

prof. ndzw dr hab. inż. Andrzej GRZĄDZIELA  
Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów  
Wydział Mechaniczno - Elektryczny  
Akademia Marynarki Wojennej

Gdynia 30-01-2023 r.

## **OPINIA pracy doktorskiej**

**mgr inż. Adriana Trzeciaka**

p.t.

### **BADANIA PROCESU PULSACYJNEGO SPALANIA**

**Podstawa prawna oceny:** uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej z dnia 20 grudnia 2022.

#### **WPROWADZENIE**

W ostatnich latach coraz bardziej widoczny wydaje się rozwój technologii bezzałogowych statków powietrznych. Silniki pulsacyjne są trudne do zintegrowania z projektami samolotów załogowych ze względu na hałas i wibracje stąd ich obecnie potencjalne zastosowanie w tzw. dronach. Ponieważ strumienie impulsowe są wydajnym i prostym sposobem przekształcania paliwa w ciepło, w badaniach używane są różne rodzaje paliw począwszy od konwersji biomasowych paliw, przez naftę lotniczą na gazach kończąc.

Silniki pulsacyjne wyznaczają nowe podejście do analiz silników odrzutowych i pozwalają liczyć na wyższą oszczędność paliwa w porównaniu z silnikami turbowentylatorowymi, przynajmniej przy bardzo dużych prędkościach. Pratt & Whitney i General Electric wdrożyły aktywne programy badawcze nad tego typu silnikami. Należy zauważyć, że większość programów badawczych wykorzystuje silniki pulsacyjne do testowania pomysłów na wczesnym etapie projektowania. Obecnie Boeing ma zastrzeżoną technologię silników pulsacyjnych o nazwie Pulse Ejector Thrust Augmentor (PETA), która

proponuje wykorzystanie silników pulsacyjnych do pionowego podnoszenia w wojskowych i komercyjnych samolotach typu VTOL.

Aktualny konflikt zbrojny na Ukrainie potwierdził zasadność a nawet konieczność wykorzystania statków bezzałogowych w działaniach zbrojnych. W zakresie scenariuszy operacyjnych istnieje ich szerokie spektrum, które przewidują wykorzystanie szybkich bezzałogowych statków powietrznych zdalnie sterowanych lub autonomicznych. Zastosowanie silników pulsacyjnych jest jednym z alternatywnych źródeł napędów.

Przedstawione argumenty jednoznacznie wskazują na aktualność podjętego tematu pracy oraz możliwości utylitarnego wykorzystania jej rezultatów.

## **STRUKTURA PRACY**

Praca składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii tworzących razem logiczną całość zawartą na 155 stronach. Rozdział 1 jest wprowadzeniem, w którym Autor przedstawia podstawy działania silnika pulsacyjnego oraz wskazuje na motywację podjęcia tematu pracy.

W rozdziale 2 zaprezentowano krótki rys historyczny silników pulsacyjnych oraz dokonano analizy literaturowej. Prezentowane wyniki analiz bardzo dobrze korespondują z późniejszymi założeniami do badań własnych oraz zastosowanego modelu symulacyjnego, co znacząco poprawiło efektywność i celowość prowadzonych badań.

Rozdział 3 to syntetyczne zdefiniowanie tez rozprawy oraz charakterystyka struktury pracy.

W rozdziale 4 Autor prezentuje wyniki badań procesów zachodzących wewnątrz pulsacyjnej komory spalania. Przedstawiono opis badanego silnika oraz charakterystykę stanowiska badawczego. Przeprowadzono dyskusję nad przyjętymi rozwiązaniami i zdefiniowano parametry kontrolne. Precyzyjnie scharakteryzowano instalację paliwową oraz przyjęte rozwiązania i lokalizacje wtryskiwaczy. Ważnym elementem rozdziału jest analiza niepewności torów pomiarowych oraz ilościowy i jakościowy opis zjawisk cieplno-przepływowych występujących w komorze spalania. Rozdział zawiera również plan biernoczynnego eksperymentu badawczego wraz z komentarzami uzasadniającymi przyjętą metodykę. Prezentowane wyniki pomiarów parametrów kontrolnych mierzonych metodami bezpośrednimi i pośrednimi są uzupełnione obszernym komentarzem oraz dyskusją nad uzyskanymi wynikami. W podsumowaniu rozdziału przedstawiono zwięźle zakres zrealizowanych badań, uzyskane wyniki oraz przyjęte w pracy definicje pojęć „dawka”

i „współczynnik sprawności”. Rozdział zakończono charakterystyką wpływu wybranych parametrów pracy i konfiguracji wtryskiwaczy na efektywność energetyczną procesu wewnątrz komory.

Modelowanie spalania pulsacyjnego metodami CFD są zaprezentowane w rozdziale piątym. Autor przedstawia opis modelu numerycznego charakteryzując domenę obliczeń, warunki brzegowe i początkowe oraz przebieg symulacji wraz z przyjętym modelem turbulencji. W kolejnej części rozdziału przedstawione zostały wyniki prowadzonych symulacji w zakresie ciśnienia względnego, rozkładu temperatury, rozkładu wektorów prędkości gazów oraz przebiegu procesu spalania w kolejnych iteracjach czasowych. Przedstawiono tabelarycznie procentowy błąd wartości amplitud ciśnienia, amplitud ciągu i częstotliwości pomiędzy symulacjami i wynikami badań eksperymentalnych. W końcowej części rozdziału Autor zaprezentowano analizę krytyczną uzyskanych rezultatów wskazując na przyjęte uproszczenia oraz wskazano na zgodność efektów symulacji z przebiegiem eksperymentu badawczego.

Rozdział 6 przedstawia polemikę na uzyskanymi wynikami badań i symulacji. Autor wskazuje na potrzebę dalszych badań, szczególnie w aspekcie pomiaru składu spalin. W podrozdziale 6.2. przedstawiono dyskusję nad określeniem rzeczywistej sprawności termodynamicznej. Wskazano na wątpliwości przyjętych literaturowo modeli jako niepewnych w zastosowaniach praktycznych. W podsumowaniu rozdziału przeprowadzono dyskurs nad otrzymanymi wynikami eksperymentów i symulacji wskazując na te efekty, które można wykorzystać w dalszych badaniach jako przydatne i jednoznaczne. Autor wskazuje, że prędkość spalania w silniku pulsacyjnym jest mniejsza od prędkości dźwięku, co zaprzecza literaturowym teoriom o spalaniu w tempie prędkości fal akustycznych. Ponadto podkreśla, że procesy w komorze silnika pulsacyjnego można traktować jako wybuch cieplny wentylowany w komorze o stałej objętości.

Rozdział 7 przedstawia wnioski z pracy. Autor potwierdza poprawność przyjętych tez, wskazuje na rezultaty w zakresie definiowania sprawności oraz podkreśla, że jednym z efektów jest zakwestionowanie adekwatności modelu Lenoira dla silnika pulsacyjnego.

Bibliografia dysertacji zawiera 69 pozycji literaturowych, aktualnych i ściśle związanych z obszarem naukowym pracy oraz 11 pozycji internetowych.

## MOCNE STRONY PRACY

Praca jest napisana bardzo starannie oraz logicznie. Układ pracy jest spójny i konsekwentny a wprowadzenie w treść rozdziału 4 wszystkich tabel z wynikami pomiarów pozwala na bieżącą analizę rezultatów. Większość prezentowanych graficznie wyników badań jest wysokiej rozdzielczości i posiadają one czytelne opisy osi a podpisy pod rysunkami są wyczerpujące.

Struktura pracy na pierwszy rzut oka jest dość nietypowa gdyż Autor najpierw realizuje bierno-czynny eksperyment badawczy a następnie przystępuje do symulacji numerycznych. Analizując dostępną wiedzę literaturową, a właściwie jej ograniczony zakres, taki układ jednak wydaje się bardzo logicznym, gdyż umożliwia weryfikację wyników eksperymentów innych autorów, syntezę wyników badań własnych a następnie pozwala na właściwy dobór parametrów i warunków w symulacjach numerycznych.

W pracy widoczny jest precyzyjny i logiczny plan eksperymentów badawczych. Dobór aparatury pomiarowej, konfiguracje sprzętowe i wstępna analiza błędów są widoczne na każdym etapie pomiarów, symulacji i analiz. Takie podejście do badań redukuje możliwość powstania błędów grubych oraz uzyskania rezultatów wątpliwych badawczo. Ważnym elementem jest dyskusja nad wynikami badań eksperymentalnych oraz krytyczne podejście do wyników niejednoznacznych, co pozwala na ocenę wiarygodności rezultatów symulacji numerycznych. Przeprowadzone badania wymagały wielu przygotowań technicznych oraz organizacyjnych a także umiejętności wykorzystania szerokiego spektrum aparatury pomiarowej.

Badania symulacyjne zostały zaplanowane bardzo drobiazgowo i w pełni korespondują z celami i wynikami badań eksperymentalnych. Zastosowania metody CFD pokazało jej wysoką efektywność oraz możliwości wykorzystania w wielu aspektach symulacji parametrów gazodynamicznych, w tym szybkozmiennych.

Na szczególne znaczenie zasługuje ostrożność Autora w wyciąganiu zbyt pochopnych wniosków z rezultatów badań eksperymentalnych i wyników symulacji. Prowadzona krytyczna dyskusja oraz świadomość ograniczeń słusznie wskazują Autorowi potrzebę dalszych badań o szerszym zakresie.

## UWAGI KRYTYCZNE

Postęp w nauce jest wynikiem dyskusji i ścierania się odmiennych poglądów stąd też w każdej pracy dopatrzeć się można niedociągnięć czy dyskusyjnych założeń lub tez. W przypadku otrzymanej do recenzji rozprawy uwagi można podzielić na merytoryczne i redakcyjne.

Odnosnie uwag merytorycznych to wątpliwości budzi zdefiniowanie „współczynnika sprawności spalania” jako stosunku amplitudy ciśnienia względem dawki paliwa. Uważam, że bardziej poprawne byłoby użycie pojęcia „współczynnika efektywności spalania”. Sprawności z maszynach przepływowych w lotnictwie wskazują zawsze na relacje pomiędzy prędkością gazów wylotowych i prędkością ruchu obiektu. Przeprowadzone badania przypominają również typowe testy na uwięzi pędników okrętowych, dla których sprawność dla prędkości zerowej zawsze wynosi zero. Ponieważ jednak maszyna wywiera ciąg, który jest stale mierzony i jest to tylko jeden z parametrów określających energię użyteczną to pojęcie efektywności byłoby bardziej poprawne. Ponadto, Autor zauważył na początku dysertacji, że sprawność silnika pulsacyjnego silnie zależy od prędkości lotu obiektu.

Na stronie 49 Autor wskazuje, że częstotliwość pracy silnika wyznacza za pomocą FFT, i że do uzupełnienia brakujących próbek wprowadził zabieg „uzupełniania zerami”. Jest to procedura dopuszczalna jednak wprowadza drobne zniekształcenie obrazu zjawiska. Moim zdaniem znacznie efektywniejszym byłoby zastosowanie procedury Autotracking, w której sygnał synchronizujący pochodziłby z mikrofonu a sygnałami analizowanymi synchronicznie byłoby ciśnienie i drgania. Innym problemem, który sygnalizuje Autor, to określenie prędkości i wydatku spalin. Uważam, że można byłoby wykorzystać markery z opiłków twardych metali, które wprowadzone do kanału dolotowego pozwoliłyby określić rzeczywistą prędkość wylotu spalin przy zastosowaniu metody PIV. Należy zauważyć, że uwagi dotyczące zastosowania procedur PIV i Autotracking mają charakter dyskusyjny i mogą zostać wykorzystane w kolejnych badaniach Autora.

Uwagi redakcyjne należałoby rozpocząć od formy prezentowania wzorów, które Autor umieszcza w układzie dwukolumnowej tabeli. Wykorzystując narzędzie pakietu Word w formie wstawienia równania, wystarczy na jego końcu umieścić znak „#” oraz numer wzoru, co automatycznie wyjustuje formułę i wyrówna do prawej numer wzoru bez konieczności stosowania tabel. Niektóre rysunki posiadają oznaczenia w legendzie lub treści w języku

angielskim,, np. rys. 2.8, 2.9. czy 2.10. Należałoby wszystkie opisy osi i legend ujednolicić do języka polskiego, w jakim jest napisana praca.

Na stronie 30 Autor wskazuje, że wnioski końcowe są zawarte w rozdziale 8. Należy zwrócić uwagę, że dysertacja zawiera tylko siedem rozdziałów a jeżeli wspomina się o wnioskach końcowych to należałoby pokazać również wnioski początkowe. Wydaje się że wystarczyłoby napisać po prostu „wnioski”.

Na stronie 48 Autor wprowadza pojęcie „ilości cykli spalania”, wydaje się być bardziej poprawnie użycie formy „liczby cykli spalania”.

## **PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY**

Przedstawiona do recenzji praca **BADANIA PROCESU PULSACYJNEGO SPALANIA** niezależnie od przedstawionych uwag krytycznych i dyskusyjnych na pewno spełnia warunki stawiane pracom doktorskim, świadczy o dużym i profesjonalnym wkładzie Autora w planowanie, realizację eksperymentów badawczych, umiejętność realizacji i wnioskowania z badań walidacyjnych a także wykorzystania narzędzi symulacji numerycznych.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Adriana Trzeciaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z uwagi na ponad przeciętny zakres zrealizowanych badań, wnikliwe analizy oraz rzetelność badawczą stawiam wniosek o wyróżnienie dysertacji.

