



Poznań 30.01.2026

dr hab. inż. Łukasz Warguła, prof. PP

Instytut Konstrukcji Maszyn

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Politechnika Poznańska

RECENZJA

praca doktorska mgr inż. Michała Korbuta

pt.: *„Ocena modelowa i doświadczalna wpływu warunków zasilania silnika pneumatycznego na jego wskaźniki zewnętrzne”*

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Szpica, prof. PB

1. Podstawa prawna

Podstawą wykonania recenzji było pismo Pana prof. dr hab. inż. Romualda Mosdorfa przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej informujące o powołaniu mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgr inż. Michała Korbuta, na posiedzeniu w dniu 26.11.2025 r.

2. Ogólny charakter rozprawy

Rozprawa doktorska pt. *„Ocena modelowa i doświadczalna wpływu warunków zasilania silnika pneumatycznego na jego wskaźniki zewnętrzne”* dotyczy analizy funkcjonowania tłokowego silnika pneumatycznego w kontekście kształtowania jego parametrów użytkowych poprzez odpowiedni dobór warunków zasilania oraz rozwiązań konstrukcyjnych. Doktorant podejmuje aktualny i istotny z punktu widzenia inżynierii mechanicznej problem badawczy, związany z poszukiwaniem alternatywnych, niskoemisyjnych źródeł napędu oraz optymalizacją pracy silników pneumatycznych. Badania zostały przeprowadzone w dwóch uzupełniających się środowiskach: eksperymentalnym oraz symulacyjnym. Rozprawa liczy 10 głównych rozdziałów poprzedzonych streszczeniem, wyjaśnieniem skrótów użytych w tekście rozprawy oraz listą ważniejszych oznaczeń i symboli. Po dziesiątym rozdziale, który jest wnioskami, znajduje się bibliografia, która liczy 191 pozycji. Całość rozprawy zajmuje 145 stron.

Rozdział 1 dotyczy uzasadnienia podjęcia tematyki rozprawy doktorskiej oraz osadzenia jej w aktualnym kontekście rozwoju układów napędowych. Doktorant wskazuje, że głównym impulsem do prowadzenia badań są coraz bardziej restrykcyjne wymagania dotyczące ograniczania emisji zanieczyszczeń pochodzących z transportu, wprowadzane w odpowiedzi na pogarszającą się jakość powietrza oraz rosnącą świadomość społeczną wpływu emisji spalin na zdrowie i środowisko. Istotnym czynnikiem są również zmiany legislacyjne w Unii Europejskiej, w tym planowany zakaz sprzedaży pojazdów z napędem spalinowym od 2035 roku.



W rozdziale dokonano przeglądu dotychczasowych kierunków rozwoju napędów alternatywnych, obejmujących m.in. paliwa gazowe, paliwa syntetyczne, wodór, napędy elektryczne oraz różne konfiguracje układów hybrydowych. Doktorant podkreśla, że mimo intensywnego rozwoju tych technologii, każda z nich obciążona jest istotnymi ograniczeniami technicznymi, ekonomicznymi lub eksploatacyjnymi.

Na tym tle przedstawiono napędy pneumatyczne jako potencjalną alternatywę niewymagającą procesu spalania, charakteryzującą się prostą budową, niskimi temperaturami pracy, łatwością magazynowania medium roboczego oraz możliwością zasilania energią pochodzącą z odnawialnych źródeł. Jednocześnie Doktorant wskazuje kluczowe wady tego rozwiązania, w szczególności niską gęstość energii sprężonego powietrza oraz straty cieplne towarzyszące jego rozprężaniu.

W końcowej części rozdziału sformułowano lukę badawczą. Doktorant zauważa, że dostępne opracowania koncentrują się głównie na wpływie ciśnienia zasilania, natomiast brakuje kompleksowych analiz dotyczących oddziaływania pozostałych parametrów zasilania, takich jak moment i czas trwania wlotu powietrza czy stopień sprężania, na przebieg procesów zachodzących w cylindrze i parametry użytkowe silnika pneumatycznego. Wskazano, że analogia do silników spalinowych uzasadnia potrzebę takiej analizy, a jej realizacja może przyczynić się do poprawy efektywności pracy silników pneumatycznych oraz wyznaczenia kierunków dalszego rozwoju konstrukcyjnego.

Zdaniem recenzenta Doktorant przedstawił bardzo szeroki opis rozwoju jednostek napędowych pojazdów, uwzględniający większość powszechnie stosowanych oraz badanych technologii napędowych. Rozdział ten stanowi dobre i merytoryczne wprowadzenie do dalszej części rozprawy. Doktorant porusza w nim zarówno zagadnienia techniczne i ekonomiczne, jak również aspekty legislacyjne i ustawodawcze obowiązujące na terenie Unii Europejskiej.

Rozdział 2 poświęcony jest szczegółowemu omówieniu stanu techniki w zakresie silników pneumatycznych. Doktorant rozpoczyna go od krótkiego rysu historycznego, wskazując, że idea wykorzystania sprężonego powietrza jako źródła napędu znana jest od XIX wieku i była okresowo rozwijana, zwłaszcza w transporcie miejskim oraz w zastosowaniach specjalnych. Pomimo wczesnych wdrożeń praktycznych, rozwiązania pneumatyczne były stopniowo wypierane przez napędy elektryczne i spalinowe, głównie ze względu na ich większą gęstość energii oraz lepsze parametry użytkowe.

W dalszej części rozdziału przedstawiono i scharakteryzowano różne koncepcje współczesnych silników pneumatycznych. Omówiono zarówno konstrukcje tłokowe, jak i rozwiązania o niekonwencjonalnej budowie, takie jak silniki z mimośrodowym tłokiem, konstrukcje bazujące na sprężarkach spiralnych i zębatych, a także silniki typu free-piston. Doktorant zwraca uwagę na ich zasadę działania, zalety oraz ograniczenia, w szczególności w zakresie sprawności, zużycia sprężonego powietrza, złożoności konstrukcji i możliwości regulacji parametrów pracy.

Istotną część rozdziału stanowi także omówienie układów hybrydowych wykorzystujących zasilanie sprężonym powietrzem. Przedstawiono rozwiązania, w których silnik pneumatyczny pełni rolę np. napędu pomocniczego. Doktorant podkreśla, że takie konfiguracje pozwalają częściowo ograniczyć podstawowe wady napędów pneumatycznych, w szczególności wynikające z niskiej gęstości energii sprężonego powietrza.

Rozdział kończy się podsumowaniem stanu techniki, w którym Doktorant wskazuje, że mimo licznych zalet silników pneumatycznych, takich jak prosta budowa, niskie temperatury pracy oraz brak bezpośredniej emisji zanieczyszczeń, rozwiązania te nadal pozostają niszowe.



Jednocześnie podkreślono brak kompleksowych badań dotyczących wpływu parametrów zasilania oraz rozwiązań konstrukcyjnych na parametry użytkowe silników pneumatycznych, co stanowi istotne uzasadnienie dla dalszych analiz prowadzonych w rozprawie.

Zdaniem recenzenta przedstawiony zarys historyczny rozwoju napędów pneumatycznych jednoznacznie wskazuje, że obszar ten wymaga osiągnięcia o charakterze przełomowym, które umożliwiłoby realną konkurencję z innymi rodzajami napędów. Analiza rozwoju tych rozwiązań na przestrzeni lat pokazuje bowiem, że mimo okresowych prób wdrożeń, napędy pneumatyczne konsekwentnie przegrywały rywalizację z napędami spalinowymi i elektrycznymi.

Autor stwierdza, że na podstawie analiz rozwoju motoryzacji oraz planowanych i wprowadzanych w różnych krajach przepisów zakazujących sprzedaży pojazdów spalinowych można prognozować dalszy rozwój napędów wykorzystujących silniki pneumatyczne. Recenzent nie podziela w pełni tego stanowiska i uważa, że sam czynnik legislacyjny nie jest wystarczający. W ocenie recenzenta niezbędne jest osiągnięcie istotnego przełomu technologicznego w tej dziedzinie, warunkującego praktyczną konkurencyjność napędów pneumatycznych.

W przeglądzie dotyczącym silników zasilanych sprężonym powietrzem zasadne byłoby uzupełnienie opisu o daty powstania poszczególnych konstrukcji lub ich ostatnich modernizacji. Pozwoliłoby to lepiej zobrazować rzeczywiste tempo postępu prac badawczo-rozwojowych w tym obszarze.

W opisach układów hybrydowych wykorzystujących zasilanie sprężonym powietrzem warto jednoznacznie wskazywać, czy zastosowane połączenia miały charakter szeregowy czy równoległy, co istotnie wpływa na ocenę zasad działania oraz potencjału danego rozwiązania.

Celowe byłoby również uzupełnienie rozdziału o syntetyczne podsumowanie koncepcji, którą Doktorant uznaje za najbardziej perspektywiczną z punktu widzenia dalszego rozwoju napędów pneumatycznych, wraz z uzasadnieniem takiej oceny.

Z formalnego punktu widzenia należy zwrócić uwagę, że w pracy sporządzonej w języku polskim opisy na rysunkach powinny być konsekwentnie podawane w języku polskim, co dotyczy między innymi rysunku 11.

Na szczególną uwagę zasługuje rozdział poświęcony konwersji silników spalinowych do zasilania sprężonym powietrzem, który jest bardzo interesujący w kontekście tematyki rozprawy. Omówiono w nim zakres wprowadzanych zmian konstrukcyjnych, jednak pominięto zagadnienie pierścieni tłokowych w silniku czterosuwowym, które są elementami szczególnie wrażliwymi na zmiany temperatury pracy.

Doktorant wskazuje, że zakres użytecznych prędkości obrotowych silnika był mniejszy, natomiast już przy niskich prędkościach obrotowych dostępna była wysoka wartość momentu obrotowego. W pracy nie przedstawiono jednak charakterystyk potwierdzających to stwierdzenie, co osłabia jego wartość dowodową w kontekście analizy technicznej.

Rozdział 3 koncentruje się na analizie stanu wiedzy dotyczącej metod badawczych i obliczeniowych stosowanych w ocenie pracy silników pneumatycznych. Doktorant porządkuje istniejące podejścia badawcze, dzieląc je na trzy zasadnicze grupy: badania doświadczalne prowadzone na dedykowanych stanowiskach eksperymentalnych, analizy numeryczne z wykorzystaniem narzędzi CFD oraz metody bazujące na modelowaniu matematycznym.

W części dotyczącej badań eksperymentalnych omówiono rozwiązania stanowisk badawczych umożliwiających pomiar podstawowych parametrów pracy silników pneumatycznych, takich jak moment obrotowy, prędkość obrotowa czy zużycie sprężonego powietrza. Doktorant wskazuje na istotne trudności związane z zapewnieniem powtarzalności warunków zasilania, dokładnością pomiarów oraz ograniczoną możliwością obserwacji zjawisk zachodzących wewnątrz cylindra w trakcie pracy silnika.



Następnie przedstawiono podejścia numeryczne oparte na obliczeniowej mechanice płynów. Analizy CFD umożliwiają szczegółowy opis przepływu i rozprężania sprężonego powietrza w kanałach dolotowych oraz w cylindrze silnika, jednak wiążą się z dużą złożonością modeli, wysokimi wymaganiami obliczeniowymi oraz koniecznością przyjmowania licznych założeń upraszczających. Doktorant podkreśla, że metody te są rzadko stosowane do analiz pełnego cyklu pracy silnika pneumatycznego.

W kolejnej części rozdziału omówiono modelowanie matematyczne silników pneumatycznych. Przedstawione modele opierają się najczęściej na metodzie objętości skupionych oraz zasadach zachowania masy i energii, co pozwala na relatywnie szybkie analizy wpływu wybranych parametrów zasilania na przebieg ciśnienia w cylindrze i parametry użytkowe silnika. Doktorant wskazuje, że mimo uproszczeń, modele te stanowią efektywne narzędzie do analiz porównawczych, szczególnie w połączeniu z walidacją eksperymentalną.

Rozdział kończy się syntetycznym podsumowaniem stanu wiedzy, w którym Doktorant wskazuje na brak kompleksowych opracowań łączących badania eksperymentalne z modelowaniem matematycznym w kontekście systematycznej analizy wpływu warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego. Zidentyfikowana luka badawcza stanowi bezpośrednie uzasadnienie dla przyjętej w rozprawie metodyki badań oraz dalszych analiz teoretyczno-eksperymentalnych.

Zdaniem recenzenta przedstawiono dobry i rzeczowy przegląd metod eksperymentalnych oraz symulacyjnych, wraz ze wskazaniem stosowanych urządzeń pomiarowych i narzędzi obliczeniowych, a także z wyraźnym omówieniem ich możliwości i ograniczeń.

Rozdział 4 stanowi jednoznaczne sformułowanie problemu badawczego oraz określa zadania badawcze rozprawy. Doktorant, bazując na wnioskach wynikających z analizy stanu techniki i stanu wiedzy, wskazuje, że dotychczasowe badania silników pneumatycznych koncentrowały się głównie na wpływie ciśnienia zasilania, natomiast brak jest kompleksowych opracowań uwzględniających szerszy zbiór parametrów zasilania oraz ich wzajemne oddziaływanie na procesy zachodzące w cylindrze i na parametry użytkowe silnika.

Sformułowany problem badawczy dotyczy określenia, w jaki sposób warunki zasilania oraz wybrane cechy konstrukcyjne tłokowego silnika pneumatycznego wpływają na jego charakterystyki pracy, w szczególności na przebieg ciśnienia w cylindrze, moment obrotowy, moc oraz zużycie sprężonego powietrza. Doktorant podkreśla potrzebę takiego kształtowania warunków zasilania, aby możliwe było ukierunkowanie pracy silnika na poprawę efektywności energetycznej lub ekonomicznej.

W ramach realizacji problemu badawczego sformułowano zestaw zadań badawczych obejmujących opracowanie matematycznego modelu silnika pneumatycznego, wykonanie badań eksperymentalnych na dedykowanym stanowisku hamownianym oraz przeprowadzenie analiz teoretyczno-eksperymentalnych. Zadania te dotyczą oceny wpływu stopnia sprężania, ciśnienia zasilania, wartości kąta początku wlotu sprężonego powietrza oraz czasu trwania wlotu na parametry pracy silnika.

Rozdział ten pełni istotną funkcję porządkującą, jasno wyznaczając zakres dalszych analiz oraz uzasadniając przyjętą metodykę badań, która została konsekwentnie rozwinięta w kolejnych częściach rozprawy.

Zdaniem recenzenta poruszone zagadnienia mają charakter nowy i dotychczas nie były opisywane w literaturze w tak precyzyjny i usystematyzowany sposób.

Rozdział 5 omawia szczegółowy opis obiektu badań oraz jego przygotowanie do realizacji zaplanowanych eksperymentów. Doktorant przedstawia tłokowy silnik spalinowy, który został wykorzystany jako baza konstrukcyjna i poddany konwersji do zasilania sprężonym powietrzem.



Wybór takiego rozwiązania uzasadniono dostępnością obiektu, znaną konstrukcją mechanizmu tłokowo-korbowego oraz możliwością modyfikacji układu zasilania i sterowania.

W rozdziale opisano zakres przeprowadzonych zmian konstrukcyjnych niezbędnych do przystosowania silnika do pracy w charakterze silnika pneumatycznego. Dotyczyły one przede wszystkim układu zasilania sprężonym powietrzem, sterowania procesem napełniania cylindra oraz dostosowania elementów osprzętu do nowych warunków pracy. Doktorant zwraca uwagę na konieczność zachowania poprawnej współpracy części mechanicznej silnika przy istotnie odmiennym przebiegu procesów roboczych w porównaniu z klasycznym silnikiem spalinowym.

Istotną część rozdziału stanowi również opis stanowiska hamownianego przeznaczonego do badań eksperymentalnych. Przedstawiono jego budowę, zastosowaną aparaturę pomiarową oraz możliwości regulacji i rejestracji podstawowych parametrów pracy silnika pneumatycznego. Stanowisko umożliwia prowadzenie badań w kontrolowanych i powtarzalnych warunkach zasilania, co jest kluczowe z punktu widzenia wiarygodności uzyskiwanych wyników.

Rozdział piąty tworzy solidną podstawę dla dalszych analiz eksperymentalnych i obliczeniowych, jednoznacznie definiując zarówno obiekt badań, jak i warunki techniczne, w jakich realizowane są kolejne etapy rozprawy.

Zdaniem recenzenta Doktorant nie podał marki, modelu ani daty produkcji badanego silnika, co utrudnia jednoznaczną identyfikację obiektu badań oraz ogranicza możliwość odtworzenia eksperymentu przez innych badaczy. Zastosowany obiekt jest silnikiem dwusuwowym, który poza zastosowaniami specjalnymi nie jest obecnie stosowany w nowych pojazdach dopuszczonych do eksploatacji na terenie Unii Europejskiej. Należy jednak podkreślić, że wykorzystanie starszych konstrukcji jako bazy do wprowadzania innowacyjnych rozwiązań nie wyklucza uzyskania nowych i wartościowych efektów poznawczych.

Doktorant dokonał adaptacji układu rozruchowego silnika, prezentując interesujące rozwiązanie konstrukcyjne. Nie przedstawiono jednak jego znaczenia funkcjonalnego dla pracy układu. Można bowiem założyć, że w silniku pneumatycznym układ rozruchowy nie jest bezwzględnie konieczny, jednak jego obecność umożliwia wymuszenie kierunku ruchu wału, co pozwala na rozruch w sytuacji, gdy tłok zakończy cykl pracy w górnym lub dolnym martwym położeniu.

W kontekście budowy stanowiska hamownianego zasadne wydaje się pytanie o konieczność zastosowania wału pośredniego oznaczonego jako element 6 na rysunku 22. Należy rozważyć, czy możliwe było zaprojektowanie stanowiska z pominięciem tego elementu, co pozwoliłoby wyeliminować z toru pomiarowego dodatkowe opory pochodzące od łożysk tocznych.

Z tym zagadnieniem wiąże się również kwestia poprawności wyznaczenia momentu obrotowego. Warto doprecyzować, czy w cyklu pomiarowym uwzględniono fakt, że rzeczywista wartość momentu generowanego przez silnik była wyższa od wartości zmierzonej, ponieważ część energii była zużywana na pokonanie oporów dwóch łożysk oraz na odkształcenie elementu podatnego zastosowanego w sprzęgle kłowym znajdującym się w torze pomiarowym.

Rozdział 6 prezentuje opracowanie matematycznego modelu silnika pneumatycznego, stanowiącego podstawowe narzędzie analiz obliczeniowych prowadzonych w rozprawie. Doktorant przedstawia spójną koncepcję modelu obejmującego dwie wzajemnie powiązane części: mechaniczną oraz pneumatyczną, których integracja umożliwia opis pracy silnika w funkcji kąta obrotu wału korbowego.

W części mechanicznej modelu opisano kinematykę i dynamikę mechanizmu tłokowo-korbowego. Uwzględniono zależności geometryczne, siły bezwładności oraz siły działające na tłok i elementy układu korbowego, co pozwala na wyznaczenie momentu obrotowego generowanego przez silnik.



Model ten umożliwia analizę wpływu zmian przebiegu ciśnienia w cylindrze na parametry mechaniczne pracy jednostki.

Część pneumatyczna modelu oparta została na metodzie objętości skupionych oraz zasadzie zachowania masy i energii. Doktorant opisuje zmiany ciśnienia i temperatury czynnika roboczego w cylindrze w zależności od warunków zasilania, geometrii cylindra oraz faz rozrządu wlotu i wylotu powietrza. Uwzględniono także wymianę ciepła pomiędzy gazem a ściankami cylindra oraz charakterystykę przepływu przez elementy układu dolotowego i wylotowego.

W końcowej części rozdziału przedstawiono metodykę realizacji obliczeń z wykorzystaniem opracowanego modelu matematycznego. Opisano sposób prowadzenia symulacji dla różnych wariantów warunków zasilania oraz zakres parametrów poddanych analizie. Doktorant podkreśla, że zaproponowany model, mimo przyjętych uproszczeń, umożliwia efektywną analizę wpływu kluczowych parametrów zasilania na przebieg procesów w cylindrze oraz na parametry użytkowe silnika pneumatycznego, a jego poprawność została zweryfikowana w dalszych rozdziałach poprzez porównanie z wynikami badań eksperymentalnych.

Zdaniem recenzenta Doktorant wykazuje dobrą znajomość opisywanych modeli matematycznych oraz rozumienie istoty przyjmowanych uproszczeń. Przedstawiona analiza ich doboru jest wnikliwa i świadczy o dojrzałości metodologicznej oraz świadomym podejściu do modelowania złożonych zjawisk zachodzących w silniku pneumatycznym.

Należy jednak zwrócić uwagę na kwestię formalną dotyczącą rysunku 28, zatytułowanego „Zestawienie przebiegów poszczególnych funkcji przepływu”. Z opisu zawartego w tekście wynika, że nie jest to rysunek opracowany przez Doktoranta w ramach niniejszej rozprawy, gdyż odnosi się do zaworu hamulcowego opisywanego w literaturze. W takim przypadku rysunek powinien zostać jednoznacznie opatrzony odniesieniem do odpowiedniego źródła literaturowego.

Rozdział 7 poświęcony jest szczegółowemu opisowi metodyki badań eksperymentalnych zastosowanych w rozprawie. Doktorant przedstawia logicznie uporządkowany schemat postępowania badawczego, którego celem jest zapewnienie porównywalności i powtarzalności uzyskiwanych wyników oraz ich zgodności z założeniami przyjętymi na etapie formułowania problemu badawczego.

W rozdziale określono zakres prowadzonych badań, sposób przygotowania stanowiska hamownianego oraz procedury pomiarowe stosowane podczas eksperymentów. Doktorant opisuje warunki prowadzenia badań, w tym stabilizację parametrów zasilania, sposób zmiany poszczególnych wielkości wejściowych oraz kolejność realizacji pomiarów. Szczególną uwagę poświęcono kontroli takich parametrów, jak ciśnienie zasilania, stopień sprężania, wartości kąta początku wlotu sprężonego powietrza oraz czas jego trwania.

Istotnym elementem metodyki jest także opis sposobu rejestracji i opracowania wyników pomiarów. Doktorant przedstawia zasady doboru liczby powtórzeń, uśredniania wyników oraz eliminacji przypadkowych zakłóceń pomiarowych. Wskazano również kryteria porównania wyników badań eksperymentalnych z rezultatami uzyskanymi na drodze symulacji numerycznych.

Rozdział siódmy stanowi spójne i czytelne przygotowanie do dalszych analiz teoretyczno-eksperymentalnych. Przyjęta metodyka zapewnia wiarygodność uzyskanych wyników oraz umożliwia ocenę wpływu poszczególnych parametrów zasilania na pracę silnika pneumatycznego w sposób uporządkowany i metodycznie poprawny.

Zdaniem recenzenta przedstawiono logiczny i spójny ciąg przyczynowo skutkowy, umożliwiający jednoznaczne prześledzenie zależności pomiędzy przyjętymi warunkami badań, a uzyskiwanymi wynikami.



Rozdział 8 stanowi zasadniczą część merytoryczną rozprawy i zawiera wyniki analiz teoretyczno-eksperymentalnych dotyczących wpływu warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego. Doktorant konsekwentnie łączy wyniki badań doświadczalnych z rezultatami obliczeń uzyskanych na podstawie opracowanego modelu matematycznego, co umożliwia wzajemną weryfikację obu podejść.

W pierwszej części rozdziału przeprowadzono identyfikację cech funkcjonalnych wybranych elementów układu zasilania, w szczególności elektrozaworu sterującego wlotem sprężonego powietrza do cylindra oraz kanału wylotowego. Analizy te pozwoliły na ocenę ich wpływu na przebieg procesów napełniania i opróżniania cylindra, a tym samym na charakterystykę pracy silnika.

Następnie Doktorant analizuje wpływ stopnia sprężania na parametry użytkowe silnika pneumatycznego. Przedstawiono zarówno wyniki badań eksperymentalnych, jak i analizy obliczeniowe, wskazując zgodność tendencji obserwowanych w obu podejściach oraz omawiając różnice wynikające z przyjętych uproszczeń modelowych.

Kolejne podrozdziały poświęcone są ocenie wpływu ciśnienia zasilania, wartości kąta początku wlotu sprężonego powietrza oraz czasu trwania wlotu na moment obrotowy, moc oraz zużycie sprężonego powietrza. Doktorant systematycznie prezentuje wyniki dla poszczególnych wariantów parametrów, wskazując ich znaczenie dla kształtowania przebiegu ciśnienia w cylindrze oraz efektywności pracy silnika. Każdy z analizowanych parametrów rozpatrywany jest zarówno w ujęciu eksperymentalnym, jak i symulacyjnym.

Rozdział zamyka syntetyczna analiza wpływu warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego, w której Doktorant zestawia uzyskane wyniki i wskazuje zależności umożliwiające świadome sterowanie charakterystyką jednostki. Przedstawione analizy potwierdzają przydatność opracowanego modelu matematycznego oraz pokazują, że odpowiednie kształtowanie warunków zasilania pozwala ukierunkować pracę silnika pneumatycznego w zależności od przyjętych kryteriów użytkowych, takich jak efektywność energetyczna lub ekonomiczna.

Zdaniem recenzenta Doktorant wykazał dobrą umiejętność prowadzenia pomiarów doświadczalnych sygnałów elektrycznych oraz właściwej ich interpretacji, co świadczy o posiadaniu szerokiej, interdyscyplinarnej wiedzy.

Jednocześnie zasadne wydaje się pytanie, czy w ramach analiz numerycznych przeprowadzono test zbieżności siatki obliczeniowej.

Rozdział 9 omawia efekt użytkowy uzyskanych wyników badań oraz wskazuje możliwe kierunki dalszych prac badawczo-rozwojowych. Doktorant odnosi się do praktycznego znaczenia przeprowadzonych analiz, podkreślając, że zaproponowane podejście do kształtowania warunków zasilania silnika pneumatycznego umożliwia świadome sterowanie jego parametrami użytkowymi w zależności od przyjętych kryteriów eksploatacyjnych. Wskazano, że opracowany model matematyczny, zweryfikowany eksperymentalnie, może stanowić użyteczne narzędzie wspomagające projektowanie oraz optymalizację tłokowych silników pneumatycznych. Wyniki pracy mogą znaleźć zastosowanie zarówno na etapie doboru parametrów konstrukcyjnych, jak i w procesie regulacji pracy silnika w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, w szczególności w układach o zmiennych wymaganiach dotyczących mocy, momentu obrotowego lub zużycia sprężonego powietrza. Doktorant zwraca również uwagę na możliwość wykorzystania uzyskanych rezultatów w dalszych badaniach nad rozwojem napędów pneumatycznych. Wskazane



kierunki dalszych prac obejmują między innymi rozszerzenie zakresu analiz o dodatkowe parametry zasilania, doskonalenie modelu matematycznego poprzez uwzględnienie bardziej złożonych zjawisk cieplnych i przepływowych, a także badania nad nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi elementów układu zasilania.

Rozdział dziewiąty podkreśla aplikacyjny charakter rozprawy i wskazuje, że uzyskane wyniki stanowią wartościową podstawę do dalszego rozwoju badań nad silnikami pneumatycznymi oraz ich potencjalnym wykorzystaniem jako alternatywnych źródeł napędu

Zdaniem recenzenta rozdział dziewiąty wyraźnie podkreśla aplikacyjny charakter rozprawy oraz wskazuje, że uzyskane wyniki stanowią wartościową i merytoryczną podstawę do dalszego rozwoju badań nad silnikami pneumatycznymi, a także do ich potencjalnego wykorzystania jako alternatywnych źródeł napędu.

Rozdział 10 zawiera syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań oraz najważniejsze wnioski wynikające z analiz teoretycznych i eksperymentalnych. Doktorant odnosi się bezpośrednio do sformułowanego problemu badawczego oraz zadań badawczych, wykazując, że zostały one w pełni zrealizowane, z czym recenzent się zgadza.

Wnioski potwierdzają istotny wpływ warunków zasilania na parametry użytkowe tłokowego silnika pneumatycznego. Doktorant wskazuje, że takie wielkości jak stopień sprężania, ciśnienie zasilania, wartość kąta początku wlotu sprężonego powietrza oraz czas trwania wlotu w sposób jednoznaczny kształtują przebieg ciśnienia w cylindrze, a w konsekwencji moment obrotowy, moc oraz zużycie sprężonego powietrza. Podkreślono możliwość celowego doboru tych parametrów w zależności od przyjętych kryteriów efektywności energetycznej lub ekonomicznej.

Istotnym elementem rozdziału jest również potwierdzenie przydatności opracowanego modelu matematycznego, który wykazuje dobrą zgodność jakościową i ilościową z wynikami badań eksperymentalnych. Doktorant wskazuje, że model ten może być wykorzystywany jako narzędzie prognostyczne i wspomagające dalsze prace projektowe.

Rozdział końcowy zamyka rozprawę w sposób logiczny i spójny, akcentując zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny charakter uzyskanych rezultatów oraz wskazując na ich znaczenie dla dalszego rozwoju badań nad silnikami pneumatycznymi

Literatura wykazana w rozprawie, obejmująca 191 pozycji, jest w pełni uzasadniona, aktualna oraz stanowi szeroki i reprezentatywny przegląd stanu wiedzy w zakresie poruszanej tematyki. Dobór źródeł świadczy o dobrej orientacji Doktoranta w krajowym i międzynarodowym dorobku naukowym dotyczącym silników pneumatycznych oraz zagadnień pokrewnych.

Doktorant powołuje się na siedem prac, których jest współautorem. Fakt ten należy ocenić pozytywnie, gdyż potwierdza aktywność naukową Doktoranta w obszarze objętym rozprawą oraz wskazuje, że wybrane fragmenty pracy doktorskiej opierają się na wynikach badań, które zostały już wcześniej opublikowane i uzyskały pozytywną ocenę w recenzowanym obiegu wydawniczym. Powyższe publikacje potwierdzają dojrzałość naukową Doktoranta oraz fakt, że przedstawione w rozprawie wyniki wpisują się w spójny i konsekwentnie realizowany program badawczy, akceptowany przez środowisko naukowe.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. *„Ocena modelowa i doświadczalna wpływu warunków zasilania silnika pneumatycznego na jego wskaźniki zewnętrzne”* stanowi spójne



i logicznie uporządkowane opracowanie naukowe, poświęcone analizie wpływu warunków zasilania oraz wybranych cech konstrukcyjnych na parametry użytkowe tłokowego silnika pneumatycznego. Praca wpisuje się w aktualny nurt badań nad alternatywnymi źródłami napędu i podejmuje problem istotny z punktu widzenia inżynierii mechanicznej oraz rozwoju niskoemisyjnych układów napędowych.

Doktorant jasno formułuje cel pracy, którym jest kompleksowa ocena wpływu kluczowych parametrów zasilania silnika pneumatycznego, takich jak stopień sprężania, ciśnienie zasilania, wartość kąta początku wlotu sprężonego powietrza oraz czas trwania wlotu, na przebieg procesów zachodzących w cylindrze oraz na podstawowe parametry użytkowe silnika. Cel ten realizowany jest konsekwentnie poprzez połączenie badań eksperymentalnych z analizami obliczeniowymi opartymi na autorskim modelu matematycznym.

Struktura rozprawy jest przejrzysta i logiczna. W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawia szerokie tło problemowe, obejmujące uwarunkowania techniczne, ekonomiczne oraz legislacyjne rozwoju jednostek napędowych, co stanowi poprawne wprowadzenie do podjętej tematyki. Rozdział drugi zawiera obszerny i uporządkowany przegląd stanu techniki w zakresie silników pneumatycznych oraz układów hybrydowych wykorzystujących sprężone powietrze. W rozdziale trzecim dokonano analizy stanu wiedzy dotyczącej metod badawczych i obliczeniowych stosowanych w badaniach silników pneumatycznych, ze wskazaniem ich możliwości i ograniczeń. Rozdział czwarty w sposób jednoznaczny definiuje problem badawczy oraz zadania badawcze, które stanowią logiczną konsekwencję przeprowadzonego przeglądu literatury. W rozdziale piątym Doktorant szczegółowo opisuje obiekt badań oraz proces konwersji silnika spalinowego do zasilania sprężonym powietrzem, a także przedstawia autorskie stanowisko hamowniane przeznaczone do badań eksperymentalnych. Rozdział szósty poświęcony jest opracowaniu matematycznego modelu silnika pneumatycznego, obejmującego część mechaniczną i pneumatyczną, co stanowi jeden z kluczowych, autorskich elementów pracy. W rozdziale siódmym przedstawiono metodykę badań, zapewniającą spójność i powtarzalność uzyskiwanych wyników. Najobszerniejszy rozdział ósmy zawiera analizy teoretyczno-eksperymentalne, w których Doktorant systematycznie ocenia wpływ poszczególnych parametrów zasilania na pracę silnika pneumatycznego, porównując wyniki badań doświadczalnych z rezultatami symulacji. Rozdział dziewiąty akcentuje aplikacyjny charakter uzyskanych wyników oraz wskazuje możliwe kierunki dalszych badań, natomiast rozdział dziesiąty zawiera syntetyczne i logicznie sformułowane wnioski końcowe.

Na szczególne podkreślenie zasługują elementy o charakterze autorskim, wśród których należy wymienić opracowanie i walidację matematycznego modelu silnika pneumatycznego, zaprojektowanie i wykonanie stanowiska hamownianego, a także kompleksową analizę wpływu wielu parametrów zasilania, dotychczas rzadko rozpatrywanych w literaturze. Praca ma wyraźny charakter poznawczo-aplikacyjny, a uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład do badań nad silnikami pneumatycznymi oraz ich potencjalnym zastosowaniem jako alternatywnych źródeł napędu.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska potwierdza, że Doktorant posiada wymaganą ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Zastosowana w pracy metodyka badawcza oraz sposób realizacji poszczególnych zadań badawczych świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta. Praca została opracowana starannie, a założenia badawcze, uzyskane wyniki oraz ich interpretacja zostały przedstawione w sposób przejrzysty i logiczny. Doktorant wykazuje świadomość przyjmowanych założeń upraszczających, potrafi trafnie identyfikować ograniczenia prezentowanych rozwiązań oraz proponować racjonalne sposoby ich eliminacji. W ocenie recenzenta rozprawa stanowi cenny wkład w rozwój Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna.



4. Uwagi, komentarze oraz pytania

Podczas analizy treści rozprawy pojawiają się pewne pytania, uwagi oraz komentarze o charakterze doprecyzowującym. Poniżej przedstawiono wybrane uwagi szczegółowe (część uwag została zamieszczona w sekcji 2 „Ogólny charakter rozprawy” i została sformułowana w trakcie omawiania poszczególnych rozdziałów):

- czy w torze pomiarowym momentu obrotowego uwzględniono straty wywołane między wałem wyjściowym silnika pneumatycznego, a układem pomiarowym, na który składają się dwa łożyska toczne i jeden element podatny sprzęgła kłowego?
- w nawiązaniu do poprzedniego pytania, czy istniała możliwość zaprojektowania stanowiska hamownianego bez zastosowania wału pośredniego, oznaczonego jako element 6 na rysunku 22, co pozwoliłoby na ograniczenie dodatkowych strat mechanicznych w torze pomiarowym?
- czy w ramach analiz numerycznych przeprowadzono test zbieżności siatki obliczeniowej?
- jedną ze zmian konstrukcyjnych podczas konwersji silnika spalinowego na silnik pneumatyczny może być modyfikacja pierścieni tłokowych, w szczególności ze względu na odmienne warunki termiczne pracy. Co Doktorant sądzi o zmianie liczby pierścieni lub ich materiału w celu zmniejszenia oporów tarcia? Czy rozważał Doktorant również zmianę pasowań, mając na uwadze, że pierścienie w silnikach spalinowych są projektowane do pracy w wysokich temperaturach?
- dlaczego Autor nie podał marki, modelu ani daty produkcji badanego silnika, co ogranicza możliwość jednoznacznej identyfikacji obiektu badań oraz odtworzenia eksperymentu?
- co Doktorant sądzi o stwierdzeniu, że korzystniejsze byłoby przyjęcie do modernizacji silnika czterosuwowego, ponieważ silniki tego typu są obecnie znacznie bardziej dostępne na rynku niż konstrukcje dwusuwowe, a przez to charakteryzują się większym potencjałem wdrożeniowym proponowanej modernizacji, zwłaszcza na terenie Unii Europejskiej?
- która z przedstawionych koncepcji silników pneumatycznych jest, zdaniem Doktoranta, najbardziej korzystna z punktu widzenia dalszego rozwoju ukierunkowanego na poprawę efektywności, oraz czy przyjęty w rozprawie wybór obiektu badań wynikał przede wszystkim z jego dostępności?
- czy uważa Pan, że słusznym kierunkiem rozwoju i promocji napędów pneumatycznych może być w pierwszej kolejności ich zastosowanie w obszarach, w których brak lokalnej emisji zanieczyszczeń powietrza jest szczególnie istotny, takich jak rolnictwo lub eksploatacja pojazdów na terenach chronionych?
- czy uproszczenie konstrukcji w postaci zastosowania pokrętła do startowego pozycjonowania wału korbowego pozwoliłoby na wyeliminowanie mechanizmu rozruchowego?



Jak wspomniano wcześniej, należy zwrócić uwagę na kilka kwestii formalnych i redakcyjnych. W przypadku rysunku 28 brakuje jednoznacznego odniesienia do literatury, mimo że z treści rozprawy wynika, iż nie jest to rysunek autorski. Rysunek 11 powinien zostać uzupełniony o opisy w języku polskim, zgodnie z językiem całej rozprawy.

Zasadne jest również doprecyzowanie opisu zastosowanego silnika oraz urządzeń pomiarowych poprzez podanie takich informacji, jak marka, model, rok produkcji, a także miejsce i kraj produkcji. Ułatwiłoby to jednoznaczną identyfikację wykorzystanych obiektów i aparatury oraz zwiększyło możliwość odtworzenia eksperymentu.

Ponadto wskazane jest konsekwentne doprecyzowanie w całym tekście rodzaju stosowanych układów hybrydowych, w szczególności poprzez jednoznaczne rozróżnienie pomiędzy konfiguracjami szeregowymi i równoległymi.

5. Wnioski końcowe

Uważam, że tematyka poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych badań oraz to, że Doktorant wykazał się umiejętnością rozwiązywania oryginalnego problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia w sposób ponadprzeciętny warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Podsumowując, wnoszę do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej o dopuszczenie mgr inż. Michała Korbuta do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Biorąc pod uwagę wysoki poziom prezentowanych w rozprawie prac, wnoszę do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Korbuta.

Eukasz Wągrna