

dr hab. inż. Grzegorz Zając, prof. uczelni
Katedra Energetyki i Środków Transportu
Wydział Inżynierii Produkcji
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin

Lublin, dn. 09.02.2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Korbuta

na temat

„Wpływ warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego”

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

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej prof. dr hab. inż. Romualda Mosdorfa z dnia 17.12. 2025 roku (WM- IIM.4130.8.25), do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej w wersji drukowanej.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Korbuta pt.: „Wpływ warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego” stwierdzam, że kwalifikuje się ona do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

2. Charakterystyka i ogólna ocena pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, Liczy wraz z bibliografią 145 stron. Podzielono ją na 11 numerowanych rozdziałów oraz nienumerowane rozdziały: wykaz oznaczeń i streszczenie w j. polskim i angielskim. Rozprawa zawiera 60 rysunków i 26 tabel. Rysunki i tabele są właściwie opisane, a w tekście znajduje się odwołanie do każdego rysunku i tabeli. Wykaz literatury jest obszerny, w pracy umieszczono 191 pozycji literaturowych. Praca napisana została poprawnym językiem i sformatowana w sposób czytelny oraz zrozumiały.

Praca zawiera poprawną dla prac naukowych strukturę oraz logiczną kolejność rozdziałów i podrozdziałów. Zrealizowany program badań jest szeroki, a uzyskane wyniki zostały przedstawione czytelnie w postaci tabelarycznej i graficznej oraz szeroko opisane. Praca jest spójna i kompleta. Treść rozprawy jest zgodna z tytułem. Cel rozprawy został zrealizowany, a wnioski znajdują potwierdzenie w opracowaniu wyników badań.

Rozdział 1 opracowania zatytułowany „**Geneza tematu**” ma na celu uzasadnienie podjęcia tematyki badań poprzez szerokie osadzenie jej w aktualnym kontekście legislacyjnym, technologicznym i środowiskowym. Autor wskazał, że mimo intensywnego rozwoju zaawansowanych technologii silników spalinowych oraz systemów oczyszczania spalin, ich skuteczność i opłacalność są ograniczone, co przyspiesza odchodzenie od konwencjonalnych napędów. Autor dokonał przeglądu alternatywnych źródeł zasilania, obejmującego paliwa alternatywne, układy hybrydowe oraz napędy elektryczne. W tym kontekście napędy pneumatyczne zostały zaprezentowane jako niedostatecznie zbadana, lecz perspektywiczna technologia. Kluczowym celem rozdziału jest wskazanie luki badawczej dotyczącej wpływu warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego oraz uzasadnienie potrzeby dalszych badań obliczeniowych i eksperymentalnych w tym obszarze.

Rozdział 2 „**Stan techniki w obszarze silników pneumatycznych**” zawierający 5 podrozdziałów jest przeglądem stanu wiedzy z zakresu stanu techniki silników pneumatycznych. Przedstawiony jako pierwszy zarys historyczny rozwoju napędów pneumatycznych pojazdów stał się bazą do opisanie w kolejnych podrozdziałach pięciu rozwiązań konstrukcyjnych silników zasilanych sprężonym powietrzem. Opisane zostały także trzy rozwiązania układów hybrydowych łączące silnik spalinowy z zasilaniem sprężonym powietrzem. Przedstawiono również informacje dotyczące konwersji silników spalinowych do zasilania sprężonym powietrzem. Całość zakończona jest podsumowaniem, gdzie przedstawione w poprzednich podrozdziałach informacje zebrano w formie tabel.

W rozdziale 3 „**Stan wiedzy związanej z badaniami i obliczeniami silników pneumatycznych**” Autor w trzech podrozdziałach przedstawił stan wiedzy poświęcony badaniom doświadczalnym i numerycznym oraz analizom bazujących na modelowaniu matematycznym silników pneumatycznych. Zaprezentowane zostały wykorzystywane dotychczas metody badań doświadczalnych, metody numeryczne wykorzystujące oprogramowane CFD oraz narzędzia i przykłady wykorzystujące modelowanie matematyczne. W konkluzji czwartego podsumowującego podrozdziału Autor stwierdził, że mimo rozwoju metod empirycznych podstawową metodą badawczą silników pneumatycznych pozostają badania doświadczalne. Jednak powstanie uniwersalnego modelu matematycznego uprościłoby przeprowadzanie badań doświadczalnych.

W rozdziale 4 „**Problem badawczy i zadania badawcze**” Doktorant zawarł kluczowe dla pracy elementy. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu stanu wiedzy zidentyfikowany został problem badawczy oraz prawidłowo przedstawiono pięć zadań badawczych prowadzących do rozwiązania tego problemu.

Rozdział 5 „**Obiekt badań**” charakteryzuje wybrany obiekt badań jakim był silnik pneumatyczny powstały na bazie jednocyldrowego dwusuwowego silnika spalinowego. Autor szeroko opisał sposób dostosowania wybranego silnika spalinowego do zasilania sprężonym

powietrzem. Konwersja obejmowała osiem modyfikacji, zostały one opisane i zobrazowane materiałami ilustracyjnymi. W drugim podrozdziale przedstawiono opracowane stanowisko badawcze umożliwiające wykonanie zaplanowanych badań eksperymentalnych. Budowa stanowiska również została zilustrowana poprzez zamieszczenie fotografii wraz z opisem.

Rozdział 6 „**Modelowanie matematyczne**” zawiera opis koncepcji modelowania matematycznego badanego silnika. Autor bazując na modelu jednocyldrowego, tłokowego silnika spalinowego stworzył model dla silnika pneumatycznego, przy czym wyróżnił dwie części mechaniczną i pneumatyczną. Zarówno model części mechanicznej jak i pneumatycznej został w pracy opisany. Zaprezentowano również metodykę realizacji obliczeń. Analizy obliczeniowe Autor zrealizował w środowisku MATLAB/Simulink.

Rozdział 7 „**Metodyka badań**” przedstawia parametry analizowane w pracy i wzory obliczeniowe. W rozdziale tym zaprezentowano również schemat metodyki postępowania mającej na celu realizację zadań badawczych rozprawy.

Rozdział 8 „**Analizy Teoretyczno-Eksperymentalne**” to główny i najobszerniejszy rozdział pracy. Zawiera on wyniki badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Rozdział ten uwzględnia podrozdziały zgodne ze schematem przyjętej metodyki przedstawionym w rozdziale 7.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych są przedstawione graficznie oraz tabelarycznie i szeroko komentowane. Wyniki analiz obliczeniowych poprzedzone są wartościami warunków brzegowych przyjętych do obliczeń, wyniki te są przedstawione graficznie i tabelarycznie oraz odniesione do wyników eksperymentalnych. Schemat ten powtarzano dla wszystkich analizowanych parametrów: stopnia sprężania, ciśnienia zasilania, kąta początku wlotu, czasu trwania wlotu powietrza.

Ostatni podrozdział zawiera podsumowanie przeprowadzonych analiz eksperymentalno-obliczeniowych. Autor przedstawił opracowane mapy rozkładu uzyskanych wartości i podsumowanie uzyskanych wyników.

Rozdział 9 „**Efekt užitarny pracy oraz propozycje dalszych badań**” to syntetyczne podsumowanie rezultatów badań eksperymentalnych i analiz obliczeniowych silnika pneumatycznego oraz ocena ich znaczenia naukowego i aplikacyjnego. Autor przedstawił w 9 punktach propozycje dalszych prac badawczych.

W rozdziale 10 „**Wnioski**” Autor stwierdził, że cel badań został zrealizowany oraz odniósł się do postawionych zadań badawczych. Autor wskazuje, że kluczowym czynnikiem determinującym charakterystyki pracy silnika są warunki zasilania i parametry regulacyjne, których świadome kształtowanie umożliwia sterowanie osiągami, stabilnością oraz zużyciem sprężonego powietrza. Wykazano istotny wpływ stopnia sprężania, ciśnienia zasilania oraz

parametrów otwarcia zaworu wlotowego, przy czym najlepsze rezultaty uzyskano dla wartości pośrednich, zapewniających kompromis między sprawnością a stabilnością pracy. Autor podkreśla również ograniczenia eksploatacyjne wynikające z podwyższania ciśnienia zasilania oraz ich konsekwencje energetyczne i ekonomiczne. Istotnym elementem rozdziału jest ocena opracowanego modelu matematycznego, który uznano za użyteczne narzędzie wspomagające proces projektowania i optymalizacji silników pneumatycznych, mimo konieczności dalszego dopracowania. Doktorant potwierdza techniczną możliwość konwersji jednostek spaliniowych do pneumatycznych, akcentując ich potencjał w kontekście zrównoważonego rozwoju.

Kolejny **11 rozdział** rozprawy to spis literatury wykorzystanej w dysertacji. Dobór źródeł jest poprawny. Doktorant korzystał z 191 publikacji, były to publikacje zwarte tj. książki i czasopisma, publikacje elektroniczne, normy, patenty. Wszystkie pozycje bibliograficzne są istotnie związane z podjętą w rozprawie problematyką. Wykorzystana literatura jest aktualna, ok. 65% pozycji pochodzi z ostatnich 10 lat, w większości są to pozycje obcojęzyczne.

Podsumowując, przyjęty układ rozprawy oceniam jako logiczny i czytelny. Strona edytorska pracy nie budzi zastrzeżeń. Strona graficzna rozprawy jest staranna, a rysunki i wykresy w większości przypadków są przygotowane poprawnie i czytelnie. Dobór pozycji bibliograficznych jest odpowiedni.

3. Ocena wyboru tematu, problemu i zadań badawczych rozprawy

Poruszana w pracy problematyka wpływu warunków zasilania sprężonym powietrzem na pracę silnika pneumatycznego jest ważna i aktualna.

Presja regulacyjna na zmniejszenie emisji motoryzacyjnych związana z globalną polityki neutralności węglowej przesunęła uwagę badaczy na zielone i ekonomiczne rozwiązania w zakresie napędów pojazdów. Jednym z takich rozwiązań może być zasilanie sprężonym powietrzem, które eliminuje potrzebę spalania paliw kopalnych. Zerowa emisja spalin w miejscu użytkowania, jest dużą zaletą w kontekście transportu miejskiego i obszarów o dużym natężeniu ruchu samochodowego. Napędy pneumatyczne – wykorzystujące sprężone powietrze jako nośnik energii – oferują unikalne możliwości i mogą uzupełniać lub w niektórych zastosowaniach zastępować tradycyjne układy napędowe. Dlatego też badania nad silnikami pneumatycznymi w kontekście napędów pojazdów stanowią istotny obszar z punktu widzenia rozwoju technologii napędowych. Przy obecnym stanie techniki napędy pneumatyczne, ze względu na istotne ograniczenia nie są w stanie zastąpić konwencjonalnych napędów. Modele i testy symulacyjne wykazują jednak, że odpowiednia konfiguracja pneumatycznych elementów układu napędowego ma potencjał do ich samodzielnego zastosowania lub integracji takich układów z innymi rozwiązaniami napędowymi. Badania w tym zakresie mogą przyczynić się do rozwoju innowacyjnych i bardziej zrównoważonych rozwiązań napędów.

Dlatego też uważam, że podjęte przez Doktoranta badania nad silnikami pneumatycznymi i warunkami ich zasilania są badaniami ważnymi, ciekawymi i znajdującymi się w aktualnych trendach prowadzonych prac badawczych.

Autor zidentyfikował lukę badawczą w obszarze badań silników pneumatycznych i uznał, że zbadanie tych zagadnień może przyczynić się do popularyzacji takich napędów jako alternatywy w stosunku do napędów konwencjonalnych.

Temat i zakres pracy został poprawnie wybrany. Podjętą tematykę należy uznać za trafną i wpisującą się w aktualny i interesujący obszar badawczy.

Doktorant wykazał istnienie luki badawczej oraz wskazał na brak opracowań naukowych dotyczących wpływu podstawowych parametrów zasilania silników pneumatycznych na ich pracę. Pozwoliło to na określenie problemu badawczego, którym była **ocena wpływu warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego**. Dla tak postawionego problemu badawczego sformułował pięć zadań badawczych pracy:

- 1) Ocena wpływu stopnia sprężania na pracę silnika pneumatycznego.
- 2) Ocena wpływu ciśnienia zasilania na pracę silnika pneumatycznego.
- 3) Ocena wpływu kąta początku wlotu powietrza zasilającego na pracę silnika pneumatycznego.
- 4) Ocena wpływu czasu trwania wlotu powietrza zasilającego na pracę silnika pneumatycznego.
- 5) Opracowanie modelu obliczeniowego silnika pneumatycznego pozwalającego na wyznaczenie jego podstawowych charakterystyk.

Zarówno problem badawczy pracy jaki i zadania są dobrze osadzone w aktualnej problematyce naukowo-badawczej. Autor konsekwentnie dążył do rozwiązania postawionego zadania badawczego. Świadczy to o dobrym rozpoznaniu tematyki rozprawy i przygotowaniu do prowadzenia zarówno rozważań teoretycznych, jak i badań eksperymentalnych oraz ich wnikliwej analizy.

Do realizacji zadań badawczych rozprawy Autor opracował modele matematyczne i zaimplementował je w środowisku umożliwiającym przeprowadzenie obliczeń. Dostosował silnik spalinowy do zasilania pneumatycznego. Opracował i zbudował stanowisko eksperymentalne (hamowni obciążeniowej) umożliwiające walidację obliczeń wyników poprzez badania eksperymentalne. Zaprezentowane i przeanalizowane w dysertacji wyniki badań eksperymentalnych oraz numerycznych korespondują ze sformułowanym celem rozprawy.

Do istotnych walorów recenzowanej rozprawy zaliczyć należy:

- 1) Dokonanie analizy konstrukcji silnika pod kątem możliwości zasilania sprężonym powietrzem i przeprowadzenie konwersji, co wykazało możliwość wykorzystania istniejących konstrukcji silników tłokowych jako podstawy do adaptacji do silników pneumatycznych.
- 2) Opracowanie oryginalnej koncepcji dedykowanego stanowiska badawczego i jego wykonanie, co umożliwiło przeprowadzenie pomiarów i pozwoliło na szczegółowe przeanalizowanie podstawowych parametrów pracy silnika pneumatycznego.
- 3) Przeprowadzenie analizy i opracowanie modelu matematycznego silnika pneumatycznego, który umożliwiał prognozowanie podstawowych parametrów pracy jednostki przy zadanych warunkach zasilania.
- 4) Zweryfikowanie poprawności modelu poprzez porównanie wyników symulacyjnych z rezultatami badań dostarczając usystematyzowanej charakterystyki wpływu stopnia sprężania,

ciśnienia zasilania oraz parametrów regulacyjnych zaworu na efektywność energetyczną i stabilność pracy silnika pneumatycznego.

- 5) Wykazanie, że właściwe kształtowanie warunków zasilania i regulacji silnika pneumatycznego umożliwia sterowanie jego charakterystykami zewnętrznymi.

Reasumując stwierdzam, że Doktorant opracował oryginalne i wartościowe rozwiązania dostarczając usystematyzowanej charakterystyki wpływu stopnia sprężania, ciśnienia zasilania oraz parametrów regulacyjnych zaworu na efektywność energetyczną i stabilność pracy silnika pneumatycznego

Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac koncepcyjnych, badań eksperymentalnych, analiz teoretycznych oraz przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

4. Uwagi merytoryczne i kwestie dyskusyjne

Przedstawiona rozprawa jest wartościowa merytorycznie ze względu na analizę ważnego zagadnienia jakim jest poprawa działania silników pneumatycznych w aspekcie ich przyszłego szerszego zastosowania. Oceniając stronę merytoryczną przedstawionej rozprawy stwierdzam, że właściwie dobrano zakres badań i metodykę badawczą. Prezentacja wyników badań oraz przeprowadzone analizy wskazują na umiejętność prowadzenia badań naukowych. Podczas szczegółowej analizy recenzowanej dysertacji nasuwają się pewne uwagi natury ogólnej i szczegółowej:

- 1) Nie wszystkie rozdziały przeglądu literatury są uzasadnione jako istotne z punktu widzenia tematyki dysertacji. Autor przedstawił stan techniki w zakresie silników pneumatycznych jednak tylko krótki podrozdział dotyczący konwersji odnosi się bezpośrednio do tematu rozprawy. Podobnie w rozdziale dotyczącym badań i obliczeń silników znalazło się niewiele odniesień do zasadniczych problemów rozprawy. Na korzyść Autora przemawia sformułowanie usystematyzowanych wniosków z przeprowadzonych analiz literaturowych.
- 2) Doktorant grupuje odnośniki do literatury nawet do 5 pozycji w rezultacie czego w pierwszym rozdziale (7 stron) znajduje się 97 pozycji bibliografii. Nie jest to standard przyjęty w nauce, Autor powinien odwołać się do konkretnych informacji, które są wykorzystane przy cytowanej pozycji.
- 3) Rozdział „Wnioski” powinien odnosić się bezpośrednio do zrealizowanych zadań badawczych i dać odpowiedź na zidentyfikowany problem badawczy. Autor tak jednak rozbudował ten rozdział, że czytelnik ma problemy ze zidentyfikowaniem kluczowych wniosków.
- 4) Rozdział „Efekt użytkowy oraz propozycje dalszych badań” w zasadzie zawiera podsumowanie wyników i informacje, które znajdują się w rozdziale wnioski, a dopiero na końcu wypunktowane informacje dotyczące tych propozycji. Efektu użytkowego można się doszukać w czterech wierszach. Zdecydowanie lepszy byłby odbiór dysertacji, gdyby był to ostatni rozdział rozprawy.

- 5) Przedstawiony w rozdziale 7 na rys. 30 schemat przyjętej metodyki postępowania sugeruje, że poszczególne kroki badań będą realizowane szeregowo. Czytelnik może spodziewać się, że kolejne parametry będą przyjmowane wg wartości uznanych za najkorzystniejsze. W rzeczywistości schemat działania był równoległy i poszczególne badania i ich wyniki nie miały wpływu na kolejne, a ich kolejność mogłaby być dowolnie zmieniona.
- 6) Analizując wpływ warunków zasilania dla badań z obciążeniem Autor stwierdził, że wartości ciśnienia maksymalnego rosły wraz ze wzrostem kąta α_{oz} jak i z wydłużeniem czasu otwarcia zaworu. Analizując rys. 60 a trudno się do końca zgodzić z tą interpretacją. Wartość minimalna ciśnienia faktycznie jest najniższego czasu otwarcia i najmniejszego kąta, a maksymalna dla największych wartości. Jednak wartości pośrednie przyjmują różne wartości. Proszę o ustosunkowanie się Doktoranta do tych zmian.
- 7) Jak należy zinterpretować uzyskane wyniki. W jednym miejscu Doktorant zauważa, że regulacja kąta α_{oz} w zakresie 115-140° oraz wydłużenie czasu otwarcia zaworu do 17-21 ms pozwalają uzyskać jednocześnie wysokie wartości momentu i mocy przy umiarkowanym jednostkowym zużyciu powietrza, co wskazuje na optymalne warunki energetyczne pracy silnika. Natomiast w podsumowaniu rozdziału 8.6 stwierdzono, że zbyt długi czas trwania otwarcia zwiększał przepływ powietrza bez poprawy uzyskiwanych parametrów ciśnienia i momentu obrotowego i najbardziej korzystny zakres pracy zidentyfikowano dla wartości pośrednich 15-17 ms. Natomiast zbyt wysokie wartości kąta α_{oz} powyżej 130° przed ZZ powodowały nadmierny wzrost przepływu powietrza bez proporcjonalnych korzyści w poprawie pracy silnika.
- 8) Biorąc pod uwagę uzyskane niskie parametry silnika (moc, moment) po dokonaniu jego konwersji, jakie są perspektywy zastosowania tego typu silników.

Uwagi krytyczne, przedstawione powyżej, nie obniżają wartości merytorycznej i ogólnej oceny dysertacji. Mają jedynie charakter dyskusyjny i mają służyć Doktorantowi jako pomoc w dalszej pracy naukowej, np. w przygotowaniu publikacji naukowych.

5. Uwagi redakcyjne

Tekst pracy na poziomie redakcyjnym został złożony na dobrym poziomie. W rozprawie występują nieliczne błędy składniowe, tzw. literówki, stylistyczne oraz interpunkcyjne. Autor dobrze operuje językiem naukowym i stosuje nomenklaturę dziedzinową, choć pojawiło się też kilka określeń żargonowych.

Kilka zauważonych braków redakcyjnych:

- wykaz oznaczeń jest niepełny, brakuje kilku oznaczeń wykorzystywanych we wzorach,
- w tekście dotyczącym opisu rysunku 19 pomyłono oznaczenia otworu technologicznego 5 (podano 4).
- pomyłone oznaczenia lub opisy na rysunkach 16 i 20,
- w opisie wzoru 7.4 brak wyjaśnienie oznaczenia P ,

- na stronie 76 powtórzono fragment tekstu,
- brak oznaczeń na rys. 45 b i c,
- str. 94 „resztki sprężonego powietrza”.

Zauważone błędy nie wpływają na wysoką wartość merytoryczną pracy.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa jest oryginalnym i interesującym studium na temat warunków zasilania silników pneumatycznych. Rozprawa nie budzi zastrzeżeń pod względem merytorycznym i formalnym. Przedstawione uchybienia mają charakter redakcyjny i nie podważają zasadniczej wartości metodycznej pracy. Oceniam ją pozytywnie jako wartościową pracę naukową. Spełnia ona wymóg oryginalnego rozwiązania przez Autora zagadnienia naukowego. Autor wykazał się dojrzałością metodologiczną, umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz właściwym doбором narzędzi analizy danych.

Uwzględniając walory metodyczne, naukowe i aplikacyjne przedłożonej rozprawy doktorskiej, stwierdzam, iż spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Przedkładam więc Radzie Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej wniosek o dopuszczenie mgr inż. Michała Korbuta do publicznej obrony pracy pt. „Wpływ warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego”.

Ponadto, biorąc pod uwagę oryginalność i istotność rozwiązania problemu naukowego oraz dorobek publikacyjny Autora zgłaszam propozycję wyróżnienia recenzowanej rozprawy. Powyższe uzasadniam przeprowadzeniem przez Doktoranta unikalnych badań zarówno eksperymentalnych jak i modelowych. W celu przeprowadzenia badań modyfikowano silnik, zbudowano stanowisko badawcze, przeprowadzono badania analizując wpływ warunków zasilania na pracę silnika pneumatycznego. Opracowano uniwersalny model matematyczny, który na podstawie otrzymanych wyników badań pozytywnie zweryfikowano. Zaprezentowane rozwiązania mają duży potencjał rozwojowy.