

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Michała Białego

Metoda ograniczania spalania stukowego w silniku Wankla

Recenzję opracowano na podstawie pisma
Zastępcy Przewodniczącego ds. stopni naukowych
Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Lubelskiej
Dr hab. inż. Jarostawa Bieniasia
Pismo z dnia 8.10.2024

CHARAKTERYSTYKA I OCENA ROZPRAWY

W rozprawie podjęto tematykę badań spalania stukowego w silniku Wankla zasilanego paliwem wodorowym. Silnik Wankla charakteryzuje się wysokim stosunkiem generowanej mocy mechanicznej do pojemności komory spalania. Ponadto silniki z wirującym tłokiem mają mniejszą masę i wymiary w porównaniu z innymi silnikami o spalaniu wewnętrznym o zbliżonych parametrach eksploatacyjnych. Zasadniczą wadą silników Wankla jest mała sprawność ogólna oraz duża emisja szkodliwych składników spalin w odniesieniu do konwencjonalnych silników tłokowych. Komora spalania w silniku Wankla posiada nieregularny, płaski kształt, co utrudnia proces tworzenia mieszaniny palnej a w efekcie proces spalania. Smarowanie części ruchomych silnika realizowane jest przez dostarczany do komory spalania olej silnikowy, który spalany jest wraz z mieszaniną palną co generuje dużą emisję węglowodorów oraz cząstek stałych do atmosfery wraz z spalinami silnika Wankla. Aktualnie rozwój zasilania silników Wankla dotyczy zastosowania wodoru jako paliwa silnikowego. Szeroka granica palności wodoru umożliwia pracę silnika o zapłonie iskrowym na ubogiej mieszaninie palnej a duża prędkość spalania pozwala na pracę silnika z wysoką prędkością obrotową co prowadzi do zwiększenia mocy. Ponadto w przypadku wodoru, który ma bardzo małą odległość gaśnięcia, płomień może przemieszczać się bliżej ścianek komory bez wygaszenia, co umożliwia bardziej kompletne spalanie mieszaniny palnej. Dzięki temu w silnikach Wankla zasilanych wodorem można uzyskać większą sprawność ogólną oraz mniejszą emisję szkodliwych składników spalin. Jednocześnie zastosowanie wodoru w silnikach Wankla sprzyja występowaniu spalania stukowego. Spalanie stukowe prowadzi do zwiększenia strat ciepła, zwiększenia obciążeń termicznych i mechanicznych oraz zmniejszenia mocy silnika. Spalanie stukowe jest jednym z głównych ograniczeń zwiększania sprawności ogólnej oraz mocy tłokowych silników spalinowych o zapłonie iskrowym. W celu zmniejszenia spalania stukowego stosuje się różne technologie, takie jak zmniejszenie stopnia sprężania, wzbogacenie mieszaniny palnej oraz zastosowanie dodatków

przeciwstukowych i paliw alternatywnych. Jedną z metod ograniczenia spalania stukowego, jest wtrysk wody. Woda ze względu na swoje duże ciepło parowania może skutecznie zmniejszać temperaturę w cylindrze, zwiększając przy tym współczynnik napełnienia. Wtrysk wody do silnika można realizować poprzez wtrysk wody do kanału dolotowego, emulgację paliw zmieszanych z wodą oraz bezpośredni wtrysk wody do cylindra. Spalanie wodoru wolne jest od emisji węglowodorów, co sprawia, że jest to paliwo bardzo atrakcyjne w kontekście walki z globalnym ociepleniem i ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych. Zasilanie silnika Wankla paliwem wodorowym ma na celu stworzenie ekologicznej jednostki napędowej. Silnik Wankla w porównaniu z klasycznymi silnikami tłokowymi generuje znacząco mniejszy poziom wibracji. W połączeniu z zasilaniem w wodór, który spala się w niższej wartości temperatury oraz z większą szybkością, uzyskać można bardziej komfortową jednostkę napędową pod względem emisji hałasu, jak i drgań mechanicznych. W kontekście malejących zasobów paliw kopalnych, badania nad adaptacją wodoru jako paliwa do jednostek napędowych stały się istotnym kierunkiem rozwoju, nie tylko w motoryzacji.

Genezą rozprawy doktorskiej jest przekonanie autora, że istnieje metoda ograniczania zjawiska spalania stukowego w silniku Wankla. Indykowanie i analiza szybkozmiennych parametrów pracy jednostki napędowej pozwoli na wyznaczenie algorytmu zasilania wodorem i sterowania wtryskiem wody. Przeprowadzona analiza umożliwi zwiększenie stopnia napełnienia komory spalania paliwem gazowym, a tym samym zwiększy wykorzystanie / udział na rynku paliw alternatywnych, poprawiając ekologiczny wizerunek silników spalinowych.

Celem pracy jest opracowanie jakościowych i ilościowych charakterystyk wpływu kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla.

Tezą badawczą jest stwierdzenie, że istnieje wpływ kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla.

Zakres pracy obejmuje:

- Analizę stanu wiedzy o metodach wykrywania i ograniczania spalania stukowego oraz badaniach silnika Wankla zasilanych paliwem wodorowym, a także metodach wtrysku wody w silnikach spalinowych.
- Sformułowanie celu, tezy i zakresu pracy.
- Modernizację seryjnego silnika Wankla oraz modyfikacja stanowiska badawczego.
- Przeprowadzenie badań weryfikacyjnych zmodernizowanego silnika Wankla.
- Przeprowadzenie badań doświadczalnych silnika Wankla zasilanego wodorem obejmujących indykowanie i analizę spalania stukowego.
- Analizę wyników badań doświadczalnych.
- Ocenę realizacji pracy.

W literaturze naukowej brakuje badań łączących pośredni wtrysk wodoru, zmianę początku wtrysku oraz analizę skłonności do spalania stukowego w silnikach Wankla. Wynika to z kilku powodów: silniki Wankla są mniej popularne niż tłokowe, mają one specyficzny przebieg procesu spalania, różniący się od silników tłokowych. Ponadto wtrysk wodoru wiąże się z dodatkowymi wyzwaniem, zwłaszcza przy kontrolowaniu procesu spalania. Istnieją badania dotyczące zasilania wodorem, ale nie koncentrują się one na wpływie zasilania wodorem na spalanie stukowe. W związku z tym mgr inż. Michał Biały podjął się w swojej

rozprawie doktorskiej zbadania tego tematu, aby wypełnić lukę w nauce i dostarczyć cennych danych, które mogą mieć praktyczne zastosowanie w przyszłości, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym. Celem pracy było zbadanie wpływu wtrysku wody w czasie pracy silnika spalinowego na zdolność przeciwdziałaniu niekorzystnemu zjawisku jakim jest proces spalania stukowego. Postawiono hipotezę, że istnieje metoda ograniczania zjawiska spalania stukowego w silniku Wankla wykorzystująca wtrysk wody i dostrojenie kąta początku wtrysku wodoru. W rozprawie opisano adaptowany do badań silnik badawczy oraz zakres wykonanych prac adaptacyjnych na fabrycznej jednostce napędowej, do zasilania paliwem wodorowym. Przedstawiono także opis stanowiska badawczego oraz zakres realizowanych badań stanowiskowych. W celu zweryfikowania postawionej tezy naukowej przeprowadzono badania obiektu na hamowni silnikowej w warunkach ustalonych. W oparciu o uzyskane wyniki wykonano ich analizę statystyczną mającą na celu ocenę istotności czasu wtrysku wody na kąt wtrysku oraz analizę przebiegów wartości ciśnienia w komorze spalania. Wykazano, że kąt wtrysku wodoru istotnie wpływa na potrzebną ilość wody do redukcji spalania stukowego oraz, że zwiększenie kąta wyprzedzenia wtrysku wodoru prowadzi do zmniejszenia maksymalnego ciśnienia w komorze spalania. Stwierdzono także, że krótkie czasy wtrysku wody powodują niestabilne warunki spalania, podczas gdy długie czasy wtrysku poprawiają jego stabilność, zaś zwiększenie ilości wody wtryskiwanej do komory spalania może całkowicie wyeliminować spalanie stukowe.

Podjęcie i kontynuowanie prac w zakresie rozwoju niekonwencjonalnych silników o spalaniu wewnętrznym oraz możliwości zastosowania wodoru jako paliwa należy uznać za celowe i uzasadnione. Taki charakter i cel ma rozprawa doktorska Pana mgr inż. Michała Białego. Recenzowana praca ma charakter eksperymentalny. Badania zrealizowano w Katedrze Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych Politechniki Lubelskiej w Lublinie. Pracę wyróżnia wnikliwie przeprowadzona przez Autora analiza stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki rozprawy, autorska metoda badań w zakresie tematu rozprawy, zakres modernizacji seryjnego silnika Wankla, bardzo duży zakres prac technicznych i badań doświadczalnych, przygotowane stanowisko badawcze, postawione zadania badawcze, zastosowanie analizy statystycznej do opracowania wyników badań.

Całość podjętych i zrealizowanych działań wypełnia definicję oryginalnie rozwiązanego problemu naukowego.

Praca doktorska mgr inż. Michała Białego zawiera 141 strony maszynopisu, składa się z 6 rozdziałów, wykazu literatury, rysunków i tabel zawartych w tekście, wykazu ważniejszych symboli i oznaczeń oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Wykaz literatury zawiera 144 publikacje i wskazuje na bardzo dobrze przeprowadzoną przez Autora analizę stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki rozprawy.

W rozdziale pierwszym rozprawy (Stan wiedzy) Doktorant wskazuje, że w ostatnich latach głównym kierunkiem rozwoju silników Wankla jest zwiększenie sprawności cieplnej i ograniczenie emisji szkodliwych składników spalin. Można to uzyskać przez zastosowanie wodoru jako paliwa. Jednakże zastosowanie wodoru silnikach Wankla sprzyja występowaniu spalania stukowego. Spalanie stukowe jest jednym z głównych ograniczeń zwiększania sprawności cieplnej oraz mocy silników tłokowych spalinowych o zapłonie iskrowym. W celu zmniejszenia spalania stukowego stosuje się różne technologie, takie jak zmniejszenie stopnia sprężania, wzbogacenie mieszaniny palnej oraz zastosowanie dodatków przeciwstukowych i paliw alternatywnych. Jedną z metod jest wtrysk wody. Woda, ze względu na swoje duże ciepło parowania, może skutecznie zmniejszać temperaturę

w cylindrze, zwiększając przy tym efektywność objętościową silnika. Wtrysk wody do silnika można realizować na kilka sposobów: poprzez wtrysk wody do kanału dolotowego, emulgację paliw zmieszanych z wodą oraz bezpośredni wtrysk wody do cylindra. W badaniach nad technologią wtrysku wody w silnikach wewnętrznego spalania wykazano, że wtrysk wody do kanału dolotowego może skutecznie zmniejszać spalanie stukowe i zmniejszać temperaturę spalania.

W rozdziale drugim (Cel i zakres pracy) Doktorant omówił przedmiot pracy, myśl przewodnią pracy, cel pracy, tezę badawczą, zakres pracy i założenia badawcze. Przedmiotem pracy są badania stanowiskowe mające na celu wyjaśnienie wpływu wtrysku wody w czasie pracy silnika spalinowego na zdolność przeciwdziałaniu niekorzystnemu zjawisku jakim jest proces spalania stukowego. Myślą przewodnią niniejszej pracy jest przekonanie autora, że istnieje metoda ograniczania zjawiska spalania stukowego w silniku Wankla. Indykowanie i analiza szybkozmiennych parametrów pracy jednostki napędowej pozwoli na wyznaczenie algorytmu zasilania wodorem i sterowania wtryskiem wody. Celem pracy jest opracowanie jakościowych i ilościowych charakterystyk wpływu kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla. Teza badawcza to twierdzenie, że istnieje wpływ kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla. Jako obiekt badań wybrano silnik o pojedynczym wirującym tłoku, o zapłonie iskrowym, o oznaczeniu AXRO XR50. Silnik przystosowano do zasilania w paliwo wodorowe. Fabryczny układ zasilania gaźnikowego, megnetoindukcyjny układ zapłonowy oraz system smarowania mieszką zastąpiono elektronicznie sterowanym układem precyzyjnego dawkowania paliwa ciekłego, paliwa gazowego (dawki i kąta początku wtrysku), wody wtryskiwanej do układu dolotowego oraz oleju smarującego wtryskiwanego do układu dolotowego, a także opracowano elektroniczny układ zapłonowy.

W rozdziale trzecim (Adaptacja seryjnego silnika Wankla jako silnika badawczego) Autor rozprawy doktorskiej przedstawił opis obiektu badawczego. Omówiono podstawowe parametry i cechy konstrukcyjne seryjnego silnika Wankla oraz zakres jego modernizacji do postaci obiektu badawczego, a także podsumowanie wyników badań weryfikacyjnych obejmujących między innymi pomiar podstawowych parametrów pracy silnika i składu spalin. Adaptacja seryjnego silnika Wankla do badań nad wtryskiem wodoru i wody była konieczna, aby sprostać specyficznym wymaganiom badawczym, skoncentrowanym na ocenie wpływu tych technologii na sprawność ogólną silnika, emisję szkodliwych składników spalin oraz optymalizację procesu spalania celem ograniczenia spalania stukowego.

Rozdział czwarty (Stanowisko badawcze) Doktorant przedstawił szczegółowo stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono eksperymenty dotyczące pracy silnika Wankla. W części silnikowej znajdują się wszystkie elementy związane bezpośrednio z pracą jednostki napędowej, takie jak hamulec dynamometryczny, układy zasilania, chłodzenia i smarowania, a także układ odprowadzania spalin oraz różne czujniki i urządzenia pomiarowe. Część sterownicza natomiast zawiera układy rejestrujące i sterujące, które pozwalają na monitorowanie oraz kontrolowanie pracy silnika w trakcie badań.

Rozdział piąty (Badania stanowiskowe) zawiera opis przebiegu oraz wyniki badań na stanowisku dynamometrycznym, mających na celu określenie wpływu kąta początku wtrysku paliwa gazowego oraz wtrysku wody na proces spalania stukowego w silniku Wankla. Przedstawiono założenia badawcze i planu eksperymentu, który zakładał badanie silnika w warunkach ustalonych przy różnych kątach wtrysku wodoru oraz wtrysku wody,

z jednoczesnym pomiarem parametrów takich jak ciśnienie w komorze spalania, temperatura mieszaniny palnej. Celem tych badań było zidentyfikowanie optymalnych ustawień wtrysku wodoru i wody, które minimalizują zjawisko spalania stukowego, a także ocena efektywności chłodzenia komory spalania przez wtrysk wody.

W rozdziale szóstym (Podsumowanie i wnioski) Doktorant mgr inż. Michał Biały przedstawił podsumowanie, wnioski i najważniejsze wyniki osiągnięte w czasie realizacji pracy doktorskiej.

Główne osiągnięcia pracy doktorskiej mgr inż. Michała Białego:

1. W części opisowej pracy usystematyzowano wiedzę na temat możliwości i ograniczeń wynikających z indywidualnych cech silnika Wankla, metod i pomiarów spalania stukowego i możliwości jego ograniczenia w silniku Wankla. Omówiono zjawisko spalania stukowego, możliwość zastosowania wodoru jako paliwa w silnikach o zapłonie iskrowym, metody wykrywania i ograniczania spalania stukowego, badania wtrysku wody w silniku spalinowym.

2. Zaprojektowano i wykonano autorską modyfikację seryjnego silnika Wankla do badań nad wtryskiem wodoru i wody, aby sprostać specyficznym wymaganiom badawczym, skoncentrowanym na ocenie wpływu tych technologii na sprawność silnika, emisję szkodliwych składników spalin oraz optymalizację procesu spalania. Modyfikacji poddano seryjnie produkowany silnik Aixro XR50, wyposażony w gaźnikowy układ zasilania i magnetoindukcyjny układ zapłonowy, przystosowany do zasilania benzyną silnikową. W ramach adaptacji, gaźnikowy układ zasilania został zastąpiony pośrednim układem wtryskowym, co umożliwiło precyzyjne dozowanie wodoru jako paliwa. Wtrysk wody został wprowadzony w celu zmniejszenia temperatury spalania, co miało na celu zarówno ograniczenie ryzyka samozapłonu mieszaniny palnej, jak i redukcję emisji tlenków azotu, które są silnie zależne od temperatury spalania. Układ smarowania został przystosowany do wtryskiwania oleju bezpośrednio do kolektora dolotowego. Konwencjonalny magnetoindukcyjny układ zapłonowy o stałym kącie wyprzedzenia zapłonu zastąpiony został elektronicznym układem zapłonowym. Za integrację czujników pomiarowych oraz urządzeń wykonawczych odpowiedzialna była zaprojektowana i wykonana elektroniczna jednostka sterująca. Proces sterowania układem wtrysku wodoru, układem wtrysku wody i układem zapłonowym realizował opracowany w ramach realizacji pracy algorytm sterujący zapisany w pamięci jednostki sterującej pracą obiektu badawczego. Regulacja czasu wtrysku paliwa odbywała się na podstawie sygnału ilości powietrza dostarczanego do silnika i sygnału prędkości obrotowej silnika przy uwzględnieniu sygnałów z czujników pomiarowych.

3. Opracowano odpowiednią (autorską) metodykę badań spalania stukowego wykorzystującego sygnał z piezoelektrycznych czujników ciśnienia w komorze spalania. Ze względu na specyficzny kształt komory spalania silnika Wankla do pomiaru wartości przebiegu ciśnienia wewnątrz cylindra wykorzystano trzy identyczne czujniki ciśnienia. Rozmieszczenie czujników wynikało z konieczności dokonywania pomiaru ciśnienia dla pojedynczej komory spalania w czasie obrotu wirnika, zaś uwarunkowane zostało strukturą bloku i wirnika silnika. W czasie badań, najważniejszym sygnałem, który został poddany analizie, był sygnał z trzech czujników ciśnienia indykowanego. Sygnały te zarejestrowano dla 416 kolejnych cykli roboczych pracy silnika badawczego. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej w celu oceny wpływu kąta wtrysku wodoru na ilość wtryskiwanej wody do komory spalania, niezbędnej do ograniczenia spalania stukowego. W tym celu

zastosowano metodę regresji wielomianowej trzeciego stopnia, która pozwala na modelowanie złożonych, nieliniowych zależności między zmiennymi. Analiza ta wykazała, że istnieje istotny wpływ kąta wtrysku wodoru na ilość wtryskiwanej wody.

Uzyskane wyniki badań i ich analiza pozwoliły sformułować następujące główne wnioski.

1. Precyzyjne dobranie kąta początku wtrysku wodoru pozwala na znaczące zmniejszenie ilości wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla. Optymalizacja tego kąta wpływa na lepsze wymieszanie wodoru z powietrzem, co zmniejsza maksymalne wartości ciśnienia w komorze spalania.

2. Zmiana kąta początku wtrysku wodoru ma istotny wpływ na przebieg ciśnienia w komorze spalania oraz moment obrotowy generowany przez silnik Wankla. Optymalizacja kąta wtrysku pozwala na uzyskanie bardziej stabilnego przebiegu ciśnienia, co skutkuje zwiększeniem momentu obrotowego przy jednoczesnym zmniejszeniu ryzyka spalania stukowego.

3. Potwierdzono przyjętą hipotezę badawczą zakładającą, że istnieje metoda ograniczania zjawiska spalania stukowego w silniku Wankla. Zrealizowano cel pracy jakim było opracowanie jakościowych i ilościowych charakterystyk wpływu kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla.

4. Zaproponowana metodyka badawcza pozwoliła na udowodnienie tezy pracy, że istnieje wpływ kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla

Podsumowując, osiągnięcia Doktoranta Michała Białego świadczą o jego zaangażowaniu w rozwój nauki i techniki, a także o jego znaczącym wkładzie w badania nad ekologicznymi i efektywnymi rozwiązaniami dla przemysłu motoryzacyjnego i energetycznego. Praca doktorska mgr inż. Michała Białego stanowi wartościowy wkład w rozwój metod badań tłokowych silników spalinowych z wykorzystaniem różnych systemów pomiarowych w warunkach laboratoryjnych. Autor ma dużą wiedzę teoretyczną oraz umiejętności praktyczne w zakresie badań eksperymentalnych w obszarze układów napędowych środków transportu i maszyn roboczych i poprawy efektywności energetycznej silników spalinowych.

Badania silników spalinowych wymagają bardzo dużego zaangażowania i przygotowania technicznego a także indywidualnego dopasowania warunków stanowiskowych do obiektu badań. W tym zakresie mgr inż. Michał Biały z zespołem uczestniczącym w badaniach, podjął i zrealizował duże wyzwanie organizacyjne i działania techniczne.

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 opartych o silniki tłokowe zwłaszcza, że ich parametry eksploatacyjne w tym wpływ na środowisko naturalne, 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 może być wykorzystany

dla innych rodzajów napędów środków transportu drogowego i maszyn roboczych, co powoduje, że praca ma charakter uniwersalny, rozwojowy.

Po zapoznaniu się z rozprawą nasuwają się następujące spostrzeżenia.

Istotnym osiągnięciem Autora rozprawy doktorskiej jest modernizacja seryjnego silnika Wankla do postaci obiektu badawczego wyposażonego w elektronicznie sterowane układy zapłonowy, wtrysku benzyny, wodoru i wody. Ponadto w ramach modernizacji przygotowano silnik do indykowania.

1. Po modernizacji przeprowadzono badania doświadczalne weryfikacyjne obejmujące pomiar podstawowych parametrów pracy silnika oraz pomiar wybranych składników spalin. Jakie urządzenia pomiarowe zastosowano do pomiaru składników spalin? Jak pobierano spaliny do pomiaru?

2. Do pomiaru ciśnienia w przestrzeni roboczej silnika zastosowano trzy przetworniki piezoelektryczne firmy AVL zamontowane w bloku silnika. W jaki sposób dokonano superpozycji sygnału z czujników ciśnienia do postaci wykresu przebiegu ciśnienia w funkcji położenia wału korbowego w jednej przestrzeni roboczej silnika?

3. Położenie wału korbowego podczas indykowania określano na podstawie sygnału z przetwornika magnetycznego rejestrującego położenie wieńca zębatego na kole zamachowym silnika. Dlaczego nie zastosowano dedykowanego do indykowania optycznego nadajnika położenia wału korbowego firmy AVL? Jaki jest wpływ zastosowanego rozwiązania na dokładność indykowania?

PODSUMOWANIE

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Białego jest wartościowym i aktualnym opracowaniem o charakterze badawczo-naukowym i użytkowym, która wnosi istotne treści poznawcze i wskazuje nowe kierunki rozwoju i doskonalenia oraz badań tłokowych silników spalinowych z wykorzystaniem nowoczesnych systemów pomiarowych w warunkach laboratoryjnych. Całość podjętych i zrealizowanych działań wypełnia definicję oryginalnie rozwiązanego problemu naukowego.

Zrealizowane badania i ich wnikliwa analiza potwierdziły sformułowaną w rozprawie doktorskiej tezę badawczą: Istnieje wpływ kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla. Zrealizowano cel pracy: Opracowano jakościowe i ilościowe charakterystyki wpływu kąta początku pośredniego wtrysku wodoru na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego w silniku Wankla.

Podjęcie i kontynuowanie prac w zakresie rozwoju niekonwencjonalnych silników o spalaniu wewnętrznym oraz możliwości zastosowania wodoru jako paliwa należy uznać za celowe i uzasadnione. **Pracę wyróżnia zakres i wnikliwość analizy stanu wiedzy w dziedzinie rozwoju i badań silnika Wankla oraz zagadnienia spalania stukowego w silnikach tłokowych, autorska metoda badań procesu spalania w silniku Wankla z wykorzystaniem trzech czujników piezoelektrycznych, przygotowanie stanowiska badawczego w tym układów rejestracji i akwizycji danych pomiarowych, modernizacja układu zasilania i sterowania seryjnego silnika Wankla, bardzo duży zakres badań doświadczalnych, postawione zadania badawcze, sposób opracowania wyników badań**

z zastosowaniem analizy statystycznej, wnikliwa i krytyczna analiza wyników badań, opis i wnioskowanie na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań prezentowanych w postaci wykresów i tabel.

WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Białego *Metoda ograniczania spalania stukowego w silniku Wankla* mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

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

Całość podjętych i zrealizowanych działań Doktoranta wypełnia definicję oryginalnie rozwiązanego problemu naukowego.

Stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Michała Białego rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* w zakresie rozpraw doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony rozprawy przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej.

Jacek Nowakowski