

**O C E N A**  
**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Karpińskiego**  
**pt.: „Badania procesu wtrysku w bezgłowicowym dwusuwowym silniku**  
**o zapłonie samoczynnym”**

**podstawa opracowania:** pismo Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Lubelskiej RDN/IM/275/2022 z dnia 24.06.2022, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z umową i rachunkiem

## **1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU ROZPRAWY**

Ze względu na to, że transport jest najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną techniki, można zauważyć wiele weryfikacji konstrukcyjnych istniejących już maszyn, a także pojawianie się całkowicie nowych koncepcji. W związku z tym producenci silników wprowadzają rozwiązania techniczne ograniczające ich negatywny wpływ na środowisko naturalne. Główną gałęzią transportu jest transport drogowy, choćby ze względu na liczbę użytkowanych pojazdów, ale bardzo prężnie rozwijającą się dziedziną transportu jest także lotnictwo, które podczas swojego ponad stuletniego istnienia bardzo dynamicznie się zmieniało i nadal się zmienia.

Od kilkudziesięciu lat prowadzone są intensywne prace nad nowymi konstrukcjami silników lotniczych oraz optymalizacją już istniejących napędów. We współczesnym lotnictwie szczególną rolę odgrywa aspekt bezpieczeństwa oraz kwestia minimalizacji zużycia paliwa. W ostatnich latach uwaga inżynierów lotniczych skupia się również na ograniczeniu emisji substancji toksycznych, w tym zmniejszeniu śladu węglowego rozumianego przez emisję do atmosfery dwutlenku węgla pochodzącego ze spalania paliw ciekłych.

Silniki lotnicze przepływowe charakteryzują się najwyższym poziomem technologii, natomiast tłokowe silniki lotnicze są przestarzałe konstrukcyjnie. Często są jeszcze konstrukcje wywodzące się z czasów II wojny światowej, stanowiąc wciąż podstawowe źródło napędu w lekkich statkach powietrznych wykonujących operacje w ramach tzw. General Aviation. Dlatego wszelkie prace związane z nowymi konstrukcjami tego typu silników są zasadne i konieczne.

Wykorzystanie zyskujących coraz to bardziej na popularności napędów elektrycznych wiąże się z poważnym ograniczeniem operacyjnym w postaci znacznego skrócenia czasu lotu w porównaniu do napędów spalinowych. Z tego względu silniki tłokowe jeszcze przez długi czas będą najbardziej popularnym rodzajem napędu w lekkich statkach powietrznych. Dotychczas w lotnictwie cywilnym szeroko wykorzystywane były silniki tłokowe o zapłonie iskrowym. W ostatnich latach prowadzone są liczne prace nad nowymi konstrukcjami silników lotniczych z zapłonem samoczynnym. Charakteryzują się one lepszymi osiąganiami oraz większą

sprawnością w porównaniu do silników ZI. W silnikach tłokowych ZS szczególny wpływ na realizację cyklu pracy, a tym samym uzyskiwanych osiągnięć, mają zagadnienia związane z wtryskiem paliwa oraz realizacją procesu spalania.

Mgr inż. Paweł Karpiński w swojej rozprawie doktorskiej podjął aktualny i istotny problem o charakterze naukowym i praktycznym, związany z analizą procesu wtrysku w bezgłowicowym, dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym. Autor swoją uwagę skoncentrował na wpływie tego procesu na proces roboczy w silniku wyposażonym w dwa naprzeciwległe położone wtryskiwacze zainstalowane w tulei cylindrowej. Takie rozwiązanie jest charakterystyczne dla konstrukcji silników z przeciwsobnymi tłokami. Badania naukowe nad tego rodzaju konstrukcjami są prowadzone przez szereg ośrodków naukowo-badawczych, jednakże literatura publikacji naukowych wykazuje, że naukowcy i inżynierowie koncentrowali się do tej pory głównie na analizach symulacyjnych i modelowaniu matematycznym. Deficyt prac poświęconych badaniom empirycznym potwierdza słuszność podjętej przez Autora problematyki badawczej oraz wskazuje, że tematyka, zakres oraz cele przedstawione w pracy zostały trafnie zdefiniowane.

Mgr inż. Paweł Karpiński prawidłowo zauważył, że zdefiniowana strategia wtrysku w badanej konstrukcji silnika ma nieoczywisty wpływ na przebieg procesu roboczego. Paliwo może być dawkowane poprzez wykorzystanie jednego lub dwóch wtryskiwaczy na cylinder. Realizacja wtrysku przez dwa wtryskiwacze korzystnie wpływa na bezpieczeństwo lotniczego układu napędowego, ze względu na redundancję krytycznych elementów konstrukcyjnych silnika. Takie rozwiązanie skutkuje jednak wzrostem kosztów produkcji, wzrostem złożoności układu paliwowego oraz skomplikowaniem układu sterowania. Dawkowanie paliwa poprzez tylko jeden wtryskiwacz na cylinder może negatywnie wpłynąć na przebieg procesu roboczego pogarszając sprawność silnika i zwiększając zużycie paliwa.

Doktorant przeprowadził również badania wpływu gwałtownej zmiany dawki paliwa w zakresie małych obciążeń na powstawanie zjawisk dynamicznych o charakterze akumulacyjnym, które w konsekwencji mogą wpływać na pracę silnika.

W świetle wymienionych aspektów uważam, że podjęta przez Autora problematyka jest istotna i wnosi nowość w zakresie badań nad lotniczymi silnikami tłokowymi.

Połączenie okiennego systemu wymiany ładunku, braku głowicy, doładowania mechanicznego oraz opozycyjnie umieszczonych wtryskiwaczy dostarczających paliwo w kierunku prostopadłym do osi cylindra sprawiają, że badana konstrukcja silnika stanowi oryginalny obiekt badawczy. Wymienione rozwiązania nie występują jednocześnie w innych lotniczych silnikach tłokowych. Prace nad podobną konstrukcją silnika o zapłonie samoczynnym z przeciwsobnymi tłokami prowadziła amerykańska firma Achates Power. Jednakże rozwiązanie to było dedykowane dla przemysłu motoryzacyjnego i nie uwzględniało aspektów technicznych mających znaczenie w inżynierii lotniczej.

Biorąc pod uwagę współczesny stan wiedzy światowej na temat podjętego zagadnienia uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Karpińskiego stanowi oryginalne osiągnięcie Autora i wnosi ważne aspekty do badań nad procesem wtrysku w bezgłowicowych silnikach o zapłonie samoczynnym.

Postawione zadanie naukowe we właściwy sposób spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Tematyka rozprawy jest aktualna i zgodna z kierunkami badań lotniczych silników tłokowych w aspekcie poprawy bezpieczeństwa oraz osiągnięć, w szczególności mających na celu zmniejszenie zużycia paliwa.

## **2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 157 stron. Praca została podzielona na 7 zasadniczych rozdziałów. Treść obejmuje również streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz zastosowanych skrótów i symboli oraz wykaz literatury. W pracy

zamieszczono 122 rysunki oraz 22 tabele. Bibliografię stanowi 175 pozycji o charakterze naukowym oraz poznawczym, obejmujących tematykę badawczą rozprawy. Uwzględniono w nich artykuły naukowe w języku polskim i angielskim, jak również książki oraz patenty. Na uwagę zasługuje cytowanie przez Autora wielu relatywnie nowych publikacji anglojęzycznych. Potwierdza to aktualność podjętej problematyki oraz świadczy o rzetelnym przeglądzie literatury dokonany przez Doktoranta. Cała dysertacja została napisana poprawnym i precyzyjnym językiem technicznym.

Celem poznawczym pracy było zbadanie różnic w procesie roboczym bezgłowicowego silnika dwusuwowego o zapłonie samoczynnym w przypadku wtrysku paliwa realizowanego za pomocą pojedynczego wtryskiwacza lub pary wtryskiwaczy umieszczonych naprzeciwko siebie. Ponadto zdefiniowano cel praktyczny polegający na określeniu liczby wtryskiwaczy w badanej konstrukcji silnika, wystarczającej dla zapewnienia wymaganej mocy i sprawności. Oba cele zostały jasno sformułowane z podkreśleniem oryginalności właściwym dla rozpraw naukowych.

Pierwszą częścią pracy stanowi analiza stanu wiedzy. W jej wprowadzeniu scharakteryzowano problematykę badawczą oraz przedstawiono wyniki badań potwierdzające zalety konstrukcji dwusuwowych silników o przeciwsobnych tłokach w porównaniu do konwencjonalnych rzędowych silników czterosuwowych o zapłonie iskrowym.

W następnej kolejności Autor rozprawy zaprezentował analizę teoretyczną poświęconą wybranym zagadnieniom związanym z procesem wtrysku, procesem spalania oraz procesem roboczym w silnikach ZS. W ramach kolejnych podrozdziałów opisano czynniki wpływające na przebieg tworzenia i spalania mieszanki w silnikach o zapłonie samoczynnym. Skoncentrowano się również na parametrach geometrycznych związanych z wtryskiem paliwa. Opisane zostały zagadnienia dotyczące okiennego systemu wymiany ładunku w silniku dwusuwowym i jego wpływ na proces roboczy. Na końcu podsumowano przeprowadzoną analizę stanu wiedzy i zaprezentowano najważniejsze wnioski wynikające z dokonanej przeglądu literatury światowej poświęconej poruszanej tematyce.

W drugim rozdziale pracy zaprezentowano cele, tezy i zakres pracy. Autor zdefiniował cel poznawczy oraz cel praktyczny. Doktorant postawił dwie tezy badawcze oraz przedstawił szczegółowy zakres prac prowadzących do ich udowodnienia.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił opis konstrukcji badanego silnika oraz stanowiska badawczego w hamowni silnikowej. Przedmiotem badań był trzycylindrowy dwusuwowy silnik ZS o przeciwsobnych tłokach. Doktorant przedstawił szczegółowe schematy stanowiska badawczego oraz zamieścił precyzyjne informacje o aparaturze pomiarowej wykorzystanej w trakcie prowadzonych badań.

W następnym, czwartym rozdziale zaprezentowano założenia badawcze, plan eksperymentu oraz przedstawiono zastosowane metody analizy wyników. Ze względu na asymetrię komory spalania oraz lokalizację wtryskiwaczy w górnej i dolnej części tulei cylindrowej strategię z wykorzystaniem jednego wtryskiwacza rozróżniono na górno- oraz dolnowtryskiwaczową. Badania eksperymentalne zostały podzielone na dwie części. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę wpływu zdefiniowanej strategii wtrysku na proces roboczy w warunkach ustalonych. Przyjęto dwie wartości obciążenia dla stałej prędkości obrotowej silnika. Zmiany obciążenia dokonywano poprzez zmianę czasu wtrysku. We wszystkich scenariuszach badawczych zastosowano pojedynczą dawkę paliwa. W celu późniejszej analizy procesu roboczego rejestrowano szybkozmienny sygnał z piezokwarcowego czujnika ciśnienia w cylindrze oraz mierzono wybrane parametry paliwowo-powietrzne. W drugim etapie eksperymentu zbadano wpływ skokowej zmiany dawki paliwa na obecność zjawisk dynamicznych. Do analizy zarejestrowanych sygnałów szybkozmiennych Autor opracował program w środowisku LabView. Analizę istotności statystycznej przeprowadzono z wykorzystaniem testu t-Studenta w formie algorytmu

opracowanego w programie Microsoft Excel.

Piąty rozdział zawiera uzyskane wyniki badań w warunkach ustalonych oraz warunkach dynamicznych. Zaprezentowano uśrednione parametry ciśnieniowe dla zdefiniowanych obciążeń i strategii wtrysku.

W rozdziale szóstym przedstawiono analizę wyników badań. W celu przeanalizowania różnic pomiędzy badanymi strategiami wtrysku zdefiniowano punkt mocy, będący punktem pośrednim pomiędzy badanymi obciążeniami silnika. Następnie w oparciu o aproksymację liniową wyznaczono wartości rozpatrywanych parametrów oraz obliczono ich odchylenia standardowe dla przyjętego punktu pracy. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane do przeprowadzenia analizy statystycznej mającej na celu zidentyfikowanie różnic statystycznych pomiędzy badanymi strategiami wtrysku. Korzystając z testu t-Studenta obliczono wartość parametru  $\alpha$  dla rozpatrywanych parametrów ciśnieniowych i paliwowo-powietrznych oraz przeprowadzono analizę istotności statystycznej, która wykazała istotne i bardzo istotne różnice statystyczne pomiędzy strategią jedno- oraz dwuwtryskiwaczową.

Druga część analizy wyników dotyczyła pracy silnika w warunkach dynamicznych. Do oceny zjawisk dynamicznych opracowano modele regresyjne w oparciu o wykresy w postaci chmury punktów przedstawiających zależność danego parametru ciśnieniowego w funkcji prędkości obrotowej silnika dla rozpatrywanych dawek wtrysku paliwa. Na podstawie opracowanych modeli wyznaczono quasi-statyczne przebiegi analizowanych parametrów dla zdefiniowanych strategii wtrysku. Następnie obliczono różnice przebiegów rzeczywistych wartości parametrów oraz ich funkcji regresyjnych i przeanalizowano je dla cykli pracy silnika występujących przed i po skokowej zmianie dawki paliwa. Analizie poddano również wartość uśrednionych parametrów ciśnieniowych w funkcji względnego numeru cyklu dla zarejestrowanych skoków dawki paliwa. Autor zauważył, że w przypadku gwałtownej zmiany dawki paliwa w warunkach małego obciążenia nie występują zjawiska o charakterze akumulacyjnym, np. ze względu na akumulację ciepłą, akumulację w kolektorze dolotowym lub wylotowym lub akumulację w układzie paliwowym.

W ostatnim, siódmym rozdziale zaprezentowano podsumowanie oraz wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz. Dysertacja została zakończona perspektywami dalszych prac, które mogą przyczynić się do poszerzenia wiedzy na temat wpływu procesu wtrysku na pracę bezgłowicowego silnika dwusuwowego o zapłonie samoczynnym.

### **3. OCENA ROZPRAWY**

#### **Uwagi ogólne**

Rozprawę oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym oraz metodycznym. Praca zawiera pojedyncze błędy i niedociągnięcia, które nie rzutują na jej ogólną wysoką ocenę. Układ rozprawy jest logiczny i odpowiada tokowi wykonanych badań oraz analiz. W pracy prawidłowo przedstawiono ciąg czynności badawczych w sposób charakterystyczny dla rozpraw doktorskich. Podział treści rozprawy i kolejność rozdziałów są przejrzyste i nie budzą zastrzeżeń. Praca nie zawiera powtórzeń i błędów logicznych. Rozprawa została napisana wyjątkowo starannie z wykorzystaniem poprawnego języka technicznego. Wykorzystane pojęcia i terminologia są właściwie używane. Przedstawione w pracy rysunki i tabele zostały opracowane bardzo dokładnie z dbałością o czytelność zamieszczonego w nich tekstu. Materiały ilustracyjne w części teoretycznej dobrze uzupełniają opisywane treści. Na uwagę zasługuje precyzyjne sformułowanie celów badawczych i zakresu pracy. Doktorant wykonał eksperymenty i analizy, które stanowią wartość naukową, jak również użyteczną.

### **Zalety pracy:**

- Praca wpisuje się w aktualne tendencje rozwoju tłokowych silników lotniczych związane z zapewnieniem większego bezpieczeństwa pracy zespołu napędowego z jednoczesną poprawą jego osiągnięć, w tym minimalizacją zużycia paliwa.
- Poruszono istotną problematykę związaną z silnikami tłokowymi z przeciwsobnymi tłokami. Proces wtrysku realizowany jest w nich zazwyczaj prostopadle do osi cylindra z wykorzystaniem jednego lub dwóch wtryskiwaczy na cylinder. Dotychczasowe badania tego rodzaju silnika były prowadzone głównie na drodze symulacyjnej, a badania eksperymentalne są nieliczne i nie przedstawiają wyników pozwalających na jednoznaczną i wiarygodną ocenę wpływu badanych strategii wtrysku na proces roboczy w tego rodzaju silniku. Tym samym badania przedstawione w rozprawie mają dużą wartość naukową.
- Wykonano badania eksperymentalne w warunkach ustalonych oraz warunkach dynamicznych dla różnych obciążeń silnika i zdefiniowanych strategii wtrysku.
- Doktorant opracował oprogramowanie, a następnie wykorzystał je do przeprowadzenia zaawansowanej analizy matematycznej uzyskanych wyników. Pozwoliło to wyjaśnić wpływ rozpatrywanych strategii wtrysku na proces roboczy silnika. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej, która pozwoliła ocenić istotność różnic pomiędzy badanymi strategiami wtrysku.
- Uzyskane wyniki rozszerzyły stan wiedzy na temat wpływu zdefiniowanych strategii wtrysku na proces roboczy w bezgłowicowym dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym pracującym zarówno w warunkach ustalonych jak i w stanach dynamicznych.
- Przeprowadzone badania umożliwiły dokładniejsze zrozumienie mechanizmów związanych z wtryskiem paliwa realizowanym za pomocą jednego lub dwóch wtryskiwaczy na cylinder, a także mechanizmów zachodzących podczas procesu spalania w komorze roboczej ukształtowanej przez powierzchnię denek przeciwsobnych tłoków i fragment tulei cylindrowej.

O wysokiej wartości merytorycznej pracy świadczą również:

- właściwe uzasadnienie podjętej tematyki poprzedzone szeroką analizą stanu wiedzy,
- trafne zdefiniowanie celu i zakresu pracy,
- oryginalność uzyskanych wyników badań,
- wykorzystanie zaawansowanej analizy matematycznej do przetwarzania zarejestrowanych danych,
- logiczna i przejrzysta struktura pracy.

W trakcie realizacji rozprawy Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem do pracy naukowej, w szczególności znajomością zagadnień teoretycznych poświęconych silnikom spalinowym, teorii sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym, umiejętnością wykorzystania współczesnych metod pomiarowych w badaniach silnikowych oraz umiejętnością zaawansowanej matematycznej analizy danych.

## Uwagi krytyczne

Pomimo bardzo wysokiej oceny merytorycznej rozprawy doktorskiej pojawiają się drobne uwagi i wątpliwości, niektóre o charakterze dyskusyjnym, mające charakter krytyczny:

- Minusem omawianej pracy jest brak badań emisji związków toksycznych spalin dla zaproponowanych rozwiązań w komorze spalania silnika, zwłaszcza, że Autor szczegółowo omawia ten problem w rozdziale 1. Zagadnienie emisyjności silników, w tym też lotniczych, jest warunkiem ich wdrożenia do produkcji. Wydaje się, że ta tematyka może być poruszona w kolejnym doktoracie, realizowanym pod kierunkiem Profesora Wendekera.
- Pierwsza teza pracy „Zmiana strategii wtrysku paliwa rozumianej przez wtrysk pojedynczy lub dwoma wtryskiwaczami w bezgłowicowym silniku dwusuwowym o zapłonie samoczynnym istotnie wpływa na przebieg procesu roboczego w warunkach ustalonych” wydaje się oczywista.
- Badania zostały przeprowadzone tylko dla jednej wartości prędkości obrotowej oraz dwóch nieznacznie różniących się wartości obciążenia. Nie wiadomo jaki wpływ na proces roboczy miałyby inne wartości tych parametrów. Ze względu na fakt, że badany silnik jest silnikiem lotniczym, szczególnie interesujące byłyby wyniki dla punktu pracy leżącego na charakterystyce śmigłowej bądź odpowiadającego mocy przelotowej lub nominalnej.
- Pośród rejestrowanych parametrów pracy silnika pominięto analizę emisji substancji toksycznych. W przypadku badania napędów lotniczych emisja odgrywa mniejszą rolę aniżeli aspekty związane z bezpieczeństwem oraz zużyciem paliwa. Niemniej jednak zarówno w technice motoryzacyjnej jak i lotniczej panuje silny trend ukierunkowany na minimalizację emisji substancji toksycznych takich jak tlenek i dwutlenek węgla, tlenki azotu, niespalone węglowodory czy sadza.
- Do analizy wartości współczynnika nadmiaru powietrza (parametr  $\lambda$ ) wykorzystano metodę pośrednią bazującą na zmierzonym zużyciu paliwa oraz strumieniu masowym powietrza przepływającego przez kolektor dolotowy. Lepszym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie do tego celu sygnału z sondy lambda zainstalowanej w kolektorze wylotowym.
- Analizę procesu roboczego w stanach dynamicznych przeprowadzono przy zastosowaniu wymuszenia skokowego w postaci skokowej zmiany obciążenia. Nie zbadano wpływu innych sposobów wymuszenia, takich jak wymuszenie impulsowe czy liniowo-narastające.
- Zasadniczą analizę parametrów procesu roboczego przeprowadzono na podstawie sygnału ciśnienia w cylindrze. Nie przeprowadzono badań bazujących na metodach wizualizacyjnych (np. metodzie optycznej), które pozwoliłyby na lepszą analizę jakościową procesu wtrysku, a tym samym znacząco wzbogaciłyby wartość merytoryczną pracy.
- W badaniach przedstawionych w pracy nie odniesiono się do wpływu wybranych parametrów sterujących pracą układu wtryskowego na przebieg procesu roboczego dla zdefiniowanych strategii wtrysku. Istotny wpływ na pracę badanego silnika wywierają mogą parametry takie jak: podział dawki na cykl, odległość kątowa pomiędzy poszczególnymi dawkami, kąt wtrysku poszczególnych dawek czy ciśnienie wtrysku. Zrozumiałym jest jednak, że uwzględnienie tych aspektów w planie badań znacząco zwiększyłoby już i tak rozbudowany zakres pracy. Niemniej jednak kwestie te mogą być przedmiotem dalszych badań naukowych, co z resztą podkreślił sam Autor.

## Pozostałe uwagi ogólne:

1. Znaczna objętość dysertacji, wynikająca m.in. z „podręcznikowego” charakteru niektórych rozdziałów (zwłaszcza rozdziału 1).
2. Mimo bardzo starannego zredagowania rozdziału „8. Dyskusja i podsumowanie” sugerowałbym bardziej przejrzyste zakończenie tej pracy przez dodanie syntetycznych wniosków w następującej konfiguracji:
  - wnioski ogólne (czy zrealizowano cele pracy i czy udowodniono tezy),

- wnioski szczegółowe,
  - wnioski metodyczne,
  - wnioski uytylitarne,
  - wnioski perspektywiczne (kierunki dalszych badań).
3. Dobrze byłoby, żeby Autor zdecydował się na jedną nazwę silnika o zapłonie samoczynnym (prawidłowa nazwa) a nie używał zamiennie jeszcze dwóch nazw: silnik wysokoprężny i silnik diesla, a ponadto nie „wydech” a „wylot” i wyraz „fizykochemiczny” pisany razem.

### **Podsumowanie oceny merytorycznej**

Pomimo wymienionych powyżej drobnych uwag krytycznych i sugestii bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej. Na szczególną uwagę zasługuje szeroki zakres wykonanej pracy, trafność podjętej tematyki badawczej oraz duży wkład intelektualny Autora. Wymienione krytyczne uwagi, niektóre o charakterze dyskusyjnym, nie umniejszają mojej wysokiej oceny recenzowanej pracy.

Przedstawiona rozprawa zawiera ważne treści poznawcze i praktyczne. Badania przedstawione w pracy zwróciły uwagę na duże znaczenie strategii wtrysku dla przebiegu procesu roboczego w bezgłowicowym dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym. Głównym celem pracy zrealizowanym przez Doktoranta było poznanie różnic w procesie roboczym zachodzącym w badanym silniku w przypadku wtrysku paliwa realizowanego za pomocą pojedynczego wtryskiwacza lub pary wtryskiwaczy umieszczonych naprzeciwko siebie. Jednocześnie osiągnięty został cel praktyczny, który pozwolił na udzielenie odpowiedzi która z rozpatrywanych strategii wtrysku zapewnia lepsze osiągi badanego silnika. Wykazano, że zmiana strategii wtrysku paliwa z wykorzystaniem jednego lub dwóch wtryskiwaczy na cylinder istotnie wpływa na przebieg procesu roboczego w warunkach ustalonych. Krótszy okres indukcji oraz krótszy czas spalania przekładają się na wzrost efektywności procesu spalania w zakresie małego obciążenia. Badania wykazały, że strategia dwuwtryskiwaczowa zapewnia większe średnie ciśnienie indykowane oraz mniejsze jednostkowe zużycie paliwa w porównaniu ze strategią jednowtryskiwaczową. Ponadto badania w stanach dynamicznych dowiodły, że gwałtowna zmiana dawki paliwa w zakresie małych obciążeń silnika nie skutkuje występowaniem zjawisk dynamicznych o charakterze akumulacyjnym w przypadku rozpatrywanych strategii wtrysku. Przeprowadzona przez Doktoranta analiza wskazuje na korzyści związane z poprawą osiągnięć silnika oraz poprawą bezpieczeństwa w przypadku zastosowania strategii dwuwtryskiwaczowej.

Uważam, że opracowany przez Autora materiał literaturowy oraz badawczy zostały użyte we właściwy sposób. Opracowane przez Doktoranta wyniki i przedstawione analizy świadczą o rzetelności i wnikliwości badawczej Autora. Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny może zostać uznana za oryginalne dzieło wnoszące duży wkład i mające duże znaczenie w rozwoju nowych konstrukcji lotniczych silników tłokowych.

Autor podjął się trudnej problematyki naukowej oraz wykorzystał złożoną metodologię badawczą. Przedstawione w pracy zagadnienia nie wyczerpują wszystkich zagadnień związanych z analizą procesu wtrysku w bezgłowicowym dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym. Podkreślić należy, że zarówno charakter procesu wtrysku jak również przebieg procesu roboczego w tego rodzaju silniku zależą zarówno od szeregu czynników fizykochemicznych jaki i szeregu parametrów sterujących pracą silnika. Obecny stan wiedzy nie pozwala na pełną ocenę wpływu tych czynników i parametrów na proces wtrysku

w bezgłowicowym dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym. Wskazuje to na konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Autor dokonał wyjątkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta, bowiem uzasadnione zostały twierdzenia Autora ujęte w tezach pracy, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w niektórych elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

**Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Pawła Karpińskiego pt.: „Badania procesu wtrysku w bezgłowicowym dwusuwowym silniku o zapłonie samoczynnym” (promotor: prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker; promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Grabowski) spełnia wymagania określone dla tego typu prac zgodnie z Ustawą z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2020.1086 z późn. zm.), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.**

#### Wyróżnienie rozprawy

Biorąc pod uwagę powyższe, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy, pod warunkiem pozytywnego wyniku obrony doktorskiej. Uzasadnieniem wniosku jest podjęcie niezwykle ważnego i aktualnego tematu związanego ze współczesnymi kierunkami rozwoju silników spalinowych, tj. analizy procesu wtrysku i procesu roboczego w oryginalnej konstrukcji tłokowego silnika lotniczego z zapłonem samoczynnym. Podjęty problem naukowy został potraktowany w sposób szczegółowy i unikatowy. Zadania naukowe zostały zrealizowane bardzo starannie z wykorzystaniem współczesnych metod badawczych. Doktorant posiada wysokie umiejętności związane z planowaniem eksperymentów na hamowni silnikowej oraz zaawansowaną analizą matematyczną parametrów pracy tłokowych silników lotniczych. Podkreślić należy wysoki poziom merytoryczny i metodyczny rozprawy doktorskiej oraz wysoką dbałość o ścisłość wyrażania myśli. Przedstawiona praca ma bardzo dużą wartość użyteczną. Jej wyniki mogą być wykorzystane w przemyśle lotniczym, a także motoryzacyjnym. Reasumując, zakres pracy i poziom warsztatu naukowego przewyższa wartości uznawane powszechnie za standardowe.