

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Drabika
pt. „Sterowanie efektywnym stopniem sprężania w silniku o zapłonie iskrowym”
(promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Mamala)

Podstawa opracowania:

Zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Nr RNDIM/102/23
z dnia 6.07.2023 r.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TEMATU PRACY

Na świecie, a także w Polsce, obserwuje się działania prawne, naukowe i techniczne związane ze zmniejszeniem negatywnego oddziaływania środków transportu na środowisko naturalne człowieka. W dziedzinie tej odnotowane są pozytywne skutki tych działań, m.in. wprowadzanie kolejnych uregulowań prawnych, mających przyczynić się do ochrony środowiska naturalnego. Działania takie obserwuje się również w odniesieniu do samochodów osobowych, a szczególnie do stosowanych w nich układów napędowych. W efekcie takich działań opracowywane są ekologiczne konstrukcje napędów pojazdów, a także ciągłe ich udoskonalanie pod względem zwiększenia parametrów użytkowych silników spalinowych.

Silnik spalinowy, jako mechaniczny obiekt techniczny, jest przeznaczony do wykonywania ściśle określonych zadań w danych warunkach eksploatacyjnych. Ważne jest, aby miał on określony zasób cech użytkowych, dzięki którym możliwe będzie realizacja funkcji, jakie mu przypisano już w procesie jego projektowania. Jednakże poprawa parametrów użytkowych silników spalinowych, a jednocześnie zmniejszenie ich negatywnego oddziaływania na środowisko, jest obecnie postrzegane jako działania priorytetowe. Jednym z parametrów użytkowych silników spalinowych jest sprawność ogólna, która nie jest wartością stałą, a zmienia się m.in. wraz z prędkością i obciążeniem jednostki napędowej. Stosunkowo mała wartość sprawności silnika przy niskiej prędkości obrotowej silnika i chęć zmiany takiego stanu rzeczy – były przyczyną do zajęcia się tym problemem przez Autora niniejszej

dysertacji. Zależność sprawności silnika od stopnia sprężania i możliwości jego zmiany podczas pracy silnika legły u podstaw zdań badawczych Doktoranta.

Doktorant, mgr inż. Dawid Drabik, podjął w pracy właśnie taki temat, stawiając sobie za cel zmianę wskaźników pracy silnika przez sterowanie napełnianiem cylindra. Zagadnienie takie było już rozwijane przez różnych producentów pojazdów, ale jedynie w zakresie zmiany stopnia sprężania (rozumianego jako zależność wielkości geometrycznych). Natomiast realizacja tego zagadnienia przez Doktoranta odbiegała od takiego podejścia, gdyż w pracy rozpatrywano ją jako zależność wartości ciśnienia maksymalnego w cylindrze do wartości ciśnienia dolotowego. Zależność taką Doktorant zdefiniował jako efektywny stopień sprężania, co niezbyt precyzyjnie oddaje sens tego sformułowania. Przyjmując że stopień sprężania jest wielkością wynikającą z ilorazu wartości objętości cylindra do wartości objętości komory spalania, jest on stały przy braku ingerencji w geometrię tych wielkości. Natomiast Doktorant dodając określenie „efektywny”, tworząc efektywny stopień sprężania zdefiniował zupełnie inną wielkość, która odnosi się pośrednio do ilorazu ciśnienia maksymalnego i ciśnienia dolotu. W związku z tym tytuł niniejszej dysertacji nie powinien nawiązywać do wielkości stopnia sprężania, a raczej do ilorazu wartości ciśnienia maksymalnego i dolotu, i – może powinien – być określony inną nazwą.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Rozprawa liczy 121 stron tekstu, obejmującego 7 rozdziałów, wykaz symboli oraz spis literatury zawierający 124 pozycje. Należy zaznaczyć, że większość pozycji jest aktualna (ale tylko 56 publikacji jest z lat 2013-2023), z czego pięć publikacji jest autorstwa Doktoranta (z lat 2016-2018).

W **rozdziale pierwszym** Doktorant wprowadza w obszar tematyczny rozprawy, rozważając udział samochodów osobowych wyposażonych w różne układy napędowe, opisuje procesy wymuszające potrzebę rozwoju napędów pojazdów samochodowych.

W **rozdziale drugim**, zatytułowanym „Efektywny stopień sprężania silnika spalinowego” Doktorant podaje definicje stopnia sprężania i związane z nim inne wielkości, np. sprawność silnika, a jednocześnie definiuje zaproponowaną nową wielkość: efektywny stopień sprężania, jako iloraz wartości ciśnienia maksymalnego w komorze spalania do wartości ciśnienia w kolektorze dolotowym podczas procesu napełniania cylindra. W rozdziale tym przytaczane są inne możliwości uzyskania zmiennego stopnia sprężania, ale odnoszą się one jedynie do rozpatrywanych wielkości geometrycznych.

W **rozdziale trzecim** Doktorant przedstawił cel rozprawy, formułując tezę pracy oraz zakres jej realizacji. Głównym celem pracy była „ocena możliwości zastosowania sterowania efektywnym stopniem sprężania w silniku o zapłonie iskrowym w aspekcie poprawy wskaźników pracy przez zmniejszenie zużycia paliwa”, a dalej Doktorant precyzuje, że „polega na aktywnym oddziaływaniu na proces napełniania cylindra w suwie dolotu i sprężania poprzez zmianę czynnej objętości sprężania mającej wpływ na przyrost ciśnienia sprężania w cylindrze”.

Tak wyartykułowany cel pracy uprawniał Doktoranta do sformułowania tezy pracy, która brzmiała: istnieje możliwość wpływu na wskaźniki pracy silnika spalinowego przez zmianę procesu sterowania napełnieniem cylindra, wpływając na efektywny stopień sprężania, zdefiniowanego jako stosunek czynnej objętości sprężania do stałej objętości komory spalania w cylindrze, podczas suwu sprężania. Jest tu mowa o stosunku objętości, a wcześniej (w rozdziale drugim) była mowa o wartościach ciśnienia maksymalnego i ciśnienia dolotu. Nasuwa się pytanie: który opis jest prawidłowy? Rozpatrując stosunek wielkości fizycznych jakimi są wartości objętości, nie będą one jednoznaczne ze stosunkiem przywołanych przez Doktoranta wartości ciśnienia.

Doktorant zamierzał wykonać następujące zadania szczegółowe:

- dokonać oceny bieżącego stanu wiedzy (ocena ta została wykonana w rozdziale 2, tak więc treść rozdziału 3 powinna poprzedzać rozdział 2),
- zidentyfikować zjawiska zachodzące w bazowym silniku spalinowym,
- zdefiniować pojęcie efektywnego stopnia sprężania i zaproponować zmiany w konstrukcji silnika spalinowego, które umożliwiłyby realizację efektywnego stopnia sprężania,
- wykonać badania numeryczne procesu spalania w cylindrze z wykorzystaniem układu do sterowania efektywnym stopniem sprężania,
- wykonać badania eksperymentalne z wykorzystaniem hamowni silnikowej i podwoziowej na tym samym obiekcie badawczym (jednocylindrowym silniku spalinowym),
- ocenić wskaźniki pracy oraz dokonać analizy sposobów technicznych realizacji procesu sterowania efektywnym stopniem sprężania.

W **rozdziale czwartym** dysertacji kompetentnie i wyczerpująco opisano metodykę badań. Doktorant zdefiniował dwa pojęcia: silnik spalinowy pracujący i silnik spalinowy niepracujący. Mimo, że sformułowania nie odzwierciedlają jednoznacznie warunków badań w

takich silnikach różnica polega na braku dostarczania paliwa do spalania w drugim przypadku.

Opisano również obiekt badań, którym był jednocylinnowy silnik spalinowy o zapłonie iskrowym z wtryskiem paliwa do kanału dolotowego. Nie podano natomiast charakterystyki kąтового otwarcia i zamknięcia zaworów – dane te pozwoliłyby znacznie lepiej zrozumieć działania Doktoranta opisane w kolejnych rozdziałach.

Zaletą tej części pracy jest bardzo szczegółowy opis stanowiska badawczego, obiektu badawczego oraz narzędzi badawczych.

Rozdział piąty to opis badań identyfikacyjnych i symulacyjnych wskaźników pracy silnika spalinowego oraz ich analiza. Doktorant podzielił badania na identyfikacyjne, czyli pomiar ciśnienia maksymalnego w cylindrze oraz ciśnienia dolotu dla dwóch etapów: badania na silniku, który był napędzany z zewnętrznego źródła (hamowni silnikowej) oraz badania na silniku pracującym.

Na podstawie dwóch mierzonych wartości Doktorant wyznaczył efektywny stopień sprężania uzależniając go od prędkości obrotowej silnika oraz procentowego uchylecia przepustnicy. Uzyskane wartości w pierwszym etapie (dla obiegu bez procesu spalania) charakteryzowały się zmiennością wartości od 10 do około 25. Jednakże dla tych pomiarów nie przeprowadzono analizy dokładności wyników, co przy dokładności odczytu ciśnienia dolotu do jednego miejsca znaczącego nie jest zadowalające. Natomiast w drugim przypadku – dla pracującego silnika – wartości uzyskiwanego efektywnego stopnia sprężania wynosiły od około 12 do wartości 87.

Kolejny etap rozdziału piątego zawiera opis prowadzonych symulacji wcześniejszego postępowania. Prawidłowe jego modelowanie pozwoliło Doktorantowi na stwierdzenie różnic w wartościach ciśnienia maksymalnego w cylindrze dla wyników badań symulacyjnych i na obiekcie rzeczywistym (silniku pracującym) dla różnych uchyleń przepustnicy. Różnice te wynosiły 0,02 MPa, co jest wynikiem bardzo zadowalającym, mając na uwadze bardzo uproszczony model symulacyjny. Uproszczenia są widoczne m.in. przy nieciągłości przebiegu ciśnienia.

Końcowa część rozdziału piątego dotyczy prowadzonych symulacji – według Doktoranta – z zastosowaniem zaworu upustowego. Jednakże lektura tego fragmentu rozdziału wydaje się dotyczyć zmian opóźnienia kąta zamknięcia zaworu dolotowego. Opóźnienie to powodowało uzyskiwanie zmian w ciśnieniu maksymalnym w cylindrze silnika od około 5% do 17% dla pracującego silnika.

Rozdział szósty zatytułowany „Badania eksperymentalne” to próba realizacji efektywnego stopnia sprężania na silniku spalinowym z zastosowaniem zaworu upustu powietrza z głowicy silnika. Uzyskane wyniki potwierdziły zmianę ciśnienia maksymalnego (jednakże badania wykonano tylko dla pracy silnika bez spalania), a największe różnice w efektywnym stopniu sprężania wynosiły 5% przy otwarciu przepustnicy w zakresie 20–30%.

Kolejna część rozdziału szóstego to próba, na stanowisku hamulcowym, zmniejszenia oporów przepływu powietrza z wykorzystaniem kryz zamiast przepustnicy. Do tego celu Doktorant wykorzystał trzy kryzy, które odpowiadały otwarciu przepustnicy wynoszącemu 10%, 20% oraz 30%. W wyniku zastosowania kryz stwierdzono zwiększenie zarówno ciśnienia dolotowego oraz ciśnienia maksymalnego w cylindrze. W badaniach na hamowni podwoziowej potwierdzono poprzednie wyniki z zastosowaniem kryz w układzie dolotowym silnika; stwierdzono, że ich stosowanie zwiększa o kilka procent podstawowe parametry pracy silnika i pojazdu (moc silnika i prędkość pojazdu).

W podsumowaniu (**rozdział siódmy**) Doktorant zawarł wnioski ogólne, użyteczne oraz perspektywiczne. Wnioski odnoszą się głównie do aspektów merytorycznych pracy, jednak część z nich ma charakter uniwersalny i może znaleźć zastosowanie także dla innych rodzajów lub typów silników. Sformułowane wnioski mają charakter aplikacyjny i mogą być wykorzystane np. podczas opracowania nowych strategii sterowania silnikiem spalinowym.

Podsumowując stwierdzam, że **metodyka badań oraz uzyskane wyniki są unikatowe i wymagają szczególnego podkreślenia, co pozwala uznać Doktoranta za specjalistę w tej dziedzinie.**

3. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

3.1. Uwagi ogólne

Pod względem merytorycznym i metodycznym pracę oceniam pozytywnie, gdyż odpowiada swoją zawartością postawionemu celowi i jest dostosowana do obowiązujących w tym zakresie wymogów. Układ logiczny treści rozprawy jest przejrzysty, a treści prezentowane są ze sobą dobrze powiązane z konsekwentnie przestrzegany układem rozpatrywanych zagadnień.

Autor dokonał wyjątkowo szerokiej prezentacji wyników swych rozważań, dokładnie i kompetentnie (a wielu fragmentach wręcz drobiazgowo) opisał przeprowadzane badania oraz

umiejętnie nadał ich wynikom charakter danych, przydatnych w ocenie charakterystyk użytkowych silnika spalinowego.

Wnioski z przeprowadzonych analiz i badań na obiekcie rzeczywistym są sformułowane trafnie i adekwatnie do ich zakresu i charakteru. W zakresie omawianych zagadnień występują akcenty praktyczne, które wynikają się z dobrego rozeznania Autora w zakresie problematyki badawczej dotyczącej zagadnień silników spalinowych.

Najważniejsze osiągnięcia pracy to:

1. Sformułowanie ciekawego problemu dotyczącego poprawy efektywności pracy silnika spalinowego.
2. Zastosowanie oryginalnej metodyki badawczej w oparciu o wyniki analizy literaturowej.
3. Adaptację stanowiska badawczego umożliwiającego realizację zagadnienia efektywnego stopnia sprężania w jednocylindrowym silniku spalinowym.
4. Dokonanie modelowania pracy silnika spalinowego wraz z uwzględnieniem układu sterowania efektywnym stopniem sprężania.
5. Budowę toru pomiarowego z uwzględnieniem odpowiednich czujników, sprzętu do przetwarzania analogowo-cyfrowego, akwizycji danych wraz z uwzględnieniem systemu diagnostycznego silnika.
6. Przeprowadzenie badań efektywnego stopnia sprężania na jednocylindrowym silniku spalinowym na hamowni silnikowej oraz podwoziowej.
7. Przeprowadzenie badań parametrów użytkowych silnika i pojazdu z wykorzystaniem kryz zastępujących przepustnicę powietrza.
8. Analiza wyników w kontekście porównania wartości efektywnego stopnia sprężania w poszczególnych punktach pracy silnika spalinowego.

Budzi jednak pewien niedosyt lub zastrzeżenia kilka fragmentów rozprawy, które nie obniżają pozytywnej oceny wszystkich aspektów pracy (wyboru tematu, uzasadnienia, analiz, przeprowadzonych badań, wnioskowania, itp.). Sformułowano je w niżej wymienionych punktach:

1. Jaką wielkość Doktorant zdefiniował pod pojęciem efektywny stopień sprężania. Co ta nowa, wyznaczona wielkość ma wspólnego ze stopniem sprężania, a co oznacza określenie „efektywny”. Z dotychczasowych badań Doktoranta wynika, że wielkość którą nazywa efektywnym stopniem sprężania, to nic innego, jak iloraz dwóch wartości rejestrowanego ciśnienia: jednego w cylindrze, a drugiego w kolektorze dolotowym – i to w różnych warunkach pracy silnika spalinowego. Liczba zmiennych

od których zależy ta wielkość jest znacznie większa niż przedstawiona w pracy. Tytuł pracy odnosi się do sterowania wielkością efektywnego stopnia sprężania, jednakże w pracy zawężono to jedynie do jego części – do upustu ciśnienia z komory spalania. W pracy nie wyartykułowano skutków takiego postępowania, np. wpływu na parametry operacyjne silnika spalinowego, zużycie paliwa (choć jest to zawarte w celu pracy) lub stężenie (emisję) związków szkodliwych. Prosiłbym zatem Doktoranta o odpowiedzi na powyższe pytania.

2. Brak zwiększonej dokładności podawania wartości ciśnienia dolotowego (pomiar z dokładnością do jednego miejsca znaczącego, s. 58), powoduje że najmniejszy błąd uzyskiwanego efektywnego stopnia sprężania wynosi 10%, a największy 50%.
3. Brak odniesienia Doktoranta do braku danych w tabelach 5.4, 5.5, i 5.6 dla prędkości obrotowej 1250 obr/min.
4. W zakresie badań symulacyjnych Doktorant pisze, że (s. 80): „(...) określił wpływ zastosowania zaworu upustowego na pracę silnika, w tym na ciśnienie maksymalne. Założeniem pomysłu, było wprowadzenie do modelu zaworu upustowego, który podnosił i zamykał zawór dolotowy”. Opis tego zagadnienia nie jest jednoznaczny, a dalsza lektura uświadamia, że odnosi się ono do późniejszego zamknięcia zaworu dolotowego. Przydatny w tym zakresie byłby schemat kąтового otwarcia i zamknięcia zaworów dolotowych i wylotowych – wartości liczbowe tych parametrów nie są podane przez Doktoranta również przy opisie silnika.
5. W pracy Doktorant pisze (s. 87): „założeniem koncepcji było wpływanie na ciśnienie maksymalne (...) przez sterowanie rozpoczęciem sprężania (...)”, i dalej „ideą rozwiązania było konstrukcyjne zwiększenie stopnia sprężania poprzez zmniejszenie objętości komory spalania i sterowanie efektywnym stopniem sprężania poprzez wpływanie na ciśnienie maksymalne w cylindrze”. Jak należy rozumieć powyższe w kontekście tego, że wykonana praca przez Doktoranta na żadnym etapie nie wpływała na zwiększenie stopnia sprężania, a wręcz przeciwnie – zawsze powodowała jego zmniejszenie?
6. Zakres badań i przedstawione wyniki są dość obszerne, jednakże w większości nie można uzyskać porównania wyników symulacji i wyników na rzeczywistym obiekcie. Takie jednoznaczne porównania występują tylko w kilku miejscach w pracy i dotyczą, np. wartości efektywnego stopnia sprężania. I ta zgodność jest zaskakująco duża, bo różnicy w tych dwóch przypadkach nie ma żadnej.

3.2. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe, ważniejsze wymieniono poniżej:

- wielokrotne stosowanie określenia „obroty silnika” w odniesieniu do prędkości obrotowej silnika,
- mało techniczny język Doktoranta, np. „zglobienie tematu”, „wzrost konsumpcji”, „pojemność silnika”, „zawór ssący, wydechowy”, „poziom kompresji”,
- kropki zamiast przecinków w zapisie liczb, jednostki powinny być pisane prosto,
- powtórzenie danych na wykresach jednakowych z pokazanymi w tabelach (np. rys. 5.2 – tab. 5.1; rys. 5.4 – tab. 5.2; rys. 5.5 – tab. 5.3 itd.),
- s. 74: poprawny zapis to „kąta obrotu wału korbowego”,
- s. 76 i dalsze: brak skali na wykresach,
- s. 82: należałoby wrysować na wykresach chwile zamknięcia zaworu dolotowego,
- zamienne stosowanie symboli efektywnego stopnia sprężania (E_{ev} lub ϵ_{ev}),
- s. 91–93, rys. 6.6–6.11: nieprawidłowy opis osi wykresów; jest „Czujnik ciśnienia AVL [MPa]”, powinno być „Ciśnienie w cylindrze [MPa]”.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy treści stwierdzam, że oceniana praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

Temat dysertacji jest ważny z punktu widzenia poprawy wskaźników pracy silnika spalinowego, a uzyskane wyniki, czy też metodyka badań mogą być w przyszłości wykorzystane w badaniach innych silników wchodzących w skład układów napędowych pojazdów hybrydowych czy też innych środków transportu. Sposób rozwiązania tematu jest oryginalnym rozwiązaniem Doktoranta i stanowi o niewątpliwiej wartości pracy. Zadanie, którego podjął się Autor należy do trudnych, bowiem jego realizacja wymagała zastosowania nowoczesnych technik pomiarowych, wykonania badań hamownianych oraz znajomości zagadnień związanych z parametrami pracy jednostek napędowych pojazdów w różnorodnych warunkach. Z tego powodu podjęcie się tak trudnego zadania przez Doktoranta stanowi cenną wartość pracy.

W dysertacji Doktorant wykazał się samodzielnością w formułowaniu oryginalnych problemów naukowych i ich rozwiązywaniu oraz umiejętnością prowadzenia unikatowych

eksperymentów badawczych. Przeprowadzone rozważania teoretyczne i uzyskane wyniki badań są przekonujące i potwierdzają zrealizowanie zadań, które Doktorant sobie postawił.

Pod względem metodologicznym pracę można uznać za prawidłową. Autor potwierdził umiejętność prowadzenia badań i analiz w sposób uporządkowany i metodyczny oraz stosował prawidłowe podejście do interpretacji wyników.

Zawarte w mojej opinii uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy. Należy zaznaczyć równocześnie, że niektóre z uwag mają charakter dyskusyjny, czy wyjaśniający lub stanowią alternatywne podejście do zagadnienia.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Dawida Drabika pt. „**Sterowanie efektywnym stopniem sprężania w silniku o zapłonie iskrowym**” spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, DzU nr 65, poz. 595 (z późniejszymi zmianami) oraz Ustawy o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 2018 r. stawiam zatem wniosek o dopuszczenie mgra inż. Dawida Drabika do publicznej obrony ocenianej dysertacji i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jacek Pielecha

