

Dr hab. inż. Grzegorz Przybyła, Prof. PŚ
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 22
Tel. +48 32 237 29 52
Email: grzegorz.przybyla@polsl.pl

Gliwice, Luty 2026

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Korbuta

pt. *„Wpływ warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego”*

1. Informacje formalne

Niniejszą recenzję wykonałem na podstawie pisma przesłanego przez Przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej Pana Prof. dr. hab. inż. Romualda Mosdorfa z dn. 15.01.2026 r. Wraz z pismem otrzymałem egzemplarz pracy wydanej w postaci monografii oraz skrócony wydruk z Jednolitego Systemu Antyplagiatowego.

Zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” rozprawa doktorska powinna spełniać następujące warunki:

- *prezentować ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie naukowej,*
- *wykazywać umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora,*
- *stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.*

Oceny rozprawy dokonywałem pod kątem spełniania przedstawionych wyżej warunków.

2. Wybór tematu i ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy oceny wpływu warunków zasilania tłokowego silnika pneumatycznego na jego pracę. Jej zasadniczym celem jest określenie, w jaki sposób podstawowe parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne, takie jak stopień sprężania, ciśnienie zasilania, kąt początku wlotu oraz czas otwarcia zaworu zasilającego, kształtują przebieg ciśnienia powietrza w cylindrze, prędkość obrotową, moment obrotowy oraz jednostkowe zużycie powietrza. Rozwiązanie postawionego przez autora problemu naukowego zostało zrealizowane poprzez połączenie modelowania matematycznego i badań eksperymentalnych. W ramach pracy opracowano autorski model matematyczny silnika pneumatycznego z wykorzystaniem metody objętości skupionych, który zaimplementowano w środowisku MATLAB/Simulink. Równolegle przeprowadzono modyfikację seryjnego silnika spalinowego (jednocylindrowej jednostki dwusuwowej) na silnik pneumatyczny, a następnie zaprojektowano i zbudowano dedykowane stanowisko hamowniane umożliwiające realizację badań eksperymentalnych.

Podjęta tematyka ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne. W przeciwieństwie do silników spalinowych, dla których istnieją rozbudowane narzędzia obliczeniowe oraz szeroki zakres wyników badań w opracowaniach naukowych, badania tłokowych silników pneumatycznych prowadzone na bazie konstrukcji silników spalinowych były przedmiotem znacząco mniejszej liczby prac badawczych. Przede wszystkim brak jest opracowań koncentrujących się na określeniu wpływu parametrów zasilania silnika powietrzem na przebieg ciśnienia w jego cylindrze. Przebieg ten ma decydujący wpływ na charakterystykę i wartość średnią momentu obrotowego na wale korbowym, a w konsekwencji na sprawność energetyczną jednostki. Wypełnienie tej luki badawczej stanowi wartościowy wkład w rozwój wiedzy o napędach pneumatycznych. Ponadto, mając na uwadze możliwość adaptacji istniejących konstrukcji silników spalinowych do zasilania sprężonym powietrzem, podjęcie przez doktoranta tej tematyki wpisuje się w ideę racjonalnego wykorzystania zasobów i wydłużania cyklu życia produktów technicznych.

W szerszej perspektywie wyniki badań oraz opracowane narzędzia obliczeniowe mogą stanowić podstawę do opracowania map sterowania dla tłokowych silników pneumatycznych, celem optymalizacji ich parametrów w kierunku uzyskania oczekiwanej przez odbiorcę charakterystyki momentu obrotowego oraz zwiększenia efektywności energetycznej. Dlatego też wybór tego tematu uważam za w pełni uzasadniony, zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów, których ogólną charakterystykę zamieszczam poniżej.

Rozdział pierwszy, stanowi wprowadzenie w problematykę badawczą podjętą przez doktoranta, wraz z uzasadnieniem celowości prowadzenia badań nad tłokowymi silnikami pneumatycznymi. Autor omawia w nim kontekst środowiskowy, legislacyjny i technologiczny, przedstawiając skróconą charakterystykę współczesnych napędów spalinowych (z różnymi systemami spalania i z wykorzystaniem wybranych paliw). Wskazuje także wady i zalety stosowania napędów spalinowych, hybrydowych oraz elektrycznych, podając przy tym wskaźniki gęstości energii stosowanych w nich źródeł zasilania. W omawianym rozdziale autor sygnalizuje również istotną w jego ocenie lukę badawczą w obszarze tłokowych silników pneumatycznych. Jak zauważa, w dostępnej literaturze naukowej brakuje badań opisujących wpływ parametrów regulacyjnych, takich jak czas i moment wystąpienia zasilania sprężonym powietrzem w zależności od chwilowego położenia tłoka w cylindrze. Celowość podjętej tematyki badawczej jest dobrze uzasadniona.

Rozdział drugi poświęcony jest omówieniu stanu techniki w obszarze silników pneumatycznych. Autor rozpoczyna od przedstawienia rysu historycznego, wskazując, że idea napędu sprężonym powietrzem sięga połowy XIX wieku. W pierwszej części rozdziału przywołane zostały rozwiązania stosowane do napędu pojazdów szynowych w latach 70. XIX wieku. Następnie uwaga autora koncentruje się na konstrukcjach napędów pneumatycznych dedykowanych do samochodów. Omówiono zarówno pneumatyczne silniki tłokowe, jak i rotacyjne, w tym rozwiązania łopatkowe, spiralne, zębate oraz typu free-piston. Dla wybranych rozwiązań przedstawiono ich konstrukcję i zasadę działania, a także podano niektóre parametry użytkowe i eksploatacyjne. W dalszej części rozdziału scharakteryzowano hybrydowe układy napędowe łączące silniki pneumatyczne ze spalinowymi, uwypuklając w formie tabelarycznej zalety i wady analizowanych rozwiązań. W ostatniej części rozdziału autor wskazuje, że obecnie dostępne konstrukcje silników pneumatycznych nadają się jedynie do napędu lekkich pojazdów miejskich. Jednocześnie, w oparciu o przegląd wyników

badan naukowych, wyraża opinię, że jednostki te wykazują wysoki potencjał rozwojowy, który może w przyszłości przełożyć się na poprawę ich osiągnięć. Zawarte w rozdziale informacje stanowią dobry przegląd i usystematyzowanie dotychczasowej wiedzy w zakresie konstrukcji oraz parametrów pracy napędów pneumatycznych. W kontekście poruszanej tematyki autor zauważa, że ograniczenie śladu węglowego podczas produkcji podzespołów napędowych pojazdów można uzyskać poprzez konwersję istniejących silników spalinowych na silniki pneumatyczne.

W rozdziale trzecim autor omawia aktualny stan wiedzy dotyczący badań i obliczeń silników pneumatycznych, podkreślając podobieństwa do metod stosowanych w silnikach spalinowych. W pierwszej części skupia się na badaniach doświadczalnych prowadzonych na specjalistycznych stanowiskach eksperymentalnych (hamowniach silnikowych), opisując ich konstrukcję, elementy generujące obciążenie (np. hamulce elektromagnetyczne, hydrauliczne czy cierne) oraz aparaturę pomiarową umożliwiającą wyznaczenie mocy na wale korbowym. Przedstawione zostały przykładowe podejścia badawcze innych autorów zajmujących się problematyką konwersji tłokowych silników spalinowych na pneumatyczne, z przywołaniem wybranych wyników z literatury.

Dalsza część obejmuje przedstawienie możliwości zastosowania numerycznej mechaniki płynów (CFD) w badaniach i rozwoju konstrukcji silników pneumatycznych, z omówieniem zalet i wad tego typu narzędzi obliczeniowych. Następnie autor omawia podejście obliczeniowe oparte na modelowaniu matematycznym, polegające na formułowaniu równań różniczkowych opisujących procesy w silniku, implementowanych w programach takich jak MATLAB/Simulink, co pozwala na szybką weryfikację parametrów, optymalizację i porównanie z danymi doświadczalnymi. Rozdział napisany jest w sposób przejrzysty i logiczny. Autor umiejętnie łączy ogólne informacje o metodach obliczeniowych z konkretnymi przykładami z literatury.

W rozdziale czwartym autor formułuje problem badawczy oraz określa zadania badawcze rozprawy. Punktem wyjścia jest stwierdzenie, że postawiony problem badawczy, którym jest ocena wpływu warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego, został zidentyfikowany na podstawie analizy literatury przedmiotu oraz własnych badań wstępnych autora. Sformułowanych zostało pięć zadań badawczych. Cztery pierwsze, o charakterze analityczno-poznawczym, dotyczą oceny wpływu wybranych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych na pracę silnika, tj. stopnia sprężania, ciśnienia zasilania, kąta początku wlotu powietrza oraz czasu trwania wlotu powietrza zasilającego. Piąte zadanie ma charakter metodyczno-narzędziowy i zakłada opracowanie modelu obliczeniowego silnika, umożliwiającego wyznaczenie jego podstawowych charakterystyk.

W rozdziale piątym autor zawarł szczegółowe informacje na temat obiektu badań oraz procesu jego adaptacji do zasilania sprężonym powietrzem, a także opisał konstrukcję dedykowanego stanowiska hamownianego. Rozdział ten ma fundamentalne znaczenie dla części eksperymentalnej pracy, ponieważ prezentuje warsztat badawczy autora i stanowi podstawę realizacji zaplanowanych eksperymentów. W części dotyczącej wyboru obiektu badań autor precyzyjnie formułuje kryteria doboru, uwzględniając wytrzymałość konstrukcji, pozwalającą na badania przy różnych stanach pracy, oraz łatwą dostępność części zamiennych. Na tej podstawie dokonuje wyboru seryjnego silnika spalinowego (jednocylindrowego, dwusuwowego, o pojemności skokowej 55 cm³). Opis konwersji obiektu badań do zasilania sprężonym powietrzem stanowi najobszerniejszą i najbardziej szczegółową

część rozdziału. Autor opisuje zakres modyfikacji, podając jednocześnie uzasadnienie sposobu wprowadzanych zmian i zastosowanych komponentów, a także konsekwentnie dokumentuje wprowadzane modyfikacje, wspierając opis czytelnymi rysunkami. W dalszej części rozdziału zawarty został opis zbudowanej hamowni do badań eksperymentalnych silnika pneumatycznego. Decyzja o samodzielnym wykonaniu stanowiska, zamiast wykorzystania rozwiązań komercyjnych, została uzasadniona brakiem dostępnych rozwiązań spełniających specyficzne wymagania badawcze. Autor szczegółowo omawia dobór hamulca elektromagnetycznego, konstrukcję mechaniczną stanowiska, układy pomiaru momentu obrotowego i prędkości obrotowej, układy do pomiaru ciśnienia w cylindrze i zużycia powietrza, a także system sterowania i akwizycji danych. Ponadto przedstawione zostało kompleksowe zestawienie dokładności pomiarowej wykorzystanych urządzeń.

Rozdział szósty, zawiera opis opracowanego przez autora modelu matematycznego silnika pneumatycznego, który ma fundamentalne znaczenie dla przeprowadzenia analiz symulacyjnych. Autor rozpoczyna od ogólnego uzasadnienia celowości stosowania modelowania matematycznego w badaniach silników, wskazując na jego zalety, jak: możliwość szybkiej weryfikacji wpływu parametrów wejściowych, uniknięcie kosztownej budowy prototypów oraz możliwość badania skrajnych stanów pracy bez ryzyka uszkodzenia elementów. Zwraca również uwagę na konieczność przyjęcia odpowiednich założeń upraszczających oraz przeprowadzenia badań identyfikacyjnych, co świadczy o dojrzałym podejściu metodycznym. W dalszej części autor precyzyjnie określa specyfikę modelowanego obiektu i wprowadza podział modelu na dwie integralne części, mechaniczną i pneumatyczną. Część mechaniczna została opisana w oparciu o klasyczne zależności kinematyki i dynamiki układu tłokowo-korbowego. Część pneumatyczna stanowi bardziej rozbudowany fragment rozdziału. Autor decyduje się na zastosowanie metody objętości skupionych w połączeniu z zasadą zachowania masy. Wybór ten jest starannie uzasadniony z odwołaniem do właściwej literatury przedmiotu. Istotnym elementem modelu jest dobór funkcji przepływu. Na podstawie przeprowadzonej analizy różnych funkcji przepływu, doktorant uzasadnia wybór funkcji Miatluka-Awtuszki ze stałym współczynnikiem, wskazując jej zalety w odniesieniu do zjawisk występujących w modelowanym obiekcie. Krytyczna analiza i uzasadnienie wyboru świadczą o dojrzałości naukowej autora. Metodyka realizacji obliczeń koncentruje się na implementacji modelu w środowisku MATLAB/Simulink oraz doborze odpowiedniego solvera numerycznego. Autor porównuje dwie metody: ode45 (Rungego-Kutty z adaptacyjnym krokiem całkowania) oraz ode23tb (niejawna metoda trapezów z różniczkowaniem wstecznym). Wskazuje, że ze względu na wysoką dynamikę procesów zachodzących w silniku pneumatycznym, metoda ode45 wymaga bardzo małych kroków całkowania, co znacząco wydłuża czas obliczeń. Ostateczny wybór solvera ode23tb jest dobrze uzasadniony biorąc pod uwagę wysoką stabilność oraz krótszy czas obliczeń.

W rozdziale siódmym autor przedstawia metodykę badań, stanowiącą łącznik pomiędzy opracowanym modelem matematycznym a zaplanowanymi badaniami eksperymentalnymi. W rozdziale tym zdefiniowane zostały parametry oceny silnika pneumatycznego oraz podano sposób integracji badań symulacyjnych i doświadczalnych. Ponadto zdefiniowane zostały narzędzia statystyczne do oceny uzyskanych wyników. Informacje zawarte w rozdziale stanowią zwięzłe wprowadzenie czytelnika w przyjętą metodykę badawczą.

Rozdział ósmy stanowi kluczowa część pracy, w której autor prezentuje wyniki obszernego zakresu badań eksperymentalnych i symulacyjnych. W podrozdziale 8.1 autor wyznacza parametry przepływowe niezbędne do budowy modelu matematycznego silnika pneumatycznego, koncentrując się na dwóch głównych elementach, elektrozaworze wlotowym oraz kanale wylotowym. Ze względu na brak danych producenta elektrozaworu zastosowano uproszczony model przebiegu otwarcia, dzieląc go na trzy fazy (otwieranie, pełne otwarcie, zamykanie). Następnie przeprowadzono badania eksperymentalne, w których określono czasy opóźnień oraz rzeczywiste czasy otwarcia dla różnych długości impulsów sterujących a także wyznaczona zostaje przepustowość zaworu. Dla kanału wylotowego zastosowano podejście obliczeniowe z wykorzystaniem CFD w programie SolidWorks Flow Simulation, co można uznać za w pełni uzasadnione dla realizowanego w pracy charakteru badań. Dalej w podrozdziale 8.2 ocenie podlega wpływ stopnia sprężania na wybrane parametry charakteryzujące pracę silnika pneumatycznego. Badania eksperymentalne zrealizowano dla trzech jego wartości (3:1, 4:1, 5:1) podczas pracy silnika na biegu luzem oraz z obciążeniem. Podczas badań pomiarowi podlegały przebiegi ciśnienia, prędkość obrotowa wału korbowego i objętościowy strumień przepływu powietrza. Ocena wyników badań wykazała, że najbardziej korzystnym jest zastosowanie stopnia sprężania 4:1. W dalszej części przeprowadzone zostały symulacje komputerowe, a w toku przeprowadzonych analiz autor wskazuje konieczność korekty stopnia sprężania w modelu matematycznym. Podrozdział 8.3 obejmuje analizę wpływu ciśnienia zasilania na wcześniej oceniane parametry pracy silnika nieobciążonego. Badania realizowane są dla zakresu ciśnień 4,5 – 6,5 bara, z wykorzystaniem zarówno badań eksperymentalnych, jak i analiz obliczeniowych. Na podstawie uzyskanych wyników określana jest zgodność wyników eksperymentalnych z wynikami modelu matematycznego. W kolejnej części (podrozdział 8.4) autor analizuje wpływ kąta początku otwarcia zaworu zasilającego silnik powietrzem na analogiczne wielkości jak w punktach 8.2 i 8.3. Przy czym czas otwarcia zaworu był jednakowy dla wszystkich realizowanych testów z różnymi wartościami kąta otwarcia zaworu. Z kolei w podrozdziale 8.5 przedstawiono wyniki podobnych badań stosując jako parametr zadany zmienną wartość całkowitego czasu otwarcia zaworu zasilającego przy ustalonej wartości kąta jego otwarcia. Ostatnia część rozdziału, czyli podrozdział 8.6 stanowi syntezę wyników uzyskanych we wcześniejszych podrozdziałach (8.2 – 8.5), które przedstawiono w formie zbiorczych map rozkładu wartości. Zbiorcze wyniki obejmują wartości maksymalnego ciśnienia w cylindrze, średniego ciśnienia indykowanego, prędkości obrotowej, objętościowego strumienia przepływu powietrza, jednostkowego zużycia powietrza, momentu obrotowego oraz mocy na wale korbowym silnika w zależności od momentu otwarcia oraz czasu otwarcia zaworu powietrza dolotowego.

W rozdziale dziewiątym autor przedstawia podsumowanie osiągniętych efektów użytkowych pracy oraz formułuje propozycje kierunków dalszych badań nad silnikami pneumatycznymi. Rozdział ten pełni funkcję syntezy całej rozprawy, wskazując na jej wkład w rozwój dyscypliny oraz otwierając perspektywy dla przyszłych prac badawczych.

W rozdziale dziesiątym autor prezentuje wnioski końcowe z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowych. Autor rozpoczyna od stwierdzenia, że charakterystyka pracy silnika pneumatycznego jest w dużej mierze zależna od warunków zasilania, co stanowi potwierdzenie zasadności podjętego problemu badawczego. Następnie w sposób systematyczny omawia wpływ

poszczególnych parametrów na pracę jednostki, co jest bezpośrednim odniesieniem do zadań badawczych sformułowanych w rozdziale 4. W dalszej części rozdziału autor formułuje wnioski natury ogólniejszej. Stwierdza, że właściwe kształtowanie warunków zasilania umożliwia świadome sterowanie charakterystykami zewnętrznymi silnika, a uzyskane zależności stanowią cenne narzędzie w procesie optymalizacji. Podkreśla, że wyniki badań wypełniają lukę badawczą w zakresie systematycznej charakterystyki wpływu parametrów zasilania na pracę silników pneumatycznych.

3. Zalety pracy

Podstawową zaletą rozprawy jest kompleksowe podejście badawcze do analizowanego problemu naukowego, polegające na połączeniu badań eksperymentalnych z symulacjami komputerowymi. Autor przeprowadził modyfikację tłokowego silnika spalinowego na silnik pneumatyczny, samodzielnie skonstruował dedykowaną do obiektu badań hamownię silnikową, wyposażył ją w aparaturę kontrolno-pomiarową oraz zrealizował szeroki zakres badań eksperymentalnych. Przeprowadzenie tych prac wymagało interdyscyplinarnej wiedzy z zakresu mechaniki, elektroniki oraz automatyki, co wskazuje na wysokie kompetencje autora i umiejętność łączenia teorii z praktyką inżynierską.

Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone w oparciu o opracowany przez doktoranta model matematyczny z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB/Simulink. Opis matematyczny działania układu tłokowo-korbowego oraz zjawisk termodynamicznych zachodzących w silniku pneumatycznym (z zastosowaniem metody objętości skupionych dla części pneumatycznej), a następnie jego implementacja w środowisku MATLAB/Simulink potwierdzają dobre rozeznanie w technikach modelowania matematycznego i realizacji obliczeń. Opracowany model może być dalej rozwijany i wykorzystywany do szerszych analiz, w tym optymalizacyjnych, a zaprezentowane w rozdziale ósmym pracy wyniki badań stanowią mogą cenny materiał źródłowy do przyszłych prac badawczych.

Zaletą pracy jest również to, że badania skupiają się na rozwiązaniu opartym na adaptacji tłokowego silnika spalinowego do napędu pneumatycznego co ma istotne znaczenie w aspekcie środowiskowym i zrównoważonego rozwoju. Adaptacja istniejących silników spalinowych do pracy w charakterze jednostek pneumatycznych umożliwia na ponowne wykorzystanie zasobów i wydłużanie cyklu życia produktów. Taki zabieg prowadzi dalej do ograniczenia zużycia surowców i energii, a także może korzystnie wpłynąć na redukcję emisji zanieczyszczeń w tym gazów cieplarnianych i ilość odpadów. To ważny akcent, pokazujący, że autor dostrzega szerszy kontekst swoich badań i ich potencjalny wkład w realizację celów zrównoważonego rozwoju.

4. Ogólne uwagi krytyczne

Dysertacja charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym i starannością redakcyjną. Niemniej jednak, jak to często bywa w przypadku prac o takim charakterze, można w niej dostrzec drobne usterki redakcyjne oraz sformułowania nie w pełni precyzyjne. Poniżej przedstawiam uwagi ogólne, odnoszące się do wybranych fragmentów tekstu i rozdziałów pracy:

- a) Zadania badawcze przedstawione w rozdziale czwartym mogłyby być bardziej doprecyzowane w szczególności pojęcie „na pracę silnika spalinowego” odnoszące się do zadań badawczych od 1 do 4 jest w mojej ocenie zbyt ogólne. Dalej w pracy (strona 65) znajduje się zdanie „*Parametry pracy silnika stanowiły*

podstawowe kryterium oceny jego sprawności energetycznej oraz zdolności do konwersji energii powietrza dostarczonego w cyklu roboczym na użyteczną pracę mechaniczną". Jednak w pracy brak jest bezpośredniej oceny sprawności energetycznej badanego silnika pneumatycznego.

- b) Autor wielokrotnie posługuje się pojęciem „emisyjność” w kontekście wielkości emisji substancji szkodliwych powstałych podczas spalania, na przykład w sformułowaniach takich jak: „nie generują emisyjności”, „redukcja emisyjności”, „osiągów oraz emisyjności” czy „ograniczenia emisyjności”. Należy zauważyć, że w języku technicznym termin „emisyjność” zarezerwowany jest dla wielkości fizycznej stosowanej w analizie wymiany ciepła przez promieniowanie. W związku z powyższym używanie go w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń jest terminologicznie nieprawidłowe.
- c) Założenia upraszczające wymienione w pracy w odniesieniu do modelu matematycznego powinny być bardziej uszczegółowione. Autor nie wskazuje z jakiego powodu zdecydował się traktować powietrze jak gaz doskonały. Dodatkowo użycie zwrotu cyt. „w danej objętości stan powietrza był stały i zależał od czasu” jest mylące. W modelu przyjęto wymianę ciepła na zasadzie konwekcji swobodnej od ścianek silnika do otoczenia, jednak nie wiadomo w jaki sposób założono temperaturę ścianek oraz wyznaczono współczynnik wnikania ciepła.
- d) W rozdziale ósmym pracy autor przedstawił obszerne i wartościowe wyniki badań, nie wyjaśnia jednak, dlaczego opracowany model matematyczny nie został wykorzystany do symulacji obliczeniowych silnika pracującego pod obciążeniem. W części tej brakuje również szerszej oceny uzyskanych wyników pod kątem efektywności energetycznej silnika co niewątpliwie wyraźnie ukazałoby jakość konwersji energii rozprężanego powietrza.

5. Szczegółowe uwagi krytyczne

Jak wskazano wcześniej, praca zawiera drobne usterki redakcyjne i językowe, takie jak: literówki, nieprecyzyjne nazewnictwo oraz niejasne opisy. Poniżej wymieniono wybrane przykłady tego typu uchybień:

- w pracy zauważono pewną niezgodność z przyjętymi w polskojęzycznych opracowaniach naukowych standardami redakcyjnymi, odwołania do rysunków i tabel powinny być zapisywane małą literą (tj. „rys.”, „tab.”). Autor konsekwentnie stosuje natomiast zapis wielką literą („Rys.”, „Tab.”).
- na stronie 10; jest: *„...o różnej aktywności chemiczne..”* – powinno być *„chemicznej..”*; jest: *„...wymienionych na rozwiązania..”* – powinno być *„...wymienionych rozwiązań..”*
- na stronie 12; cyt.: *„Wśród głównych wad należy wyróżnić przede wszystkim skomplikowany proces spalania, oraz predyspozycje do powstawania szkodliwych związków tlenków azotu, w szczególności podczas niepełnego spalania.”* Zdanie zawiera błąd interpunkcyjny, ponadto *„związków tlenków azotu”* jest nielogiczne powinno być *„tlenków azotu”*, dodatkowo stwierdzenie *„w szczególności podczas niepełnego spalania”* jest błędne; na tej samej stronie, jest: *„azotków tlenu”* – zwrot niepoprawny,
- na stronie 13; cyt.: *„Proces produkcji baterii pojazdów elektrycznych jest ciągle udoskonalany, niestety wciąż nie rozwiązano problemu kwestii ekologiczności*

produkcji baterii". Wyrażenie "problemu kwestii" jest niepoprawne, ponieważ oba słowa są w tym kontekście synonimami. Wyraz "ekologiczności" można uznać w tym zdaniu za poprawny, ale w kontekście produkcji lepiej brzmi np. "wpływu na środowisko".

- na stronie 13-14; cyt.: „...wykorzystującymi wodór do procesu elektrolizy..”. Powinno być np. „...wykorzystującymi wodór pochodzący np. z procesu elektrolizy..”.

- na stronie 14; cyt.: „Napełnienie zbiornika sprężonym powietrzem możliwe jest do zrealizowania w podobnym czasie co tankowanie auta spalinowego”. Stwierdzenie jest dyskusyjne, bo nie podaje do jakiego ciśnienia ładowany jest zbiornik powietrza, o jakiej jest pojemności i dla jakiego paliwa można zastosować to porównanie oraz czy wspólnym mianownikiem jest np. ilość zgromadzonej energii.

- na stronie 19-20; jest: „...co w dalszej kolejności skutkowało..” – powinno być „...co w dalszej kolejności skutkowało..”.

- na stronie 36; jest: „Problemem pozostałą konieczność..” – powinno być „Problemem pozostała konieczność..”.

- na stronie 39; jest: „...wystąpienia przepływu..” – powinno być „...wystąpienie przepływu..”.

- na stronie 55 we wzorze (6.8) jest F_c – powinno być F_k

- na stronie 56; jest: „...wartość uśrednioną..” – powinno być „...wartości uśrednionej..”.

- na stronie 57; cyt.: „Założenia upraszczające, które były niezbędne do przeprowadzenia modelowania za pomocą metody objętości skupionych to między innymi” – sformułowana teza ma charakter arbitralny, ponieważ wynika z subiektywnego przekonania autora o niezbędności przyjętych założeń

- na stronie 58. W tekście głównym: zamiast „współczynnik wymiany ciepła” powinno być „współczynnik wnikania ciepła”. We wzorach (6.19) oraz (6.20): wielkości te opisują odpowiednio „strumień entalpii doprowadzonej do układu” i „strumień entalpii odprowadzonej z układu”, a nie – jak błędnie zapisano – „ciepło dostarczone” i „odprowadzone”. Ponadto sformułowanie „Entalpia ciepła” jest niepoprawne; wielkość przedstawiona wzorem (6.23) to entalpia właściwa

- na stronie 75; cyt.: „Na podstawie wyznaczonego przepływu objętościowego możliwe było obliczenie przepustowości zaworu przy danym czasie, po wcześniejszym przekształceniu go na przepływ masowy i wykorzystaniu wzoru 6.34.” – należałoby doprecyzować dla jakich parametrów stanu obliczano gęstość powietrza, ponieważ w równaniu 6.34 wskazane są parametry wejściowe podczas gdy przyrząd pomiarowy wskazywał wartość objętościowego przepływu dla ustalonych warunków odniesienia np. warunków normalnych

- na stronie 76; cyt.: „W kolejnym etapie prac przeprowadzono statyczną analizę przepustowości kanału wylotowego.....do modelu matematycznego silnika pneumatycznego”. – cytowany tekst pojawia się dwa razy na tej samej stronie

- na stronie 85; cyt.: „Badania polegały na rejestrowaniu pracy silnika przez około 1000 cykli pracy”. – informacja jest niejednoznaczna w szczególności co do określenia wskaźnika (8.3)

- na stronie 126; podpis rys. 60, podpunkt „e” oraz „f” mają jednakową nazwę tj. „maksymalna wartość uzyskanego momentu obrotowego”
- na stronie 132; w zdaniu cyt.: *„Wyniki przeprowadzonych badań dowiodły, że właściwe kształtowanie warunków zasilania i regulacji silnika pneumatycznego umożliwiają świadome sterowanie jego charakterystykami zewnętrznymi”* – występuje błąd w liczbie (powinno być *„umożliwia”*).
- na stronie 132; w akapicie dotyczącym modelu matematycznego pojawia się sformułowanie *„..istotnie skróci czas..”* – brakuje końcówki, powinno być *„skrócić czas”*.

6. Wniosek końcowy

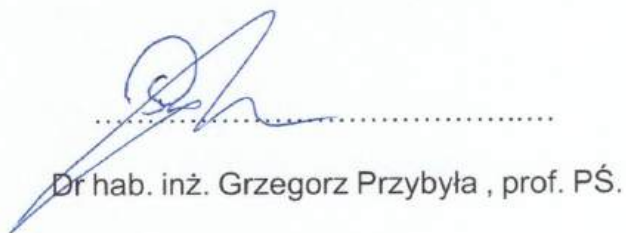
Praca doktorska mgr inż. Michała Korbuta prezentuje wysoki poziom merytoryczny i stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy o tłokowych silnikach pneumatycznych bazujących na konstrukcji silników spalinowych. Autor trafnie identyfikuje lukę badawczą, a następnie podejmuje się zaprojektowania stanowiska badawczego i realizacji opracowanej koncepcji badań, która łączy modelowanie z eksperymentem. Praca zawiera rzetelną analizę wyników przy zachowaniu umiejętności krytycznej oceny własnych osiągnięć. Ma zarówno walory poznawcze (systematyzacja wiedzy o wpływie parametrów zasilania na pracę silnika), jak i aplikacyjne (procedury badawcze, perspektywa opracowania map sterowania).

Prezentowany przez doktoranta warsztat badawczy, łączący umiejętności projektowe, konstrukcyjne i analityczne, zasługuje na szczególne uznanie i świadczy o posiadaniu przez niego ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna. Oryginalność w zakresie zastosowań prezentują wyniki badań przedstawione w rozdziałach szóstym, siódmym i ósmym pracy.

Wskazane w niniejszej recenzji nieścisłości nie umniejszają wartości naukowej pracy, a przywołane kwestie doktorant może wyjaśnić podczas obrony w toku dyskusji naukowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wniosuję zatem do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej o dopuszczenie pracy do publicznej obrony. Jednocześnie uznaję, że praca spełnia warunki wyróżnienia rozpraw doktorskich określone w § 10 „Zasad przeprowadzania postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w Politechnice Białostockiej” i wnioskuję o jej wyróżnienie.

Gliwice dnia 26.02.2026 r.



Dr hab. inż. Grzegorz Przybyła, prof. PŚ.