

Poznań, 5.08.2024

prof. dr hab. Agnieszka Merkisz-Guranowska
Instytut Transportu
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechniki Poznańskiej

O C E N A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Paszko

**pt.: „STEROWANIE PRZEPLYWEM POWIETRZA W CELU ZMNIEJSZENIA
OPORÓW AERODYNAMICZNYCH SAMOCHODU CIĘŻAROWEGO”**

(podstawa opracowania: uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna z dnia 26.06.2024 roku i pismo Z-cy Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej z dnia 16.07.2024, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej)

1. WYBÓR TEMATU I GENEZA PRACY

W kontekście zmian klimatycznych i podejmowanych działań mających na celu redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz poprawę efektywności energetycznej, temat pracy doktorskiej jest niezwykle aktualny i ważny. Pojazdy ciężarowe odgrywają kluczową rolę w transporcie towarów, a jednocześnie są odpowiedzialne za znaczną część emisji CO₂ w sektorze transportu. W 2022 roku odpowiadały za około 29% emisji gazów cieplarnianych w sektorze transportu drogowego w Stanach Zjednoczonych [EPA] i 25% w Unii Europejskiej, co przekładało się na około 6% całkowitych emisji gazów cieplarnianych w UE (ACEA).

Rozporządzenie UE ustanawiające normy emisji CO₂ dla pojazdów ciężarowych ((UE) 2019/1242) nakłada na producentów obowiązek zmniejszenia średniej emisji floty nowych pojazdów ciężarowych w ramach regulowanych grup pojazdów o 15% (do 2025 r.) i 30% (do 2030 r.) w porównaniu z okresem bazowym (2019-2020).

Doktorant podjął próbę opracowania autorskiego systemu wykorzystującego aktywne sterowanie przepływem strumieni powietrza w celu zmniejszenia oporów ruchu. Redukcja oporu aerodynamicznego może znacząco wpłynąć na zmniejszenie zużycia paliwa i emisji CO₂ przez te pojazdy, co jest kluczowe w kontekście globalnych wysiłków na rzecz zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych i ochrony środowiska.

Wraz ze wzrostem cen paliw oraz rosnącymi wymogami prawnymi dotyczącymi emisji, istnieje duże zapotrzebowanie rynkowe na rozwiązania pozwalające na zmniejszenie oporu aerodynamicznego pojazdów ciężarowych. Przedsiębiorstwa branży TSL i producenci

pojazdów są zainteresowani rozwiązaniami, które pozwolą na obniżenie kosztów operacyjnych oraz spełnienie norm środowiskowych.

Uwzględniając powyższe uważam, że tematyka rozprawy została trafnie dobrana zarówno pod kątem aktualności, jak i przydatności.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Rozprawa dotyczy zagadnień oporu aerodynamicznego pojazdów komercyjnych o prostopadłościennym kształcie nadwozia, a w szczególności opracowania sposobu na zmniejszenie oporu aerodynamicznego oraz redukcji mocy napędowej wymaganej do utrzymania stałej prędkości pojazdu.

Oceniana rozprawa ma 202 strony i została podzielona na sześć głównych rozdziałów. Poza tym zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, wykazy symboli i skrótów, spis literatury oraz osiem załączników.

W pierwszym rozdziale pracy przedstawiono tło i genezę poruszanych zagadnień, nakreślono obszar problemowy, przedstawiono tezę badawczą i cel rozprawy. W dalszej części rozdziału omówiono metody badawcze wykorzystywane w badaniach.

Jednym ze sposobów na zmniejszenie zapotrzebowania na moc niezbędną do napędów jest ograniczanie oporów ruchu, co jest szczególnie ważne w przypadku pojazdów komercyjnych. Obecnie, dostępne na rynku rozwiązania dotyczą poprawy właściwości aerodynamicznych strefy czołowej i podwoziowej, natomiast propozycje rozwiązań ograniczających opór strefy tyłu obejmują rozwiązania pasywne o niskiej skuteczności. W oparciu o lukę badawczą Doktorant sformułował cel, tezę i zakres rozprawy.

Celem praktycznym było opracowanie sposobu aktywnego sterowania przepływem prowadzącego do zmniejszenia oporu aerodynamicznego i mocy potrzebnej do jazdy z zadaną prędkością i jego adaptacja na lekkim samochodzie dostawczym.

Celem naukowym, natomiast, było opracowanie modeli matematycznych umożliwiających weryfikację koncepcji systemu aerodynamicznego opartej o ideę bariery powietrznej wytwarzanej za pomocą wzajemnie zderzających się strumieni.

W rozdziale drugim Autor przedstawił wybrane zagadnienia aerodynamiki pojazdów ciężarowych, tj. podstawy oporu aerodynamicznego i ich wpływ na zużycie paliwa. Szczególną uwagę poświęcił mechanizmom powstawania oporu strefy tylnej. Dodatkowo zostały opisane technologie ograniczające opór strefy tylnej pojazdów o prostopadłościennym kształcie nadwozia.

Rozdział trzeci zawiera ogólną koncepcję budowy i działania autorskiego systemu aktywnej aerodynamiki. Autor sformalizował zapis sił ciągów generowanych przez strumienie powietrza i siły działającej na powierzchnię spiętrzenia systemu. Przedstawił mechanizm wytwarzania bariery powietrznej oraz wskazał na wyzwania związane z implementacją systemu w pojazdach, w szczególności związane z efektywnością aerodynamiczną, energetyczną, źródłem zasilania i wyzwaniami konstrukcyjnymi.

Rozdział czwarty zawiera informacje dotyczące komputerowej mechaniki płynów (CFD) w kontekście symulacji opływów pojazdów komercyjnych. Autor przedstawił zakres

wykorzystania CFD w projektowaniu i certyfikacji pojazdów komercyjnych. Scharakteryzował podstawowe równania mechaniki płynów, tj. równania transportu oraz Reynoldsa dla przepływów turbulentnych oraz metody symulowania turbulencji. W dalszej części rozdziału Autor opisał metody automatyzacji i optymalizacji obliczeń wykorzystanego w badaniach oprogramowania komercyjnego.

W rozdziale piątym stanowiącym najbardziej rozbudowaną część rozprawy Doktorant przedstawił wyniki badań zrealizowanych z wykorzystaniem CFD. Pierwszy etap polegał na wykonaniu modelu opływu lekkiego samochodu ciężarowego wybranego jako przedmiot badań. Celem tych prac było wyznaczenie sił aerodynamicznych działających na referencyjny model pojazdu i uzyskanie wartości służących jako poziom odniesienia do weryfikacji skuteczności różnych konfiguracji sekcji spiętrzających. W kolejnym etapie prac sparametryzowano model matematyczny uproszczonej pojedynczej sekcji spiętrzającej i wyznaczono wpływ konfiguracji elementów geometrycznych oraz parametrów przepływowych strumieni powietrza na efektywność bariery powietrznej. Symulacje wykonano dla różnej liczby sekcji spiętrzających. Doktorant spośród ogółu wariantów do dalszej weryfikacji wybrał osiem dominujących konfiguracji. Po przeprowadzeniu kolejnych eksperymentów Doktorant dokonał adaptacji do modelu referencyjnego wybranych trzech wariantów sekcji spiętrzających dla których wykonał symulacje i analizę wyników pod kątem efektywności ograniczania oporu aerodynamicznego oraz wpływu na moc napędową przyjętego do badań pojazdu. W końcowej części rozdziału przedstawiono wytyczne dotyczące efektywnego sposobu dostarczania powietrza do zasilania systemu aerodynamicznego.

W podsumowaniu rozprawy Autor opisał efekty przeprowadzonych badań oraz nakreślił możliwości dalszych prac będących rozwinięciem przedmiotu rozprawy.

3. OCENA ROZPRAWY

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych i analiz Autor zaproponował koncepcję systemu aktywnego sterowania aerodynamiką, dedykowanego do pojazdów o prostopadłościennym kształcie nadwozia.

Podstawą jego działania jest zmiana paradygmatu dotyczącego wykorzystania strumieni powietrza, które zamiast bezpośredniego wykorzystania do wytwarzania siły odrzutu dopędzającej pojazd, używane są do neutralizacji siły oporu aerodynamicznego działającej na strefę tylną pojazdu. Zaproponowany system służy do wytwarzania dodatkowej bariery powietrznej oddzielającej tył pojazdu od wpływu występujących za nim stref obniżonego ciśnienia i turbulencji. Główny element bariery powietrznej stanowią sekcje spiętrzające, tworzone przez odpowiednio kierowane, zderzające się strumienie powietrza, które w wyniku wzajemnych zderzeń modyfikują rozkłady ciśnienia na tylnej powierzchni pojazdu.

Doktorant przebadwał różne konfiguracje geometryczne sekcji spiętrzających w celu maksymalizacji ich efektywności w ograniczaniu oporu aerodynamicznego, przy jednoczesnym uwzględnieniu nakładu energetycznego niezbędnego do wytwarzania dodatkowych strumieni powietrza. Różnorodność przyjętych do analizy wariantów przełożyła się na zróżnicowane wzorce rozkładu przepływu i ciśnienia, i tym samym na różnorodne

kształtowanie się wirów wstecznych, co umożliwiło optymalizację procesu decyzyjnego i wybór najsukuteczniejszej konfiguracji.

Mocną stroną przedstawionego w rozprawie rozwiązania jest wysoka skuteczność, tj. skuteczność przewyższająca korzyści oferowane przez rozwiązania pasywne dostępne na rynku (dla najlepszego wariantu uzyskano redukcję całkowitego oporu aerodynamicznego o 12,4%). Doktorant dowiódł, że siła generowana przez spiętrzenia strumieni może przewyższać teoretyczną siłę ciągu tych strumieni. Na pojeździe, uzyskano blisko dwukrotnie większą sprawność poprzez ograniczenie oporu za pomocą bariery powietrznej względem teoretycznej siły ciągu strumieni powietrza wykorzystywanych do jej wytworzenia.

Zaletą pracy jest wykorzystanie narzędzia badawczego w postaci komputerowej mechaniki płynów (CFD). Umożliwiło to analizę większej liczby konfiguracji składowych elementów geometrycznych oraz parametrów przepływowych strumieni powietrza, z uwagi na efektywność czasową, a przede wszystkim kosztową użytej metody. Ponadto, prowadzenie symulacji komputerowych zamiast badań w rzeczywistych warunkach zapewniło porównywalność badań z uwagi na wyeliminowanie wpływu na wyniki czynników związanych z prowadzeniem pojazdu, warunkami drogowymi czy atmosferycznymi. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS do numerycznej mechaniki płynów pozwoliły Autorowi zweryfikować przyjęte założenia i ocenić zaproponowane konfiguracje systemu.

Pod względem edytorskim praca jest napisana bez zastrzeżeń. Język pracy jest dojrzały, jednolity i poprawny, a całość jest logicznie uporządkowana. Czytelne zobrazowanie przebiegu badań i prezentacja wyników (w tym w formie graficznej) wspomagają śledzenie wyводу.

Na podkreślenie zasługuje także bardzo duży, ponad 90-procentowy udział pozycji zagranicznych w cytowanej bibliografii, na którą w sumie składa się 160 pozycji aktualnej i różnorodnej literatury, co świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu Autora w tematyce rozprawy.

Pod względem merytorycznym rozprawa nie budzi większych zastrzeżeń. Analizując treść rozprawy, można sformułować uwagi, które jednak nie umniejszają jej wartości i pozytywnego wrażenia po przeczytaniu pracy.

W pracy brakuje schematu i opisu przedstawiającego wszystkie elementy systemu), w szczególności układu tłoczącego powietrze (na poglądowym rysunku 3.3 pokazano jedynie strefę przejmowania powietrza i sekcje spiętrzające). Na stronie 49 rozprawy mowa jest o wentylatorach elektrycznych służących do generowania przepływu, sterowanych dedykowanym autonomicznym sterownikiem. Natomiast w zgłoszeniu patentowym mowa jest o sprężarkach i zasobnikach ciśnieniowych (pośrednim i głównym). Sprężarka w stosunku do wentylatora elektrycznego będzie generowała większy przepływ powietrza o zwiększonym ciśnieniu, będzie też zużywała więcej energii. Elementami systemu są ponadto sterownik połączony ze źródłem zasilania oraz czujnik prędkości pojazdu (oraz dodatkowo czujniki warunków atmosferycznych i manewrów o ile moc układu tłoczącego ma być z nimi powiązana jak Autor wskazał na s.49), które zostały pominięte w opisie systemu w rozprawie.

Zrealizowane na potrzeby pracy badania i przedstawione wyniki opierają się na solidnych podstawach teoretycznych i badawczych. Zaproponowane rozwiązanie systemu aerodynamicznego, który można zintegrować z istniejącymi pojazdami dostawczymi czy ciężarowymi, ma potencjał rynkowy, ale wymaga przeprowadzenia dalszych badań i prac rozwojowych.

Należy podkreślić, że system zaproponowany przez Doktoranta jest nowatorski, gdyż dostępne na rynku technologie ograniczające wpływ przepływu oderwanego na ciśnienie za pojazdem odnoszą się do rozwiązań pasywnych lub koncentrują się na profilowaniu kształtu nadwozia.

Jednak w przeciwieństwie do pasywnych urządzeń ograniczających opór aerodynamiczny, ocena efektywności aktywnych systemów nie jest jednoznaczna. Współczynnik oporu może zmieniać się w zależności od parametrów, poza tym systemy aktywne wymagają uwzględnienia bilansu energetycznego w ostatecznej ocenie. Całkowity opór aerodynamiczny pojazdu będzie zależał nie tylko od oporu strefy tylnej, ale również od konstrukcji urządzeń przepływowych i kanałów transportujących powietrze.

Z kolei bilans energetyczny jest o tyle istotny, że w zależności od rodzaju wykorzystanych urządzeń przepływowych i elementów układu tłoczącego powietrze oraz samego miejsca pobierania powietrza, zapotrzebowanie na energię może się znacząco różnić, a moc niezbędna do zasilania urządzeń tłoczących musi być wyraźnie mniejsza od mocy oporów aerodynamicznych pojazdu bez systemu. Na bilans energetyczny będzie wpływała również masa systemu, który składa się z wielu elementów (część podwoziowa, część tylna oraz ewentualny zewnętrzny układ zasilania).

Wyzwaniem wydaje się być również opracowanie systemu pobierania powietrza ze strefy czołowej (zaproponowanej przez Doktoranta), gdzie następuje spiętrzenie powietrza. Doprowadzenie powietrza w celu zasilania systemu wymagać będzie istotnych zmian konstrukcyjnych pojazdu, co może okazać się przeszkodą w implementacji rozwiązania. Konstrukcja strefy tylnej musi z kolei umożliwiać łatwy załadunek i rozładunek pojazdu.

Doktorant nie odnosi się również w żaden sposób do kosztów wdrożenia zaproponowanego rozwiązania, tj. kosztów produkcji, montażu i eksploatacji zaproponowanego systemu.

Uwagi szczegółowe:

- Autor zamiennie używa określenia system, sposób i metoda odnosząc się do celu aplikacyjnego prowadzonych badań. Wskazując cel praktyczny (s.18) mówi o sposobie, opisując obszar badawczy o metodzie (punkt 1.2), z kolei w tytule rozdziału 3 i 5 mowa jest o systemie. Zgodnie z definicją system to zorganizowany zbiór elementów lub podsystemów, które współpracują ze sobą, aby osiągnąć określony cel. Metoda natomiast to uporządkowany sposób postępowania mający na celu osiągnięcie określonych rezultatów. Metoda opisuje sekwencję kroków lub technik używanych do rozwiązania problemu lub przeprowadzenia zadania. Metoda dotyczy zatem sposobu weryfikacji osiągnięcia, podczas gdy samo osiągnięcie dotyczy systemu aktywnej aerodynamiki.
- S.25 Na rysunku 2.4 dla osi X podano tylko jednostki bez oznaczenia mierzonej wielkości.

- S.33 W drugim akapicie Autor odwołuje się do rysunku 2.11 podczas gdy powinien odwołać się do rysunku 2.13.
- S.54 Autor stwierdza, że osiągnięcie jak najmniejszej powierzchni nieaktywnej jest do osiągnięcia poprzez ograniczenie na pojeździe globalnej liczby sekcji spiętrzających. Z takiego stwierdzenia wynika wręcz, że najlepiej jakby w ogóle nie było tych sekcji. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że najlepsze okazały się warianty 3 i 4, czyli ze średnią liczbą sekcji.
- S.115 Na rysunku 5.47 odniesiono się do wariantów 6-9. Rozumiem, że wariant 6 jest w rzeczywistości wariantem 5 a wariant 9 wariantem 8 czy może pomyłkowo przedstawiono wyniki dla innych wariantów.
- Rysunki 5.54- 5.59 – brakuje odniesienia w opisie do analizowanej konfiguracji.
- Rysunki 5.60, 5.62, 5.64, 5.66, 5.68, 5.70 powinny mieć odniesienie do konkretnego jednego wariantu (od 1 do 6), podczas gdy w opisie jest wszędzie odniesienie do wariantów 5-8.
- Brak odniesienia w tekście do niektórych rysunków.
- Praca zawiera drobne błędy literowe i interpunkcyjne. Zdarzają się też powtórzenia treści np. w pierwszym akapicie na s.46 czy na s.52.

Przedstawione wyżej uwagi mają charakter dyskusyjny lub porządkowy i nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy.

Osiągnięcia pracy:

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

- opracowanie autorskiego systemu aktywnego sterowania opływem, polegającego na wytworzeniu dodatkowej bariery powietrznej, która oddziela tył pojazdu od powstających za nim turbulencji i stref obniżonego ciśnienia,
- weryfikację ogólnej koncepcji systemu zgodnie z opracowaną metodą z wykorzystaniem komputerowej mechaniki płynów,
- identyfikację kluczowych czynników wpływających na efektywność systemu, takich jak geometria sekcji spiętrzających, prędkość strumieni powietrza oraz sposób pobierania powietrza z otoczenia,
- zbadanie zależności pomiędzy ograniczeniem oporu tylnej strefy pojazdu a całkowitym oporem pojazdu.

Zaletą przedstawionych rozwiązań jest ich potencjał aplikacyjny, o czym świadczy przyznana ochrona patentowa przez UP RP o numerze Pat.241707 (*Urządzenie i sposób ograniczania oporu aerodynamicznego, zwłaszcza pojazdów*).

Autor rozprawy wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną, wprowadzając nowe elementy wiedzy, posługując się przy tym nowoczesnymi narzędziami prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia tego typu pracy przez znajomość metodyki, uzasadniania i doboru narzędzi naukowych.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej uważam, że:

- Autor dokonał trafnego wyboru tematyki swoich badań, a jej zakres spełnia stawiane wymagania pracom promocyjnym, gdyż praca stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego,
- dysertacja nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, wnosząc do nich nowe treści,
- cel pracy, w zakresie przyjętym przez Doktoranta, został osiągnięty, gdyż zrealizowano wszystkie postawione zadania badawcze, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- mgr inż. Mateusz Paszko posiada wiedzę teoretyczną, zdolności koncepcyjne oraz umiejętności niezbędne do samodzielnego rozwiązywania naukowych problemów badawczych.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna” (dziedzina nauk – nauki inżynieryjno-techniczne), w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Mateusza Paszko pt. „Sterowanie przepływem powietrza w celu zmniejszenia oporów aerodynamicznych samochodu ciężarowego” (promotor: prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker) spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, w rozumieniu ustawy z 14 marca 2003 r. O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2020.1086 z późn. zm.).

Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.



Agnieszka Merkisz-Guranowska