

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Pawła Karpińskiego

### *Badanie procesu wtrysku w bezgłowicowym dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym*

Recenzję opracowano na podstawie pisma  
Z-cy Przewodniczącego ds. stopni naukowych  
Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Lubelskiej  
dr hab. inż. Jarosława Bieniasia  
Pismo z dnia 24.06.2022

## OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA I OCENA ROZPRAWY

Praca dotyczy oceny wpływu strategii wtrysku paliwa na proces roboczy bezgłowicowego dwusuwowego silnika o zapłonie samoczynnym. Praca ma charakter eksperymentalny i wykorzystano w niej konstrukcję silnika lotniczego opracowaną przez Politechnikę Lubelską wraz z firmą WSK „PZL-Kalisz” S.A. Celem poznawczym rozprawy jest analiza procesu roboczego eksperymentalnego silnika o zapłonie samoczynnym w przypadku wtrysku paliwa za pomocą pojedynczego wtryskiwacza lub pary wtryskiwaczy umieszczonych naprzeciwko siebie. Celem praktycznym rozprawy jest dobór liczby wtryskiwaczy wymaganej dla zapewnienia założonej mocy i największej sprawności ogólnej lotniczego bezgłowicowego silnika dwusuwowego o zapłonie samoczynnym.

Na przestrzeni 150 lat rozwoju tłokowych silników spalinowych zagadnienia dotyczące niezawodności silników są jednym z głównych celów działań konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych. Jednocześnie w lotnictwie dominuje dążenie do budowy jednostek o dużej koncentracji mocy. Aby to uzyskać w dziedzinie napędów lotniczych bardzo często sięgano po rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne nie spotykane w innych zastosowaniach silników tłokowych. Żaden inny obszar zastosowania silników tłokowych nie jest tak różnorodny i często niekonwencjonalny jak napędy lotnicze. Szczyt rozwoju tłokowych silników lotniczych to okres II Wojny Światowej. Alianci wygrali wojnę dzięki poświęceniu i determinacji społeczeństw wielu krajów, zaangażowaniu tysięcy inżynierów w tym inżynierów lotnictwa i uzyskaniu po 1940 roku przewagi konstrukcyjnej i technologicznej min w dziedzinie napędów lotniczych. Jeden z najlepszych samolotów myśliwskich Mustang to połączenie amerykańskiego płatowca i najlepszego silnika tłokowego w historii (na tamte czasy state-of-the-art) Rolls Royce Merlin. Obok powszechnie znanych i produkowanych seryjnie silników lotniczych wielocylindrowych w układzie rzędowym, widlastym czy gwiazdowym napędy lotnicze to również układ dwurzędowy, trójrzędowy, układ H, układ X, gwiazdowy wielopłaszczyznowy oraz zastosowany w eksperymentalnym silniku będącym obiektem badań omawianej rozprawy doktorskiej układ bezgłowicowy z tłokami przeciwbieżnymi. Przykładem takiej konstrukcji jest silnik

str. 1/6

J. Nowakowski

lotniczy o zapłonie samoczynnym Jumo 205. Silnik miał 6 cylindrów, 12 tłoków, 2 wały korbowe, układ doładowania sprężarką odśrodkową napędzaną mechanicznie, realizował cykl pracy dwusuwowy, układ paliwowy składał się z wielosekcyjnej pompy wtryskowej, olej napędowy był wtryskiwany do każdego cylindra przez 4 wtryskiwacze paliwa (układ wtryskowy to 24 wtryskiwacze hydrauliczne). Rodzina Jumo 205 to silniki 204, 206, 207, 208, produkowane i rozwijane w latach 1932 – 1945. Silniki rodziny Jumo 205 charakteryzowały się małym przelotowym zużyciem paliwa i były stosowane do napędu samolotów cywilnych i wojskowych firm Blohm & Voss, Dornier i Junkers. Najbardziej znanym był Dornier Do 18, pocztowa łódź latająca dalekiego zasięgu. W roku 1938 samolot ten ustanowił rekord przelotu bez lądowania przelatując odległość 8391 km z Wielkiej Brytanii do Brazylii w czasie 43 godzin. W zastosowaniu wojskowym olej napędowy jako paliwo charakteryzował się mniejszym niebezpieczeństwem gwałtownego pożaru płatowca w warunkach lotu bojowego. Lotnictwo cywilne, samoloty sportowe i turystyczne od 120 lat napędzane są głównie silnikami tłokowymi o zapłonie iskrowym. Dominują tu silniki o konwencjonalnym układzie konstrukcyjnym, zazwyczaj rzędowe lub płaskie w układzie bokser, chłodzone powietrzem, rzadziej cieczą, zasilane gaźnikowo a współczesne konstrukcje – wtryskowo, niedoładowane i doładowane. Poszukiwane są również nowe rozwiązania lub nowe aktualne zastosowania rozwiązań z czasów min II Wojny Światowej. Niekonwencjonalne układy konstrukcyjne w połączeniu z dostępnymi rozwiązaniami w zakresie sterowania i zasilania silnika w powietrze i paliwo oraz nowe technologie wytwarzania otwierają przed konstruktorami silników lotniczych nowe możliwości.

Podjęcie i kontynuowanie prac w zakresie niekonwencjonalnego bezgłowicowego silnika dwusuwowego o zapłonie samoczynnym do zastosowania w lotnictwie lub poza lotnictwem należy uznać za celowe i uzasadnione. Taki charakter i cel ma rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Karpińskiego. Spełnienie wymagań stawianych współczesnym napędom lotniczym może się odbywać na drodze badań doświadczalnych jak również badań symulacyjnych. Recenzowana praca jest przykładem pracy badawczej, do opracowania wyników badań zastosowano analizę statystyczną. Pracę wyróżnia obiekt badań – eksperymentalny silnik lotniczy, przygotowane stanowisko badawcze, postawione zadania badawcze, sposób opracowania wyników badań.

Praca doktorska mgr inż. Pawła Karpińskiego zawiera 157 strony maszynopisu, składa się z 7 rozdziałów, wykazu literatury, 122 rysunków zawartych w tekście, 22 tabel, wykazu skrótów i symboli oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Wykaz literatury wskazuje na bardzo dobrze przeprowadzoną przez Autora analizę stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki rozprawy.

W rozdziale pierwszym rozprawy (Stan wiedzy) Autor wskazuje, że bardzo ważnym elementem rozwoju techniki lotniczej jest konieczność poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych oferujących lepsze osiągi w porównaniu do istniejącej oferty rynkowej. Prowadzone są również badania nad rozwojem lub modyfikacją znanych konstrukcji pod kątem ograniczenia zużycia paliwa oraz minimalizacji negatywnego wpływu na otaczające nas środowisko. Lotnictwo jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną techniki, modyfikuje się istniejące już płatowce, a także wprowadza się do produkcji całkowicie nowe konstrukcje w tym nowe rozwiązania lotniczych zespołów napędowych. Rozdział Stan wiedzy obejmuje przegląd literatury w zakresie wpływu wtrysku paliwa na proces spalania w silniku o zaponie samoczynnym oraz badania procesu wtrysku i spalania w dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym z tłokami przeciwbieżnymi. W podsumowaniu rozdziału pierwszego autor

podkreśla, że podjęcie i kontynuowanie prac w zakresie niekonwencjonalnego bezgłowicowego silnika dwusuwowego o zapłonie samoczynnym do zastosowania w lotnictwie lub poza lotnictwem należy uznać za celowe i uzasadnione. Przeprowadzona analiza stanu wiedzy wykazała, że brak jest opracowań naukowych dotyczących badań eksperymentalnych wpływu procesu wtrysku paliwa i strategii wtrysku na proces roboczy dwusuwowego silnika o zapłonie samoczynnym z tłokami przeciwbieżnymi.

Rozdział drugi (Cel, tezy i zakres pracy) zawiera omówienie celu i zakresu pracy oraz planu i zakresu badań doświadczalnych. Celem poznawczym rozprawy jest analiza procesu roboczego eksperymentalnego silnika o zapłonie samoczynnym w przypadku wtrysku paliwa za pomocą pojedynczego wtryskiwacza lub pary wtryskiwaczy umieszczonych naprzeciwko siebie. Celem praktycznym rozprawy jest dobór liczby wtryskiwaczy wymaganej dla zapewnienia założonej mocy i największej sprawności ogólnej lotniczego bezgłowicowego silnika dwusuwowego o zapłonie samoczynnym. Postawiono dwie tezy badawcze. Zmiana strategii wtrysku paliwa rozumianej przez wtrysk pojedynczy lub dwoma wtryskiwaczami w silniku badawczym wpływa na przebieg procesu roboczego w warunkach ustalonych. Gwałtowna zmiana dawki paliwa w silniku badawczym w zakresie małych obciążeń nie wywołuje zjawisk dynamicznych niezależnie od przyjętej strategii wtrysku paliwa. Praca obejmuje swoim zakresem analizę stanu wiedzy, przygotowano stanowisko badawcze, wykonano badania doświadczalne, przeprowadzono analizę uzyskanych wyników, sformułowano wnioski na podstawie uzyskanych wyników.

Rozdział trzeci (Stanowisko badawcze) zawiera opis obiektu badań oraz stanowiska badawczego. Obiekt badań, bezgłowicowy dwusuwowy silnik lotniczy o zapłonie samoczynnym, został opracowany i wykonany przez Politechnikę Lubelską wraz z firmą WSK „PZL-Kalisz” S.A. Silnik ma 3 cylindry, 6 tłoków, 2 wały korbowe, układ doładowania sprężarką napędzaną mechanicznie, realizuje cykl pracy dwusuwowy, układ paliwowy składa się z pompy wysokiego ciśnienia, 2 akumulatorów ciśnienia, olej napędowy jest wtryskiwany do każdego cylindra przez 2 wtryskiwacze paliwa. Komora spalania jest uformowana z dwóch naprzeciwlegle usytuowanych denek tłoków i bocznej powierzchni tulei cylindrowej. Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku dynamometrycznym w Laboratorium Katedry Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych Politechniki Lubelskiej. Sygnały wejściowe do sterowania silnikiem (układem zasilania w paliwo) to ciśnienie w kolektorze dolotowym, temperatura w kolektorze dolotowym, położenie wału korbowego, ciśnienie paliwa, temperatura układu chłodzenia. Parametry wyjściowe to sygnał sterujący pracą wtryskiwacza, sygnał sterujący ciśnieniem paliwa w akumulatorach paliwa. Do pomiaru ciśnienia w cylindrze zastosowano piezoelektryczny czujnik ciśnienia AVL GH14D. Czujnik zainstalowano w adapterze górnego wtryskiwacza w pierwszym cylindrze badanego silnika. Układ paliwowy składał się z pompy wysokiego ciśnienia Denso HP3, dwóch akumulatorów paliwa, sześciu elektromagnetycznych wtryskiwaczy paliwa Bosch 0 445 110 135.

W rozdziale czwartym (Badania stanowiskowe) przedstawiono założenia badawcze oraz przyjęty plan eksperymentu, który przeprowadzono na dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym na stanowisku dynamometrycznym. W ramach badań doświadczalnych zrealizowano i analizowano dwa zadania badawcze.

1. Wpływ zmiany strategii wtrysku na proces roboczy silnika w stanach ustalonych dla prędkości obrotowej 2500 obr/min i obciążenia silnika 8 Nm i 16 Nm. Zbadano trzy warianty strategii wtrysku: aktywne oba wtryskiwacze, aktywny wtryskiwacz dolny, aktywny

wtryskiwacz górny. W stanach ustalonych przez 60 sekund rejestrowano ciśnienie w cylindrze silnika oraz inne parametry pracy silnika oraz stanowiska badawczego.

2. Wpływ strategii wtrysku na proces spalania i cykl roboczy silnika w stanach nieustalonych. W pracy zastosowano wymuszenie zewnętrzne w postaci skokowej zmiany obciążenia silnika z 8 Nm na 16 Nm przy stałej prędkości obrotowej 2500 obr/min. Czasy wtrysku odpowiadały wartościom przyjętym dla badań w stanach ustalonych. Zmiana obciążenia następowała co 10 sekund.

Podczas badań rejestrowano parametry szybkozmiennie i wolnozmiennie badanego silnika dla 2498 cykli roboczych badanego silnika. Zarejestrowane przebiegi ciśnienia w cylindrze poddano analizie i wyznaczono parametry charakterystyczne procesu roboczego silnika oraz parametry charakterystyczne procesu spalania w silniku eksperymentalnym. Obliczenia i analizy przeprowadzono dla obu zadań badawczych.

Postawione założenia badawcze oraz przyjęty plan eksperymentu, nie budzą wątpliwości.

Rozdział piąty (Wyniki badań) to przedstawienie wyników badań przeprowadzonych dla obu zadań badawczych. Na kolejnych rysunkach oraz w tabelach przedstawiono ciśnienie indykowane, maksymalne ciśnienie, kąt występowania maksymalnego ciśnienia, prędkość narastania ciśnienia w cylindrze, kąt występowania maksymalnej prędkości narastania ciśnienia w cylindrze, kąt spalania 10% mieszaniny palnej, kąt spalania 90% mieszaniny palnej, czas spalania ładunku. Ponadto przedstawiono godzinowe zużycie paliwa, jednostkowe zużycie paliwa, współczynnik nadmiaru powietrza, temperaturę spalin.

W rozdziale szóstym (Analiza wyników) przedstawiono metodykę oraz wynik analizy badań eksperymentalnego silnika dla przyjętych strategii wtrysku dla obu zadań badawczych. Przedstawiono i zastosowano autorską metodę opartą o analizę statystyczną.

Rozdział siódmy (Podsumowanie i wnioski) zawiera podsumowanie i wnioski. Na podstawie przeprowadzonych badań i ich analiz sformułowano następujące wnioski.

1. Zrealizowano postawione cele badawcze, jak również pozytywnie zweryfikowano postawione tezy badawcze. Zmiana strategii wtrysku paliwa (wtrysk pojedynczym wtryskiwaczem lub wtrysk dwoma wtryskiwaczami) w bezgłowicowym silniku dwusuwowym o zapłonie samoczynnym istotnie wpływa na przebieg procesu roboczego w warunkach ustalonych. W badanym zakresie obciążenia zastosowanie wtrysku dwoma wtryskiwaczami powoduje:

- wzrost średniego ciśnienia indykowanego,
- wzrost ciśnienia maksymalnego,
- mniejsze godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa,
- zmniejszenie temperatury spalin,

w odniesieniu do wartości uzyskanych dla wtrysku pojedynczym wtryskiwaczem.

2. Zastosowanie analizy statystycznej pozwoliło na wykazanie, że w badanym zakresie obciążenia w eksperymentalnym silniku akumulacja cieplna, akumulacja związana z przepływem powietrza przez kolektor dolotowy lub spalin przez kolektor wylotowy, akumulacja w układzie wtryskowym nie ma zauważalnego wpływu na proces roboczy silnika w stanach dynamicznej zmiany dawki paliwa.

3. Wykorzystana metoda analizy statystycznej pozwoliła na ocenę różnic pomiędzy badanymi strategiami wtrysku.

4. Dokonano przeglądu zagadnień konstrukcyjnych silnika eksperymentalnego.

5. Opracowano stanowisko badawcze, tory pomiarowe, system rejestracji i akwizycji danych pomiarowych, system sterowania silnikiem eksperymentalnym, system sterowania hamownia dynamometryczną.

6. Zebrano dane empiryczne umożliwiające identyfikację współczynników modelu fizycznego i matematycznego cyklu roboczego silnika, co umożliwi prowadzenie analiz numerycznych procesów fizycznych zachodzących podczas pracy silnika eksperymentalnego.

Pracę oceniam bardzo dobrze. Na szczególne uznanie zasługuje przeprowadzenie badań doświadczalnych eksperymentalnego silnika na hamowni dynamometrycznej, zakres przeprowadzonych badań doświadczalnych, opracowanie i uruchomienie stanowiska badawczego w tym torów pomiarowych, systemu rejestracji i akwizycji danych pomiarowych, systemu sterowania silnikiem eksperymentalnym, systemu sterowania hamownia dynamometryczną.

**Pracę wyróżnia opracowanie i zastosowanie autorskiej metody analizy wyników badań opartej o analizę statystyczną.**

Praca jest dobrze zredagowana, ilustracje, wykresy i tabele bardzo dobrze korespondują z tekstem. Wyniki badań przedstawiono graficznie w bardzo rzetelny sposób i omówiono w tekście rozprawy. Całość napisana jest poprawnym językiem technicznym. Należy zaznaczyć, że podjęta przez Doktoranta tematyka stanowi bardzo aktualny problem w rozwoju napędów lotniczych opartych o tłokowe silniki spalinowe zwłaszcza, że ich konstrukcje muszą spełniać coraz to wyższe wymagania. Na podstawie całościowej analizy pracy można także stwierdzić, że sposób przeprowadzonych badań, opracowana metoda analizy wyników badań i zakres analiz mógłby być wykorzystany dla innych rodzajów napędów lotniczych, co powoduje że praca ma charakter uniwersalny, rozwojowy.

**Po zapoznaniu się z rozprawą nasuwają się następujące spostrzeżenia.**

1. Autor posługuje się określeniem silnik Diesla, silnik wysokoprężny oraz poprawnym w dziedzinie tłokowych silników spalinowych - silnik o zapłonie samoczynnym.

2. Autor operuje pojęciem sprawności silnika i zużycia paliwa. W dziedzinie tłokowych silników spalinowych definiuje się sprawność teoretyczną, sprawność indykowaną, sprawność mechaniczną, sprawność cieplną, sprawność ogólną, godzinowe zużycie paliwa, jednostkowe zużycie paliwa. Np. na stronie 57 Autor napisał *Połączenie cech konstrukcyjnych sprzyjających sprawności silnika oznacza mniejsze zużycie paliwa...*

3. Brak tabelarycznego zestawienia wymiarów głównych, parametrów pracy, zwłaszcza godzinowego zużycia paliwa i jednostkowego zużycia paliwa, układu konstrukcyjnego, układu zasilania i systemu chłodzenia współczesnych (wybranych) jednostek napędowych stosowanych w lotnictwie sportowym i turystycznym.

4. Rozdział trzeci Stanowisko badawcze bardzo dokładnie przedstawia stanowisko badawcze, układ sterowania hamownią, układ sterowania silnikiem, tory pomiarowe, układy rejestracji

sygnałów pomiarowych. Czy sterownik badawczy silnika został opracowany i wykonany w ramach pracy doktorskiej.

5. Czym kierował się Autor przyjmując w planie eksperymentu prędkość obrotową 2500 obr/min i obciążenie silnika 8 Nm i 16 Nm. Jak wybrane punkty eksperymentu są umieszczone w polu pracy silnika eksperymentalnego. Brak informacji o zakładanych podczas projektowania i budowania prototypu silnika eksperymentalnego parametrów pracy silnika i jego wskaźnikach porównawczych, oczekiwanej charakterystyce prędkościowej silnika. Na stronie 57 podano tylko: moc maksymalna 100 kW przy prędkości obrotowej 2500 obr/min.

6. Wyniki badań i ich analiza została przeprowadzona jako porównanie wartości bezwzględnych uzyskanych dla różnych strategii wtrysku paliwa. Warto w dalszych pracach Autora podjąć starania aby przedstawić takie analizy jako zmiany względne w stosunku do wartości referencyjnej lub wartości przyjętej jako punkt odniesienia przez Autora.

## PODSUMOWANIE

**Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Karpińskiego jest wartościowym i aktualnym opracowaniem o charakterze badawczo-naukowym i użytkowym, która wnosi istotne treści poznawcze i wskazuje nowe kierunki rozwoju i doskonalenia konstrukcji, technologii budowy i eksploatacji tłokowych silników spalinowych, zwłaszcza napędów lotniczych.**

Niekonwencjonalne układy konstrukcyjne w połączeniu z dostępnymi rozwiązaniami w zakresie sterowania i zasilania silnika w powietrze i paliwo oraz nowe technologie wytwarzania otwierają przed konstruktorami silników lotniczych nowe możliwości. Podjęcie i kontynuowanie prac w zakresie niekonwencjonalnego bezgłowicowego silnika dwusuwowego o zapłonie samoczynnym do zastosowania w lotnictwie lub poza lotnictwem należy uznać za celowe i uzasadnione. Taki charakter i cel ma rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Karpińskiego. Spełnienie wymagań stawianych współczesnym napędem lotniczym może się odbywać na drodze badań doświadczalnych jak również badań symulacyjnych. Recenzowana praca jest przykładem pracy badawczej. **Pracę wyróżnia obiekt badań doświadczalnych, zakres przygotowania eksperymentu, autorska metoda analizy wyników badań, opis i wnioskowanie na podstawie analizy wyników badań.**

## WNIOSEK KOŃCOWY

**Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Karpińskiego *Badanie procesu wtrysku w bezgłowicowym dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym* mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.**

Mgr inż. Paweł Karpiński wykazał się umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania zadań naukowych na poziomie prac doktorskich i reprezentuje wysoki poziom wiedzy w dziedzinie tematyki rozprawy.

**Stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Pawła Karpińskiego rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku w zakresie rozpraw doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony rozprawy przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej.**

7 Nowakowski  
20.09.2022