

Piotr DOERFFER, prof. dr hab. inż.,
OŚRODEK PRZEPLYWÓW I SPALANIA
ul. Fiszera 14
80-231 Gdańsk
tel.: (+48) 58 5225 202
fax: (+48) 58 341-61-44
e-mail: doerffer@imp.gda.pl

Gdańsk, 11.07.2023

Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24
00-665 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Kurec zatytułowana:

“The influence of Car Body Moving Surfaces on the Car Aerodynamics”
wykonana na zlecenie prof. Roberta Sitnik, przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

1) Cel i zakres pracy

Celem pracy jest analiza działania ruchomych powierzchni aerodynamicznych na karoserii samochodu. Przeanalizowane zostały wyniki działania proponowanych aktywnych elementów aerodynamicznych, modyfikujące opór, siłę nośną i siły boczne generowane na karoserii.

Podstawową tezę pracy jest stwierdzenie:

“aktywna aerodynamika z zastosowaniem małych ruchomych elementów zamocowanych w krytycznych miejscach karoserii może znacząco polepszyć stabilność i bezpieczeństwo prowadzenia wszystkich klas samochodów”.

Praca doktorska obejmuje więc tematykę istotną z punktu widzenia technologii, znaczącej dla aerodynamiki samochodów. Przeprowadzone analizy numeryczne i eksperymentalne pozwalają na wyjaśnienie szczegółów struktury przepływu wywołujących zaplanowane efekty aerodynamiczne.

W pierwszej części pracy przedstawiono stan wiedzy. W drugiej części pracy przedstawiono materiały i metody wykorzystywane w badaniach. Główne ustalenia dotyczące wyników osiągnięcia naukowego przedstawiono w części trzeciej. Te główne osiągnięcia przedstawiono w formie załączonych artykułów, których jest sześć.

Aktywna aerodynamika najczęściej wykorzystywana jest w samochodach sportowych ale takie elementy mogą znacząco poprawić stabilność i bezpieczeństwo jazdy wszystkich klas samochodów. Jednym z celów pracy jest przedstawienie sposobów uzyskania zmian sił aerodynamicznych za pomocą dodatkowych drobnych elementów. Małe elementy umożliwiają szybką zmianę ich orientacji i efektów działania.

Praca zmierza do przebadania zmiany właściwości aerodynamicznych auta nie w celu minimalizacji oporów ale aby dopasować właściwości aerodynamiczne do warunków jazdy. Poruszające się elementy są zazwyczaj aktywowane w krótkich momentach dla polepszenia

dynamicznych właściwości auta. Ich zastosowanie jest jednak często związane z negatywnymi efektami, jak zwiększenie oporów. Dlatego szczegółowe badania są bardzo potrzebne.

2) Struktura pracy doktorskiej

Praca doktorska ma formę dla mnie nietypową, ale taką, która już przyjęła się w Polsce. Dyskusja osiągnięć w pracy jest ograniczona i szczegóły są zawarte głównie w załączonych publikacjach P1 – P6. Jest to spore utrudnienie dla recenzenta ponieważ czytanie aż sześciu artykułów jest kłopotliwe.

Rozdziały 1 i 2 jak i ich podrozdziały są bardzo skrótowo przedstawione, zajmując jedynie 15 stron. Rozdział 3 jest natomiast znacznie dłuższy zajmując 28 stron. W tym rozdziale 23 strony zajmuje podrozdział 3.3, który jest podzielony na 8 nienumerowanych sekcji. Kolejne 110 stron zajmują kopie przywołanych artykułów. W konsekwencji struktura pracy doktorskiej jest niejasna i utrudnia czytanie. Lepiej byłoby podzielić pracę na zagadnienia tematyczne i wskazać, w których publikacjach znajdują się odnośne teksty i informacje. Podrozdział merytoryczny ułatwiłby ocenę osiągnięcia naukowego doktoranta.

Na koniec części 3.2 pracy znajduje się niezrozumiały akapit odwołujący się do części 3.4, do dwóch części 3.2 o różnych tytułach, do części 3.3 i do części oznaczonej jako 4. Tytuły tych części pracy wskazują na ciekawe i ważne zagadnienia, które jednak nie znalazły miejsca w dysertacji. Są one poruszone w poszczególnych artykułach ale ich krótkie podsumowanie przez doktoranta byłoby korzystne.

Nie zmienia to jednak faktu, że zakres pracy przedstawiony przez doktoranta jest olbrzymi i w pełni zasługuje on na uzyskanie stopnia doktora. Załączone artykuły opublikowane są w renomowanych czasopismach wycenianych na 140 pkt na liście ministerialnej.

3) Metodologia

Badania przedstawione w pracy oparte są o numeryczne symulacje w oparciu o pakiet ANSYS-Fluent. Uzyskane wyniki zostały również uzupełnione przez badania doświadczalne w tunelu aerodynamicznym.

Do badań włączono trzy modele samochodów:

- Honda del Sol
- Arrinera Hussarya,
- Estate variant of the DrivAer model

Postanowiono zastosować rzeczywistą geometrię samochodu, a nie uproszczony model, ponieważ w późniejszej części pracy niektóre rozwiązania były badane nie tylko w tunelu aerodynamicznym ale również na drodze.

Symulacje numeryczne były przeprowadzone dla warunków stacjonarnych. Niestacjonarne symulacje pokazały zmienne siły, które mogą wystąpić (P6) na modelu. W P3 wykorzystane zostały niektóre modele hybrydowe turbulencji.

Badania w tunelu aerodynamicznym zostały wykonane w instytutowym tunelu aerodynamicznym. Wykonane prace eksperymentalne dotyczyły modelu Honda del Sol a wyniki dotyczące pozostałych dwóch aut Arrinera Hussarya oraz DrivAer pobrano z

literatury. Tak pozyskane dane eksperymentalne wszystkich modeli zostały wykorzystane do walidacji uzyskanych wyników symulacjach numerycznych.

Badania w tunelu wykonane zostały dla modelu auta w skali 1:2,5 aby nie przekroczyć krytycznego wymiaru blokowania komory pomiarowej ($<7,5\%$). Współczynnik blokowania dla modelu podstawowego był $5,65\%$ a z tylnym skrzydłem przy dużym kącie natarcia wynosił $6,47\%$. Wyniki tych pomiarów wykorzystane były w publikacjach P1 oraz P3. Każde z nieruchomych kół modelu zamocowane zostały na multi-kierunkowym czujniku sił. Pozwoliły one na precyzyjny pomiar sił działających na auto. Częstotliwość próbkowania wynosiła 25 kHz . Wykonane pomiary obejmowały również wizualizację struktur przepływu metodą olejową oraz przy pomocy elastycznych włókien o długości $2,5\text{ cm}$.

4) Merytoryczny zakres rozprawy

Doktorant prezentuje swój dorobek merytoryczny na podstawie sześciu artykułów, będąc pierwszym autorem we wszystkich tych publikacjach, opublikowanych w:

- P-1) Internationa Journal of Mechanical Sciences (140 pkt, IF 7,3)
The Influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's aerodynamic performance.
1st autor, 3 współautorów
- P-2) ENERGIES MDPI (140 pkt, IF 3,3)
Numerical Study of the Sports Car Aerodynamic Enhancements
1 autor
- P-3) Internationa Journal of Mechanical Sciences (140 pkt, IF 7,3)
Flow Control for a car-mounted rear wing
1st autor, 5 współautorów
- P-4) ENERGIES MDPI (140 pkt, IF 3,3)
Influence of Side Spoilers on the Aerodynamic Properties of a Sports Car
1st autor, 2 współautorów, tylko z promotorem
- P-5) ENERGIES MDPI (140 pkt, IF 3,3)
Influence of Different Plates Arrangements on the Car Body
1st autor, 3 współautorów
- P-6) Journal of Advanced Transportation, Hindawi, WILEY (70 pkt, IF 2,3)
Advanced Modeling and Simulation of Vehicle Active Aerodynamic Safety.
1st autor, 6 współautorów

W artykule P1 określone zostały właściwości auta Honda del Sol z i bez tylnego skrzydła. Pokazano jak różne kąty natarcia skrzydła wpływają na przepływ wokół całego samochodu. Jednym z zadań była maksymalizacja siły oporu dla wspomagania hamowania samochodu. Inne elementy wspomagające jak łopatki na końcu dachu były również analizowane. Duża ilość przypadków ustawienia i lokalizacji skrzydła daje autorowi szeroką bazę wiedzy. W dużej mierze jest ona zawarta w kolorowych ilustracjach w artykule, które pokazują, że ilość danych z pełnej trójwymiarowej struktury przepływu trudno jest w pełni wykorzystać. Zastosowanie małych elementów nie pozwoliło na uzyskanie znaczącego zwiększenia siły oporu. Pokazano jednak, że te elementy mogą wygenerować siłę dociskającą na podobnym poziomie jak skrzydło na małych kątach natarcia. Nie mogą być używane jako skuteczne hamulce ale mogą być zastosowane do zwiększenia siły dociskającej na tylnych kołach.

Aby zachować równowagę samochodu **w artykule P2** zastosowano aktywną płytę podziałową na przedzie modelu Arrinera Hussarya. Cała płyta podziałowa jest wysuwana i

jest wyposażona w dodatkową małą łopatkę na krawędzi spływowej, która umożliwia zlikwidowanie siły dolnej, którą powoduje płyta podziałowa. Na tyle tego modelu zamocowano skrzydło a poniżej mały spoiler. Skrzydło było ustawione na 10° aby zapewnić najlepszą wydajność i także na 50° do wykorzystania jako aerodynamiczny hamulec. Wszystkie aktywne elementy aerodynamiczne były na tym modelu chowane.

W artykule P3 głównym celem była siła dociskająca. Analizowane było wzajemne oddziaływanie tylnego skrzydła ze spoilerem zamontowanym na krawędzi spływowej bagażnika. Celem było badanie wpływu zmiany położenia spoileru na siłę dociskającą bez zmiany położenia skrzydła. Ruch małego elementu jak spoiler jest znacznie łatwiejszy niż ruch całego skrzydła, i może być szybciej aktywowany. Takie działanie może być zrealizowane ze znacznie mniejszym zapotrzebowaniem na energię, wymaga prostszego mechanizmu sterującego i może być wykonane szybciej w warunkach ruchu drogowego. Wykazano, że spoiler może znacznie zwiększyć siłę dociskającą. Jego działanie nie wynika z działania ciśnienia na skrzydło ale na zmianę rozkładu ciśnienia na całej części tylnej samochodu. Ciśnienie na bagażniku zwiększa się ale ciśnienie pod samochodem maleje. Dlatego aktywacja takiego małego elementu ma aż taki ważny wpływ. Szybka zmienność siły docisku może być zastosowana do tłumienia oscylacji karoserii. Jeżeli spoiler byłby aktywowany z odpowiednią częstotliwością to oscylacje karoserii mogłyby być stłumione. Ten pomysł stał się podstawą do zgłoszenia patentowego które ma minimalizować drgania karoserii samochodu.

W publikacji P4 celem były siły boczne wywoływane bocznymi spoilerami. Siły generowane na karoserii z oraz bez bocznych spoilerów były badane przy kącie bocznym napływu powietrza od 0° do 15° . Przepływ z kątami bocznymi modeluje opływ auta przy wietrze poprzecznym. W artykule wykazano, że przy małych kątach bocznych spoilery mogą zlikwidować efekty wiatru bocznego. Pokazano, że spoilery boczne mogą również generować dodatkowy docisk, co może być wykorzystane do sterowania autem. Dodatkowym efektem jest zwiększenie oporu aerodynamicznego. Trzeba brać jednak pod uwagę, że tego typu akcje są realizowane w krótkich momentach czasu, i dlatego nie powinno to mieć większego znaczenia dla zużycia paliwa. Nowy typ spoileru został opracowany w wyniku przeprowadzonych prac, stając się podstawą kolejnego zgłoszenia patentowego.

Artykuł P5 koncentruje się na elementach i metodach, które mogą być w pierwszym rzędzie rozpatrywane jako hamulce, ponieważ przy ich aktywacji rośnie przede wszystkim siła oporu, często też razem z siłą docisku. Aktywowane elementy miały wymiar około 9 cm pokrywające dach i maskę silnika. Mogły być uruchamiane niezależnie, tworząc różne konfiguracje na karoserii samochodu, zmieniając współczynniki aerodynamiczne. Zastosowanie takich aktuatorów na pełnej geometrii samochodu jest działaniem innowacyjnym, ponieważ wcześniej podobne badania obejmowały tylko auta koncepcyjne i proste prototypy. Jeżeli te elementy są zainstalowane na całej karoserii to pojawiają się zagadnienia wzajemnego oddziaływania uzyskiwanych efektów pomiędzy sobą. Spowodowanie oderwania na dachu wyeliminowuje efektywne działanie systemów na końcu samochodu. Zadaniem tego artykułu było sprawdzenie czy taki zespół elementów aerodynamicznych może być efektywnie wykorzystany.

Artykuł P6 dotyczył platformy wykorzystywanej w testach drogowych, do których wykorzystywano zarówno tunel aerodynamiczny jak i CFD. Wy tłumaczono, że zastosowanie auta z aktywnymi elementami aerodynamicznymi wymaga wsparcia kierowcy przez

zastosowanie systemu sterującego tymi elementami oraz przewidywanie jak i które elementy mają być aktywowane w zależności od warunków jazdy. To oznacza również konieczność wbudowania czujników dostarczających dane do systemu sterowania, aby zapewnić jego efektywność. Kierowca nie będzie w stanie kontrolować działania tych systemów w skomplikowanych manewrach drogowych, tak więc system musi być samodzielny i autonomiczny, dostosowujący się do potrzeb.

5) Ocena merytoryczna pracy

Analizy przeprowadzone przez doktoranta w podziale na zagadnienia tematyczne dotyczyły:

- równowagi aerodynamicznej samochodu
- hamowania samochodu przy zastosowaniu tylnego skrzydła i spoilerera
- hamowanie samochodu przy zastosowaniu małych elementów na karoserii
- generacji sił bocznych
- generowania dużej amplitudy sił dociskających
- chwilowe zmiany sił aerodynamicznych

Równowaga aerodynamiczna dyskutowana była w artykule P1 i P2 i przedstawiono wyniki współczynników oporu i docisku dla różnych konfiguracji tylnego skrzydła i spoilerera. Brakuje jednak wyjaśnienia jaki był cel zastosowanych konfiguracji i czy chodziło jedynie o pokazanie zakresu sił, które można uzyskać.

Hamowanie samochodu przy zastosowaniu tylnego skrzydła i spoilerera było również omówione w artykułach P1 i P2. Przeanalizowano wpływ położenia skrzydła na siłę oporu jak i siłę nośną. Rozpatrzono trzy położenia: na środku dachu, na końcu dachu i na końcu bagażnika. Położenie na końcu bagażnika zostało uzupełnione wpływem spoilerera pod skrzydłem. Przebadano również działania skrzydła w położeniu hamowania.

Aerodynamiczne hamowanie małymi elementami zostało przebadane na modelu Honda del Sol w ramach publikacji P1. Pierwsza metoda to małe elementy, które mogły być wysuwane lub chowane w karoserii. Dwa elementy były badane. Jeden to mała lotka na końcu dachu samochodu a drugi element to spoiler na końcu bagażnika. Druga metoda polegała na stosowaniu ruchomych wzdłużnych płyt na połączeniu dachu i bagażnika.

Aerodynamiczne hamowanie było również przebadane na modelu DrivAer w pracy P5, również przy pomocy małych elementów. Jedną z możliwości jest zastąpienie tradycyjnych spoilerów multi-elementowymi rozwiązaniami. Aktywacja takich systemów może być prostsza i szybsza. Rozpatrywano możliwość zastosowania takich spoilerów tworzących kształty typu 'V'.

Generowanie sił bocznych było opracowane w ramach publikacji P4. Wybrano dwa obszary dla zamontowania tych spoilerów. Jeden to na boku zderzaka przedniego a drugi to na słupku bocznym przedniej szyby.

Aktywacja urządzeń zmieniających aerodynamikę samochodu powoduje zależności czasowe pomiędzy aktywacją i wystąpieniem wygenerowanych sił. Ten aspekt był również przedmiotem badań doktoranta. Niestacjonarne analizy zostały przeprowadzone w artykułach P3 i P6.

Przedstawione wyniki podają efektywność różnych metod sterowania przepływem. Ich celem nie jest ani klasyfikacja metod ani wytypowanie najbardziej optymalnych lub obiecujących dla przyszłej implementacji. Stworzona została baza wiedzy, na podstawie której można będzie wytypować metody odpowiednie dla osiągnięcia wyznaczonych celów. Wyniki zawarte w pracy stanowią więc wartościowy materiał dla wykorzystania przez konstruktorów samochodów.

6) Podsumowanie recenzji

Praca jest bardzo obszernym materiałem obejmującym dobrze sprecyzowany zakres wiedzy. Uzyskane wyniki przedstawione są w spójny sposób i są opublikowane w znaczących czasopismach.

Przedstawione uwagi do pracy wynikają z jej dużej objętości, i nie wpływają na pozytywną ocenę pracy. Moja ocena pracy jest bardzo wysoka i potwierdza dojrzałość autora do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych.

Jestem przekonany, że praca spełnia wszelkie wymagania ustawowe (Dz.U.2023.742 t.j. od 1 maja 2023 r.) i proponuję dopuścić ją do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Piotr Duda". The signature is fluid and cursive, with a long, sweeping tail on the final letter.