

Uniwersytet Bielsko-Bialski

Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Janusza Chojnowskiego

Badania układu zasilania dwupaliwowego do modernizacji silników spalinowych pojazdów ciężarowych

Recenzję opracowano na podstawie pisma
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej
Inżynieria Mechaniczna
Prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego
Pismo z dnia 21.05.2024

CHARAKTERYSTYKA I OCENA ROZPRAWY

W rozprawie podjęto tematykę modernizacji tłokowych silników o zapłonie samoczynnym do ciężkiej trakcji drogowej do zasilania dwupaliwowego olejem napędowym ON i sprężonym gazem ziemnym CNG. Analizie poddano zagadnienia ekonomiczne, techniczne, bezpieczeństwo oraz oczekiwania rynku odbiorców w zakresie zasilania dwupaliwowego. Omówiono paliwa stosowane do zasilania dwupaliwowego w trakcji drogowej. Główną częścią pracy są wyniki oraz analiza badań autorskiej instalacji dwupaliwowej silników o ZS do ciężkiej trakcji drogowej. Całość podjętych i zrealizowanych działań wypełnia definicję oryginalnie rozwiązane problemu naukowego.

Rozprawa powstała w czasie realizacji wewnętrznych Uczelnianych Grantów Badawczych Wojskowej Akademii Technicznej, realizowanych w Zakładzie Silników i Inżynierii Eksploatacji oraz w ramach prac realizowanych w projekcie finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju Mazowsze/0123/19-00 „Innowacyjna ekologiczna instalacja CNG do silników wysokoprężnych ograniczająca emisję szkodliwych składników spalin wraz z mobilnym stanowiskiem diagnostyczno-montażowym”. Realizatorem projektu NCBiR było konsorcjum składające się z Wydziału Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej oraz firmy Gaslux sp. z o.o., która była liderem projektu.

Cele użyteczne to badania atrakcyjności rynkowej i gotowości do modernizacji, przegląd rozwiązań technologicznych i niezbędnych modyfikacji mechanicznych dla silników dwupaliwowych, wytypowanie paliw niskoemisyjnych do nowoczesnych rozwiązań dwupaliwowych, opracowanie narzędzi i wskazanie kluczowych obszarów badań i rozwoju nad modernizacją silników o ZS do ciężkiej trakcji drogowej do zasilania dwupaliwowego.

Cel naukowy to opracowanie koncepcji i badania weryfikacyjne konwencjonalnej instalacji dwupaliwowej CDF (Conventional Dual Fuel) zasilanej gazem ziemnym i olejem napędowym ON/CNG o średnim współczynniku zastąpienia przekraczającym 50% w pełnym zakresie obciążeń silnika realizowanych na hamowni silnikowej, podwoziowej oraz w warunkach drogowych.

W trakcie prób na stanowiskach dynamometrycznych rejestrowano parametry pracy silnika oraz zawartość składników spalin: tlenek węgla, dwutlenek węgla, węglowodory, tlenki azotu i zadymienie spalin. Praca ma charakter eksperymentalny, badania przeprowadzono w laboratoriach i hamowniach silnikowych i podwoziowych Zakładu Silników i Inżynierii Eksploatacji WAT oraz w warunkach drogowych.

Na przestrzeni 150 lat rozwoju silników spalinowych zagadnienia dotyczące niezawodności silników są jednym z głównych celów działań konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych. Jednocześnie w transporcie drogowym dominuje dążenie do budowy jednostek o dużej koncentracji mocy. Aby to uzyskać w dziedzinie napędów do ciężkiej trakcji drogowej często sięgano po rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne niespotykane w innych zastosowaniach silników spalinowych. 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 tłokowych nowe możliwości. Obecnie w transporcie drogowym, tak jak i w innych dziedzinach transportu, rozwój jak i modernizacja układów napędowych jest zdeterminowany wymaganiami dotyczącymi ograniczenia negatywnego wpływu masowego transportu na środowisko naturalne.

Podjęcie działań w zakresie opracowania systemu sterowania i zasilania olejem napędowym ON i sprężonym gazem ziemnym CNG dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym do ciężkiej trakcji drogowej było i jest celowe. Zastosowanie dwupaliwowego systemu zasilania ON/CNG w silnikach o zapłonie samoczynnym to jeden z kierunków rozwoju układów napędowych środków transportu drogowego, zwłaszcza ciężkiej trakcji drogowej. Główne korzyści wynikające z zasilania ON/CNG to:

- zastosowanie paliwa alternatywnego w stosunku do oleju napędowego pochodzenia mineralnego,
- ograniczenie emisji dwutlenku węgla, tym samym ograniczenie efektu cieplarnianego,
- ograniczenie kosztów transportu drogowego, to jednak zależy od relacji ceny CNG w odniesieniu do ON.

Wyniki realizacji projektu mogą być wykorzystane w realiach polskiej gospodarki zwłaszcza w zakresie ciężkiej trakcji drogowej, przy uwzględnieniu relacji ceny CNG w odniesieniu do ON. Głównym aspektem społecznym jest ograniczenie negatywnego wpływu transportu drogowego na środowisko naturalne.

Spełnienie wymagań stawianych współczesnym napędom do ciężkiej trakcji drogowej może się odbywać na drodze badań doświadczalnych, jak również badań symulacyjnych. Recenzowana praca jest przykładem pracy badawczej. Pracę wyróżnia wnikliwa analiza stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy oraz bardzo duży zakres badań doświadczalnych, przygotowane stanowiska badawcze, postawione zadania badawcze, sposób opracowania wyników badań. Przeprowadzona analiza stanu wiedzy wykazała, że celowe jest podjęcie badań dotyczących układu zasilania dwupaliwowego do modernizacji silników spalinowych o ZS, a prace badawcze w tym obszarze podejmowane są przez producentów oraz instytucje naukowe.

Praca doktorska mgr inż. Janusza Chojnowskiego zawiera 299 stron maszynopisu, składa się z trzech głównych sekcji:

- I. Streszczenia rozprawy doktorskiej – 97 stron.
- II. Cyklu 12 powiązanych tematycznie artykułów naukowych stanowiących rozprawę doktorską – 198 stron.
- III. Wykazu dorobku naukowego Doktoranta – 4 strony.

Działalność naukowa Doktoranta w latach 2021 – 2024 jest podstawą oryginalnego osiągnięcia naukowego w postaci cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych będących rozprawą doktorską „Badania układu zasilania dwupaliwowego do modernizacji silników spalinowych pojazdów ciężarowych”.

Cykl publikacji przedstawiający zrealizowane przez Doktoranta prace dotyczące analizy stanu wiedzy oraz podjęte badania doświadczalne obejmuje dziesięć artykułów opublikowanych w cenionych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym oraz dwa recenzowane materiały zaprezentowane na międzynarodowej konferencji naukowej. Sumaryczna liczba uzyskanych punktów MEiN to 930, artykuły zacytowano 57. Całkowity sumaryczny Impact Factor cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe wynosi $IF=12,8$ (stan na 06.05.2024).

Sekcja I stanowiąca streszczenie rozprawy doktorskiej podzielona jest na siedem rozdziałów. Rozdział pierwszy obejmuje wprowadzenie i uzasadnienie podjęcia badań. Drugi rozdział zawiera szczegółową analizę stanu wiedzy z naciskiem na aspekty ekologiczne i ograniczenia, analizy rynkowe, bezpieczeństwo oraz systemy spalania dwupaliwowego CDF i RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition). Trzeci rozdział przedstawia główne cele i zakres pracy. Czwarty rozdział koncentruje się na analizie wykorzystania paliw niskoemisyjnych w nowoczesnych systemach dwupaliwowych, omawiając wybrane paliwa oraz ich zasadność użycia. W piątym rozdziale, będącym kluczowym dla pracy ze względu na aspekt naukowy, przedstawiono wyniki badań własnych dotyczących instalacji CDF CNG/ON, realizowanych na różnych stanowiskach badawczych oraz w warunkach drogowych. Badania te zostały podzielone na etapy zgodnie z miejscem ich realizacji: badania na hamowni silnikowej, badania na hamowni podwoziowej oraz badania drogowe. Szósty rozdział to analiza wyników badań w aspekcie dalszych działań dotyczących przyszłości modernizacji silników o ZS do zasilania dwupaliwowego CDF. Siódmy rozdział to wnioski końcowe, podsumowujące całość pracy i zalecenia dla przyszłych badań i implementacji. W sekcji I zawierają się: odnośniki do sekcji II (A1, A2, itd.) rozszerzające treść poruszoną w streszczeniu, wykaz literatury streszczenia, 35 rysunków zawartych w tekście, 9 tabel oraz wykaz skrótów i symboli.

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

Sekcja II zawierająca cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych stanowiących rozprawę doktorską „Badania układu zasilania dwupaliwowego do modernizacji silników spalinowych pojazdów ciężarowych” rozpoczyna się od danych bibliometrycznych zbioru oraz spisu ww. cyklu publikacji. Następnie zaprezentowano podział procentowy wkładu pracy współautorów w poszczególne publikacje. Dalej chronologicznie zgodnie z datą publikacji zaprezentowano treść poszczególnych publikacji:

- Artykuł A1 pt. "Potencjał HVO jako biopaliwa wysokoreaktywnego w dwupaliwowych układach zasilania" opublikowany w Biuletynie WAT przez Janusza Chojnowskiego i Patrycję Nogas omawia potencjał hydrotworzonego oleju roślinnego (HVO) jako paliwa ekologicznego w silnikach z zapłonem samoczynnym (ZS) oraz w nowoczesnych rozwiązaniach dwupaliwowych. W kontekście dążenia do redukcji emisji gazów cieplarnianych, HVO przedstawia się jako korzystna alternatywa dla tradycyjnego oleju napędowego, charakteryzując się niższą zawartością węgla i lepszymi właściwościami fizykochemicznymi. Badania wykazują, że HVO, dzięki swojej wysokiej reaktywności i stabilności chemicznej, może skutecznie redukować emisje CO₂, NO_x, HC i cząstek stałych. Ponadto, jego właściwości niskotemperaturowe przewyższają te, które wykazują tradycyjne paliwa. Paliwo HVO posiada potencjał do znacznego zmniejszenia emisji szkodliwych substancji oraz poprawy efektywności silników spalinowych, co czyni go atrakcyjnym biopaliwem w kontekście współczesnych wymagań ekologicznych i technologicznych.
- Artykuł A2 pt. "A Review of Low-CO₂ Emission Fuels for a Dual-Fuel RCCI Engine" opublikowany w czasopiśmie Energies przez Janusza Chojnowskiego, Mirosława Karczewskiego i Grzegorza Szamreja analizuje potencjał wykorzystania paliw o niskiej emisji CO₂ w dwupaliwowych silnikach RCCI. Autorzy podkreślają znaczenie paliw wzbogaconych wodorem oraz biopaliw, takich jak HVO i HCNG, które mogą znacząco redukować emisję gazów cieplarnianych. Paliwa te, dzięki swoim właściwościom, mogą sprostać rosnącym wymaganiom dotyczącym ograniczenia emisji spalin. W kontekście RCCI, niskotemperaturowe spalanie pozwala na redukcję emisji NO_x i cząstek stałych, przy jednoczesnym zwiększeniu sprawności ogólnej silników. Silniki RCCI wykorzystują dwie różne frakcje paliwowe – jedną o wysokiej reaktywności i drugą o niskiej reaktywności, co umożliwia kontrolowane spalanie i poprawę efektywności. Artykuł podkreśla znaczenie geometrii komory spalania oraz strategii wtrysku paliwa w optymalizacji pracy silnika RCCI.
- Artykuł A3 pt. "Safety in the use of car gas fuel installations" autorstwa Janusza Chojnowskiego opublikowany w czasopiśmie Combustion Engines analizuje aspekty bezpieczeństwa związane z instalacjami gazowymi w pojazdach, koncentrując się na LPG (Liquefied Petroleum Gas) i CNG (Compressed Natural Gas). Podkreśla, że prawidłowo zaprojektowane i zainstalowane systemy gazowe, zgodne z regulacjami UNECE, minimalizują ryzyko wypadków i zapewniają bezpieczne użytkowanie. Instalacje gazowe muszą być montowane wyłącznie przez uprawnione warsztaty, a każdy element, od zbiorników po zawory bezpieczeństwa, jest szczegółowo testowany pod kątem wytrzymałości i odporności na uszkodzenia. Zbiorniki gazowe wykonane z wytrzymałych materiałów są poddawane testom ciśnienia, odporności na ogień i uderzenia, co zapewnia ich bezpieczeństwo nawet w ekstremalnych warunkach. W artykule omówiono również metody montażu zbiorników gazowych, które muszą wytrzymać siły inercji podczas kolizji, a ich prawidłowe mocowanie jest kluczowe dla bezpieczeństwa.
- Artykuł A4 "Analysis of the market structure of long-distance transport vehicles in the context of retrofitting diesel engines with modern dual-fuel systems" opublikowany w czasopiśmie Combustion Engines przez Janusza Chojnowskiego i Mirosława Karczewskiego analizuje strukturę rynku pojazdów do ciężkiej trakcji drogowej w Polsce, koncentrując się na możliwości adaptacji nowoczesnych systemów dwupaliwowych w silnikach o ZS. Autorzy zauważają, że rozwój elektroniki oraz systemów wtrysku wysokociśnieniowego, takich jak Common Rail i jednostki pompowtryskiwaczy, umożliwia skuteczne wykorzystanie rozwiązań dwupaliwowych oraz technologii RCCI. Artykuł przedstawia strukturę wieku i marek ciągników siodłowych w Polsce, wskazując, że

większość pojazdów używanych w transporcie międzynarodowym ma nie więcej niż 7 lat, a w transporcie krajowym nie więcej niż 15 lat. Omówiono główne marki pojazdów, takie jak DAF, Scania, MAN, Volvo, Mercedes-Benz, Renault i Iveco, oraz ich systemy zasilania paliwem. Podsumowując, artykuł wskazuje na gotowość rynku do adaptacji nowoczesnych systemów dwupaliwowych, które mogą stanowić pomost do pełnego przejścia na alternatywne źródła energii, takie jak napędy wodorowe czy elektryczne.

- W materiale konferencyjnym NAŠE MORE - A5 pt. „The phenomenon of knocking combustion and the impact on the fuel exchange and the output parameters of the diesel engine operating in the dual-fuel mode (Diesel-CNG)” omówiono zjawisko spalania stukowego w silnikach o ZS pracujących w trybie dwupaliwowym ON/CNG. W badaniu przeprowadzono eksperymenty z wykorzystaniem sekwencyjnego systemu wtrysku gazu CNG przed zaworem dolotowym w sześciocyndrowym, turbodoładowanym silniku rzędownym, co pozwoliło na znaczące zwiększenie współczynnika zastępowania paliwa. W celu redukcji intensywności stuków zaleca się m.in. obniżenie temperatury mieszaniny, opóźnienie wtrysku pilotażowego oraz zmniejszenie stopnia sprężania. Autorzy wskazują, że najbardziej ekonomiczną metodą zmniejszania ciśnienia doładowania w omawianym przypadku jest zastosowanie obejścia (bypassu) w układzie dolotowym silnika.

- Materiał konferencyjny NAŠE MORE – A6 pt. „Solution of CNG and LNG supply systems in modern land and marine CI engines working in dual-fuel (NG-Diesel Mode)” omawia nowoczesne rozwiązania systemów zasilania silników dwupaliwowych zasilanych olejem napędowym i gazem ziemnym w formie CNG i LNG (Liquefied Natural Gas), stosowane w silnikach spalinowych na lądzie i morzu. Wprowadzenie alternatywnych paliw jest kluczowe w obliczu rosnących wymagań dotyczących emisji spalin. Silniki zasilane gazem ziemnym mogą spełniać te wymagania dzięki wysokiej sprawności ogólnej i ograniczeniu emisji szkodliwych substancji. W artykule omówiono różne metody dostarczania paliwa do komory spalania, w tym systemy z wtryskiem pośrednim i bezpośrednim.

- Artykuł A7 pt. „A review of technical solutions for RCCI engines” analizuje techniczne rozwiązania dla silników pracujących w trybie dwupaliwowym, koncentrując się na metodzie Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI). Autorzy podkreślają, że silniki te wymagają idealnego zmieszania powietrza z paliwem oraz precyzyjnego momentu zapłonu, co stanowi poważne wyzwanie techniczne. Omawiane są różne systemy zapłonu w silnikach spalinowych oraz ich ewolucja, a także wpływ rodzaju paliwa na emisję spalin. Szczególną uwagę zwrócono na koncepcje takie jak Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) i Partial Premixed Compression Ignition (PPCI), które mimo zalet mają ograniczenia techniczne. Autorzy przedstawiają także specyfikę systemów zasilania dwupaliwowego, w tym Dual-Fuel Direct Injection (DDFS), gdzie oba paliwa są wtryskiwane bezpośrednio do komory spalania. Artykuł zawiera przegląd technicznych modyfikacji koniecznych do adaptacji silników na tryb RCCI, takich jak zmiana kształtu komory spalania czy strategii wtrysku paliwa.

- Artykuł A8 pt. „Experimental Assessment of the Impact of Replacing Diesel Fuel with CNG on the Concentration of Harmful Substances in Exhaust Gases in a Dual Fuel Diesel Engine” opublikowany w czasopiśmie Energies analizuje wpływ zastąpienia oleju napędowego sprężonym gazem ziemnym na emisję szkodliwych substancji w spalinach silnika dwupaliwowego. Badania przeprowadzono na silniku D13C460 (o mocy 338 kW) z ciężarówki Volvo FH13, który został wyposażony w innowacyjny system zasilania CNG.

Wyniki wykazały, że zastąpienie oleju napędowego CNG znacząco zmniejsza emisję CO₂, jednak zwiększa stężenie CH₄, NO₂ i CO. Temperatura spalin wzrosła, co sugeruje zmiany w procesie spalania. Analiza emisji wykazała, że największe obniżenie stężenia CO₂ występuje przy wysokich wartościach zastąpienia, podczas gdy najwyższe stężenia CO obserwowano przy małych do średnich wartościach zastąpienia.

- Artykuł A9 pt. „Influence of the Working Parameters of the Chassis Dynamometer on the Assessment of Tuning of Dual-Fuel Systems” opublikowany w czasopiśmie *Energies* przez Janusza Chojnowskiego i Mirosława Karczewskiego analizuje wpływ parametrów pracy hamowni podwoziowej na ocenę regulacji systemów dwupaliwowych. Autorzy podkreślają znaczenie zastosowania hamowni podwoziowej w procesie kalibracji ciężarówek zasilanych dwupaliwowo, wskazując na konieczność odpowiedniego doboru danych technicznych pojazdu, zakresu pracy silnika oraz wartości wymuszonego obciążenia osi napędowej pojazdu. Badania wykazały, że nieprawidłowe ustawienia tych parametrów mogą prowadzić do znacznych błędów pomiarowych, wpływając na dokładność wyników strojenia. Metodologia badań obejmowała konfigurację pojazdu w oprogramowaniu hamowni, wybór odpowiedniego zakresu pracy silnika oraz analizę wpływu obciążenia osi na wyniki testów.
- Artykuł A10 pt. „The Concept of a Mobile Automated Diagnostic and Dynamometer Station for Heavy Trucks” opublikowany w *Combustion Engines* autorstwa Janusza Chojnowskiego przedstawia nowoczesne podejście do diagnostyki i kalibracji dużych pojazdów ciężarowych. W artykule omówiono koncepcję mobilnej, zautomatyzowanej stacji diagnostycznej i hamowni, opracowanej na Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Stacja ta, zbudowana na bazie kontenera o standardowych wymiarach, umożliwia przeprowadzenie zaawansowanych testów i diagnostyki bezpośrednio w miejscu użytkowania pojazdów, co znacznie zmniejsza koszty i czas związany z koniecznością transportu pojazdów do stacjonarnych stacji testowych. Stacja jest wyposażona w otwarty system sprzętowy i programowy pozwalający na precyzyjne pomiary wydajności i efektywności układu napędowego pojazdu, a także na przeprowadzanie automatycznych procesów diagnostycznych, analogicznych do testów jakości podczas produkcji.
- Artykuł A11 pt. „Dual-fuel engines using hydrogen-enriched fuels as an ecological source of energy for transport, industry and power engineering” opublikowany w czasopiśmie *Combustion Engines* autorstwa Janusza Chojnowskiego, Mirosława Karczewskiego i Grzegorza Szamreja analizuje potencjał silników dwupaliwowych zasilanych paliwami wzbogaconymi wodorem jako ekologicznego źródła energii. Przedstawiono możliwość zastosowania wodoru oraz paliw z dodatkiem wodoru (HCNG i HVO) do zasilania silników spalinowych w sektorze transportu, przemysłu i energetyki, co pozwala na znaczne obniżenie emisji CO₂. Autorzy opisują mechanizmy działania silników dwupaliwowych szczególnie w kontekście technologii Reactivity Controlled RCCI, która zapewnia wyższą sprawność ogólną i ograniczenie emisji składników szkodliwych spalin w porównaniu z tradycyjnymi silnikami o zapłonie iskrowym i samoczynnym. Zastosowanie paliw takich jak HCNG i HVO, pochodzących z odnawialnych źródeł energii, dodatkowo obniża ślad węglowy tych rozwiązań.
- Artykuł A12 pt. „Multi-Criteria Analysis of Semi-Trucks with Conventional and Eco-Drives on the EU Market” z czasopisma *Energies* autorstwa Janusza Chojnowskiego i Tadeusza Dziubaka dokonuje porównawczej analizy teoretycznej eksploatacyjnych cech ciągników siodłowych napędzanych elektrycznie oraz z wykorzystaniem silników spalinowych na olej napędowy, hydrorafinowany olej roślinny (HVO) i metan (w tym

biometan) w konfiguracji dwupaliwowej. Wybrane do analizy modele to Volvo FH Electric, Volvo FH500 w konfiguracji dwupaliwowej oraz Volvo FH500TC Diesel Euro VI. Badania wykazały, że napęd elektryczny jest wysoce efektywny w warunkach miejskich i podmiejskich, podczas gdy pojazdy z silnikami spalinowymi zasilanymi paliwami odnawialnymi są bardziej odpowiednie do długodystansowego transportu o dużym zużyciu energii. Artykuł podkreśla, że elektryczne ciągniki siodłowe charakteryzują się wyższymi kosztami zakupu, jednak ich niższe koszty eksploatacyjne oraz możliwość regeneracji energii podczas hamowania mogą w dłuższej perspektywie przynieść oszczędności.

Główne osiągnięcia pracy doktorskiej mgr inż. Janusza Chojnowskiego:

- Określenie potencjału rynkowego w zakresie procesu modyfikacji używanych silników o ZS do ciężkiej trakcji drogowej w zasilanie dwupaliwowe jako szansy dla polskiego rynku transportu drogowego oraz rynku polskich instalacji zasilania gazowego.
- Wytypowanie paliw pochodzenia biologicznego z domieszkami wodoru jako najbardziej perspektywicznej pary paliw do zastosowań dwupaliwowych.
- Wykonanie demonstratora technologii w postaci instalacji CDF o dużej wymianie paliw.
- Potwierdzenie empiryczne w warunkach drogowych możliwości osiągnięcia wymiany paliw w układzie dwupaliwowym CDF w przedziale od >50%~85%.
- Określenie perspektyw dalszego rozwoju i działań naukowych dotyczących układów zasilania dwupaliwowego CDF i RCCI.

Uzyskane wyniki analiz i badań pozwoliły sformułować następujące główne wnioski:

- Modernizacja silników o zapłonie samoczynnym pojazdów ciężkiej trakcji drogowej do zasilania dwupaliwowego może stanowić jedną z możliwości realizacji strategii ekologicznych.
- Używane pojazdy ciężarowe dostępne na rynku są technologicznie przygotowane do procesu modernizacji na nowoczesne zasilanie dwupaliwowe.
- Instalacje dwupaliwowe do zasilania gazowego charakteryzują się wyższymi poziomami bezpieczeństwa eksploatacji w porównaniu z rozwiązaniami konwencjonalnymi oraz pojazdami BEV (Battery Electric Vehicle).
- Wykazano możliwość średniej rzeczywistej wymiany paliw powyżej 50% w pełnym zakresie obciążeń oraz do 90% chwilowego zastąpienia. Możliwe jest osiągnięcie fabrycznych lub wyższych wartości momentu obrotowego podczas pracy dwupaliwowej.
- Zaobserwowano obniżenie emisji CO₂ w gazach spalinowych.
- Konieczne jest podjęcie prac nad systemami oczyszczania spali zwłaszcza mających na celu neutralizację metanu CH₄ w gazach spalinowych emitowanych do atmosfery.

W sekcji III pracy opisano dorobek naukowy mgr inż. Janusza Chojnowskiego. Badania prowadzone przez Doktoranta zostały wyróżnione licznymi nagrodami, w tym zajęciem 2. miejsca w konkursie BASF Poland „Drive Innovation” oraz Nagrodą Rektora WAT w 2023 roku za wybitne osiągnięcia naukowe. Dzięki swojemu interdyscyplinarnemu podejściu do

badan i innowacji, mgr inż. Janusz Chojnowski złożył również wnioski o patenty zespołowe, dotyczące między innymi stacji diagnostyczno-dynamometrycznej dla pojazdów ciężkiej trakcji drogowej oraz mobilnego stanowiska magazynowo-narzędziowego. Ponadto Doktorant aktywnie uczestniczył w licznych konferencjach międzynarodowych, takich jak Międzynarodowy Kongres Silników Spalinowych PTNSS oraz Międzynarodowa Konferencja Nauki i Technologii Morskiej w Dubrowniku, gdzie przedstawiał wyniki swoich badań. Mgr inż. Janusz Chojnowski zdobył także doświadczenie praktyczne poprzez udział w praktykach i stażach w wiodących ośrodkach badawczych oraz firmach zajmujących się badaniami i komercjalizacją technologii dwupaliwowych. Doktorant odbył praktyki w IBiRM BOSMAL w Bielsku-Białej, gdzie zapoznał się z najnowocześniejszymi metodami badań silników i systemów paliwowych. Istotnym etapem było również uczestnictwo w praktykach w firmach EuropeGAS i AC Stag w Białymstoku, co umożliwiło mu poznanie technologii gazowych systemów paliwowych oraz ich praktyczne zastosowanie w silnikach spalinowych. Doktorant odbył staż zagraniczny na Uniwersytecie w Vaasa w Finlandii, gdzie pod kierunkiem ekspertów pracował nad projektami związanymi z zaawansowaną technologią RCCI. W 2023 roku mgr inż. Janusz Chojnowski odbył także praktyki w firmie Horus Energia w Sulejówku, zdobywając doświadczenie w zakresie technologii wodorowych oraz ich aplikacji w nowoczesnych systemach kogeneracyjnych.

Podsumowując, osiągnięcia Doktoranta Janusza Chojnowskiego świadczą o jego zaangażowaniu w rozwój nauki i technologii, a także o jego znaczącym wkładzie w badania nad ekologicznymi i efektywnymi rozwiązaniami dla przemysłu motoryzacyjnego i energetycznego. Praca doktorska mgr inż. Janusza Chojnowskiego stanowi wartościowy wkład w rozwój technologii dwupaliwowych systemów zasilania silników spalinowych, Autor ma dużą wiedzę teoretyczną oraz umiejętności praktyczne w zakresie badań eksperymentalnych. Pomimo licznych wyzwań technologicznych i ekonomicznych, proponowane przez Doktoranta rozwiązania mają potencjał do znaczącej redukcji emisji spalin i poprawy efektywności energetycznej silników spalinowych.

Badania emisji spalin silników do ciężkiej trakcji drogowej wymagają bardzo dużego zaangażowania i przygotowania technicznego a także indywidualnego dopasowania warunków stanowiskowych do prowadzenia badań silników tłokowych. W tym zakresie mgr inż. Janusz Chojnowski z zespołem uczestniczącym w badaniach, podjął i zrealizował bardzo duże wyzwanie organizacyjne i działania techniczne.

Pracę wyróżnia zakres przeprowadzonej analizy stanu wiedzy, duży zakres prac projektowych, badań doświadczalnych na hamowni silnikowej, hamowni podwoziowej, badań trakcyjnych oraz wnikliwa analiza wyników badań własnych w zakresie dwupaliwowego zasilania silników o zapłonie samoczynnym do ciężkiej trakcji drogowej.

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, co powoduje że praca ma charakter uniwersalny, rozwojowy.

Po zapoznaniu się z rozprawą nasuwają się następujące spostrzeżenia.

1. Utylitarne wykorzystanie wyników rozprawy przy obecnych cenach gazu ziemnego CNG w Polsce jako paliwa nie jest ekonomicznie atrakcyjne, wręcz nieopłacalne, ale to nie wina Doktoranta. Jest to spowodowane zmianą cen paliw po agresji Rosji na Ukrainę w marcu 2022 zwłaszcza wzrostem ceny CNG. Jaka jest prognoza/szansa w kolejnych latach na rozwój systemów CDF w Polsce i Europie w ciężkiej trakcji drogowej.
2. Czy Doktorant rozważał możliwość/wymagania/procedury dotyczące certyfikacji zmodernizowanego pojazdu do ciężkiej trakcji drogowej wyposażonego w autorski system dwupaliwowego zasilania ON/CNG. Czy pojazd z autorskim systemem CDF ON/CNG zostanie dopuszczony do ruchu drogowego w Polsce i Europie.
3. W trakcie badań doświadczalnych na stanowisku dynamometrycznym dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanym prototypową/autorską instalacją opracowaną w ramach realizacji rozprawy nastąpił wzrost zadymienia spalin oraz wzrost zawartości tlenu węgla i tlenków azotu w spalinach silnika. Ponadto stwierdzono istotny wzrost zawartości metanu w spalinach silnika co powoduje wzrost emisji węglowodorów w spalinach. Wyjaśnienie Doktoranta, że układ oczyszczania spalin powinien ograniczyć zawartość wymienionych szkodliwych składników spalin jest w dużym stopniu jedynie założeniem. W obecnym stanie technicznym prototypowy system zasilania nie powinien być instalowany w pojazdach ciężkiej trakcji drogowej. Jakie działania są możliwe/wymagane dla ograniczenia zawartości szkodliwych składników spalin wyprowadzanych do atmosfery, aby autorskie rozwiązanie CDF miało cechy użytkowej modernizacji.
4. W sekcji I w części dotyczącej badań doświadczalnych opracowanej instalacji zasilania dwupaliwowego nie przedstawiono planu i zakresu badań, wyjaśnienia wymaga określenie/optimalizacja map sterowania autorskiego systemu CDF, w jaki sposób określono charakterystyki pracy pompowtryskiwaczy, wymaga doprecyzowania sposób modyfikacji sygnałów sterujących pompowtryskiwaczem podczas pracy dwupaliwowej, oraz sposób wyliczania dawki paliwa przez sterownik CNG.
5. Czy Doktorant opracował koncepcję i zrealizował układ zasilania dwupaliwowego CDF z indywidualnych elementów wykonawczych w tym elektroniczne układy sterujące czy też był to układ zasilania oferowany na rynku zmodyfikowany przez mgr inż. Janusza Chojnowskiego.
6. Brak schematu autorskiego układu zasilania dwupaliwowego CDF oraz specyfikacji elementów, niezbędne dla ewentualnych działań dotyczących homologacji/certyfikacji rozwiązania proponowanego jako modernizacja pojazdów ciężkiej trakcji drogowej.

PODSUMOWANIE

Rozprawa doktorska mgr inż. Janusza Chojnowskiego jest wartościowym i aktualnym opracowaniem o charakterze badawczo-naukowym i utylitarnym, która wnosi istotne treści poznawcze i wskazuje nowe kierunki rozwoju i doskonalenia w zakresie eksploatacji silników o zapłonie samoczynnym do ciężkiej trakcji drogowej. Całość podjętych i zrealizowanych działań wypełnia definicję oryginalnie rozwiązanego problemu naukowego.



Podjęcie i kontynuowanie prac w zakresie modernizacji tłokowych silników o ZS do ciężkiej trakcji drogowej do zasilania dwupaliwowego należy uznać za celowe i uzasadnione. Analizie poddano zagadnienia ekonomiczne, techniczne, bezpieczeństwo oraz oczekiwania rynku odbiorców. Omówiono paliwa stosowane do zasilania dwupaliwowego w trakcji drogowej. Główną częścią pracy są wyniki oraz analiza badań autorskiej instalacji dwupaliwowej silników o ZS do ciężkiej trakcji drogowej. **Pracę wyróżnia zakres i wnikliwość analizy stanu wiedzy w dziedzinie paliw do silników o ZS do ciężkiej trakcji drogowej i wpływu transportu drogowego na środowisko naturalne, obiekt i zakres badań doświadczalnych: hamownia silnikowa, hamownia podwoziowa, testy drogowe, zakres przygotowania i realizacja badań eksperymentalnych, 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. Janusza Chojnowskiego *Badania układu zasilania dwupaliwowego do modernizacji silników spalinowych pojazdów ciężarowych* mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Mgr inż. Janusz Chojnowski 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. Janusza Chojnowskiego 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 Wojskowej Akademii Technicznej.

J. Nowakowski
13.06.2024