powtarzalność i dokładność wyważania, a także za opracowanie:**

- **wdrożonych do praktyki przemysłowej wytycznych i procedur wyważania wolnoobrotowego wybranych elementów wirujących silnika lotniczego oraz wyznaczania niewyważenia resztkowego;**
- **programów numerycznych, ułatwiających analizę danych eksperymentalnych oraz taką ich reprezentację graficzną, która ułatwia analizę wyników pomiarów niewyważenia resztkowego.**

W **rozdziale 7** Autor przedstawia podsumowanie wykonanych badań i ich najważniejszych wyników oraz wynikające z nich wnioski ogólne, a także wskazuje na elementy oryginalne rozprawy. Ponadto podaje w nim możliwe kierunki dalszych badań. Główne wnioski dotyczą opracowanego w podrozdziale 5.2 modelu matematycznego ruchu wirnika sztywnego o zadanych cechach geometrycznych i masowych oraz parametrów procesu wyważania, w tym m.in. konfiguracji wymiarowej, czyli układu, położenia i odległości płaszczyzn wyważania względem badanego elementu konstrukcyjnego. Wnioski te dotyczą także opracowanych w wyniku badań rekomendacji, dotyczących procedur wyważania elementów wirujących silników lotniczych oraz zalecanych wartości parametrów procesowych.

**Za bardzo cenne uważam wskazanie przez Autora, w wyniku wykonanych badań, kolejności parametrów uwzględniającej istotność ich wpływu na dokładność wyznaczania niewyważenia resztkowego. Podzielim pogląd Autora, że założony cel pracy został osiągnięty a słuszność hipotezy została udowodniona. Uwzględniając przyjęty zakres badań można jednoznacznie stwierdzić, że rozprawa jest kompletna. Nie zamyka to jednak potrzeby dalszych badań w omawianym obszarze, których kierunki wskazał Autor w podrozdziale 7.4 rozprawy.**

W dalszej części rozprawy znajduje się **bibliografia, załączniki A-E**, zawierające materiały pomocnicze opracowane podczas realizacji badań, a także wykazy rysunków i tabel. Bibliografia liczy 180 pozycji (polskich i zagranicznych), w tym dane 2 artykułów, których współautorem jest Autor rozprawy (pozycje [15] i [180]) opublikowane w czasopiśmie, które znajduje się na aktualnej liście czasopism Ministerstwa Edukacji i Nauki, którym przyznano 140 pkt. Cytowane pozycje bibliografii to w zdecydowanej większości artykuły w periodykach naukowych wydanych po 2010 r. oraz obowiązujące normy (polskie i międzynarodowe), dotyczące zagadnień wyważania.

Informacje zawarte w załącznikach są cenne, gdyż zawierają opisy opracowanych w ramach pracy doktorskiej programów numerycznych, porównanie oprzyrządowania do wyważania elementów silników lotniczych i procedury kalibracji. Na końcowych stronach rozprawy umieszczone są streszczenia w językach polskim i angielskim oraz zaświadczenie wydane przez dyrektora Zakładu Kół Zębatych Pratt & Whitney Rzeszów S.A.,

potwierdzające wdrożenie w ww. firmie wyników badań Autora, wykonanych w ramach pracy doktorskiej.

Rozprawa zawiera 143 rysunki i 57 tabel w części zasadniczej, obejmującej rozdziały od 1 do 7 oraz 27 rysunków i 3 tabele w załącznikach.

### 3. Elementy oryginalne oraz ogólna ocena poziomu naukowego rozprawy

Za najważniejsze elementy oryginalne rozprawy uważam:

1. Opracowanie modelu procesu wyważania jednopłaszczyznowego, jako szczególnego przypadku wyważania, wystarczającego do korekcji niewyważenia wirnika sztywnego w formie (kształcie) wąskiej wirującej tarczy.
2. Opracowanie modelu matematycznego przemieszczeń poprzecznych w ruchu obrotowym wirnika sztywnego, podpartego w dwóch łożyskach, z niewyważeniem w dwóch tarczach wirnika.
3. Badania niewyważenia wybranej części pierścieniowej silnika lotniczego.
4. Opracowanie procedur obliczeń i programów do:
  - a. wyznaczania liczbowej wartości wskaźnika zmniejszenia niewyważenia URR, z prezentacją wyników w formie współrzędnych na końcach wektorów;
  - b. przetwarzania danych i generowania wykresów niewyważenia w układzie biegunowym;
  - c. oceny powtarzalności niewyważenia.
5. Wskazanie, wraz z uzasadnieniem popartym wynikami badań, prawidłowego, ze względu na dokładność wyważania, położenia płaszczyzn wyważania w przypadku zastosowania podpór łożyskowych z rolkami przestawionymi.

Rozprawa zawiera zarówno elementy poznawcze, jak i aplikacyjne. Do elementów poznawczych o charakterze naukowym można zaliczyć opracowanie autorskich modeli, opisanych w ww. punktach 1, 2 i 5 oraz wnioski wynikające z ich zastosowania. Elementy oryginalne, opisane w ww. punktach 3 i 4 mają cechy zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne. Na szczególne uznanie zasługuje wdrożenie wyników badań do praktyki przemysłowej, co zostało potwierdzone odpowiednim dokumentem, zamieszczonym na końcu rozprawy. Uważam, że warto tu wspomnieć i złożyć serdeczne podziękowania na ręce Przedstawiciela firmy Pratt & Whitney **Władzom Firmy** za udostępnienie urządzeń oraz umożliwienie przeprowadzenia badań naukowych Autorowi pracy doktorskiej na obiektach przemysłowych, co w znacznym stopniu podnosi wartość i znaczenie tej pracy.

### 4. Ocena opracowania redakcyjnego rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska opracowana jest bardzo starannie. Ma przejrzystą strukturę. Język pracy jest jasny. Odwołania do wzorów matematycznych, rysunków i tabel oraz różnych części pracy są prawidłowe. W wielu miejscach podawane są odwołania także do numerów odpowiednich stron rozprawy. Rysunki są wyraźne. Zarówno wzory matematyczne, rysunki jak i tabele opracowane są bardzo starannie. Cechy te powodują, że rozprawę, zawierającą dużą ilość informacji, dobrze się czyta analiza jej struktury nie nastęrcza żadnych problemów. Również bogaty wykaz cytowanej bibliografii opracowany jest bardzo starannie.

Na szczególne uznanie zasługuje fakt, że Autor uwzględniając w swoim opisie badań, a zwłaszcza we wnioskach różne czynniki i ich wpływ na dokładność oraz powtarzalność wyważania, odwołuje się za każdym razem do odpowiednich wartości liczbowych, tabel

i wykresów, zawartych w różnych częściach rozprawy. Wskazuje to na duży wkład pracy oraz dużą rzetelność wykonanych analiz wyników badań.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne dotyczące rozprawy

Lektura rozprawy nasuwa kilka uwag i spostrzeżeń lub pytań, które podano poniżej.

1. Zbyt duże rysunki o numerach: 2.3; 2.15-2.17; 2.20-2.23; 2.26; 4.2; 4.4.
2. Zdecydowanie bardziej wskazane byłoby używanie słowa „norma” zamiast pochodzącego z języka angielskiego słowa „specyfikacja”, które pojawia się w kilku miejscach rozprawy. Podobnie, zamiast używanego czasem w rozprawie określenia „bieg pomiarowy” (stanowiącego zapewne odpowiednik angielskiego słowa „run”), powinien być używany zwrot „cykl pomiarowy lub przebieg pomiarów”.
3. Zgodnie z przyjętą w rozprawie zasadą zapisu liczb rzeczywistych w tabelach 5.2 i 5.4 powinny być użyte kropki a nie przecinki, jako separatory części całkowitej i dziesiętnej podawanych liczb.
4. Niektóre oznaczenia na rys. 5.14 są napisane zbyt małą czcionką.
5. Podobnie, trochę zbyt mała czcionka jest na rys. 6.6 i 6.7.
6. Skąd wynika rozbieżność dotycząca granic tolerancji dopuszczalnego niewyważenia dla określonego układu „wyważarka-przyrząd-wyważany wirnik” pomiędzy opisem badań szacowania powtarzalności, znajdującym się w podrozdziale 6.4.2 (dopuszczalne niewyważenie resztkowe 1 gmm) a informacją umieszczoną w podrozdziale 6.9.2 (dopuszczalne niewyważenie resztkowe 5 gmm)?
7. Analiza wykonanych badań rodzi także pytanie: dlaczego do badania wpływu smarowania wybrano olej o określonej lepkości, a nie o lepkości większej bądź mniejszej od podanej w rozprawie?. Należy przypuszczać, że Autor wybrał olej najlepszy i sprawdzony, stosowany w rozwiązaniach przemysłowych związanych z jego pracą, a reszta będzie badana w przyszłości.
8. W cytowanych wzorach: 2.22 i 2.23 brakuje znaków  $\pm$  na początku. Wzory te wyrażają granice błędów granicznych, w których mieści się wartość rzeczywista.

Wymienione wyżej uwagi oraz sformułowane pytania nie umniejszają ogólnej, wysokiej oceny poziomu merytorycznego, redakcyjnego i edycyjnego rozprawy.

## 6. Wnioski końcowe:

Mimo przedstawionych uwag i spostrzeżeń mogę stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Olko stanowi spójną, poprawną pod względem metodologii badań całość. **Praca ma charakter naukowo badawczy, zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny.** Jej tematyka jest aktualna i ważna – zawiera nowe, interesujące i ważne m.in. z punktu widzenia wytwarzania i eksploatacji silników lotniczych wyniki badań naukowych Autora. Rozprawa zawiera elementy oryginalne, stanowiące wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Posiada istotne zalety poznawcze i aplikacyjne. Jest opracowana bardzo starannie, zarówno pod względem merytorycznym jak i redakcyjnym.

Praca jest spójna i dobrze przemyślana pod względem merytorycznym. Autor wykazał się bardzo dobrą orientacją w obszarze prowadzonych badań naukowych oraz odpowiednio dużą wiedzą i umiejętnościami, niezbędnymi do ich rzetelnego prowadzenia.

Powyższe analizy i stwierdzenia pozwalają na sformułowanie wniosku, że **rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Olko pt. „Wpływ parametrów procesu wyważania wolnoobrotowego na dokładność wyznaczania niewyważenia resztkowego wybranych elementów wirujących silnika lotniczego”** spełnia wymagania ustawowe ubiegania się o stopień naukowy doktora nauk technicznych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Ponadto, w mojej ocenie, rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Olko zasługuje również na wyróżnienie. W związku z tym stawiam wniosek do Komisji Przewodu Doktorskiego o wyróżnienie tej pracy.

Biorąc pod uwagę przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską mgr. inż. Adama Olko pt. „Wpływ parametrów procesu wyważania wolnoobrotowego na dokładność wyznaczania niewyważenia resztkowego wybranych elementów wirujących silnika lotniczego” stwierdzam, że odpowiada ona wymogom określonym w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 16 marca 2021 r. poz. 478). Wnioskuje o podjęcie dalszej procedury w sprawie nadania mgr. inż. Adamowi Olko stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

*Janusz Zowara*