

Prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Pawelski  
Politechnika Łódzka  
Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Owczarzka  
pt. „Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach  
drogowych o różnej teksturze i sztywności”

Opinię opracowano w odpowiedzi na prośbę Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, prof. dra hab. inż. Adama Barylskiego, wyrażoną w piśmie z dnia 31.01.2020 r. Podstawą opracowania opinii jest praca doktorska przesłana wraz ze zleceniem.

Tematykę pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Owczarzka uważam za ważną ze względów naukowych, bowiem praca ta dotyczy określenia oporów toczenia opony, jednej z podstawowych przyczyn strat energii podczas ruchu pojazdu. Zagadnienie to ma swoją historię zapewne tak długą jak historia samochodu i odpowiednio obszerną literaturę, w dążeniu do korzystnych wielkości współczynników oporów toczenia i przyczepności. Zmieniające się wraz z rozwojem technologii, struktura nawierzchni i konstrukcja opon, mają istotny wpływ na przebieg zjawisk na powierzchni styku tych elementów. Od własności kontaktu opony z podłożem (nawierzchnią) zależy zachowanie się układów podwoziowych: napędowego, hamulcowego, zawieszenia i kierowniczego w samochodzie. Wymagania każdego z nich często mogą być rozbieżne. Stąd różnorodność opracowań, wynikających z wieloparametrowych czynników oddziałujących na tą współpracę a jakakolwiek próba optymalizacji, wymaga wielu bardzo żmudnych i rozbudowanych badań wszelkiego rodzaju.

Kontakt opony z nawierzchnią jest procesem nieliniowym. Spotykane modele, są zawsze uproszczeniem i odnoszą się do analizowanego w danym zagadnieniu procesu, np. hamowania w układach hamulcowych z ABS, ASR, czy stabilności kierunku jazdy z ESP. Podstawowym problemem jest w nich określenie m.in. chwilowych wartości współczynników: oporów toczenia i przyczepności. Ich złożoność wymaga weryfikacji eksperymentalnej a wyjaśnienie tych zjawisk oraz ich ilościowe ujęcie, jest punktem wyjścia dla wielu badań i należy do grupy najważniejszych zagadnień z teorii samochodu.

Szkoła Gdańska, problemem określenia oporów toczenia opon zajmuje się od kilkudziesięciu lat, osiągając w tym temacie wiele sukcesów. Świadczą o tym liczne publikacje i wystąpienia reprezentantów Zespołu na wielu konferencjach, m.in. na których miałem przyjemność śledzić ich postępy w pracach badawczych. Recenzowana praca doktorska jest kolejną zrealizowaną w tym Zespole.

Doktorant podjął się zadania opracowania nowej metody, która pozwoliła na oszacowanie współczynnika oporów toczenia opony przy minimalnych: nakładach pracy, kosztach przyrządowania oraz ustalonych i kontrolowanych warunkach badań. Dotychczas stosowane metody to drogowe: wybiegu o małej dokładności lub za pomocą przyczep badawczych oraz stanowiskowe na maszynach bieżnych. Wszystkie wymagają dużych nakładów pracy.

Cel i teza pracy zostały sformułowane przez Autora w rozdziale pierwszym.

Celem było opracowanie metody oceny oporów toczenia przez pośredni pomiar strat energetycznych występujących w wyniku obciążania opony siłą normalną do nawierzchni i wyznaczenia korelacji z rzeczywistym stanem obciążeń siłami: normalną i styczną.

Tezę pracy można zredukować do stwierdzenia, że pośredni pomiar strat energetycznych w oponie obciążoną oscylacyjnie, pozwoli na określenie współczynnika oporów toczenia po danej nawierzchni.

#### Zakres pracy doktorskiej obejmuje:

- Omówienie stanu wiedzy na temat zjawiska oporu toczenia zamieszczono w rozdziale 2, od strony 12 do 36 (brak tytułu 2.1). W znaczącej większości są to opracowania Zespołu z Politechniki Gdańskiej, w tym również Doktoranta; na 32 pozycje literatury, 4 to publikacje autorów zewnętrznych a 3 normy ISO. Przedstawiony materiał w postaci zbiorczej na rysunkach od 1 do 35, uwzględnia takie czynniki jak: prędkość jazdy, ciśnienie powietrza w oponie, obciążenie koła, temperatury otoczenia i ogumienia, kierunek toczenia opon z kierunkową rzeźbą bieżnika, wymiary opony, rzeźba i zużycie bieżnika, skład mieszanki gumowej, struktura nawierzchni drogowej. Zebrany materiał to bogate kompendium wiedzy w tym obszarze, pozyskany w badaniach drogowych i stanowiskowych wymagających dużego nakładu pracy, związanego z zachowaniem warunków powtarzalności eksperymentu. W podsumowaniu Doktorant wysuwa potrzebę opracowania prostej metody stacjonarnej, umożliwiającej zachowanie ustalonych warunków pomiaru i powtarzalności wyników oraz obniżenie kosztów.
- Istotnym założeniem proponowanej metody jest porównywanie strat energetycznych występujących w oponie podczas obciążenia pionowego, ze stratami przy obciążeniu roboczym siłami: normalną i styczną oraz wyznaczenie współczynnika korelacji przy takim przejściu. Obciążenie tylko siłą pionową pozwala na zmniejszenie próbek nawierzchni do wymiarów nieco większych niż ślad współpracy opony z podłożem. Można więc wprowadzać do badań rzeczywiste, płaskie próbki nawierzchni przy małych kosztach w porównaniu z dotychczas stosowanymi: z wykorzystaniem maszyn bieżnych lub przyczepy badawczej oraz testować również prototypy nawierzchni drogowych. Metoda zapewnia zbliżone do rzeczywistych warunki współpracy opony z nawierzchnią a jej ideę przedstawiono na rysunku 45. Badane koło wychylone o stałą wysokość, po zwolnieniu elektromagnesu swobodnie opada na próbkę nawierzchni i wielokrotnie odbijając się wykonuje tłumiony ruch oscylacyjny. Wielkość tłumienia wynika ze strat energetycznych w oponie i podłożu. Oscylacje od początku aż do zatrzymania rejestrowane są przez układ pomiarowy z laserowym czujnikiem położenia. Metoda i stanowisko pomiarowe zostały zastrzeżone patentem RP 229187.
- Zaprojektowane i zbudowane stanowisko badawcze przedstawiono w podrozdziale 3.1.2. Badane koło, prowadzone przez wahacz z poziomą osią obrotu, było dociążane dodatkową masą dobraną tak, aby dynamiczne ugięcie opony odpowiadało warunkom podczas toczenia koła w pojeździe. Za utrzymanie wahacza z kołem w pozycji wyjściowej odpowiadał elektromagnes. W skład zestawu pomiarowego wchodził: laserowy czujnik położenia ILD 1401-50 firmy Micro-Epsilon, kasetę pomiarową NI USB-6216 BNC firmy National Instruments oraz komputer z oprogramowaniem. Badania prowadzono zachowując wymagania norm ISO 28580:2018 oraz ISO 18164:2005 dla 14 próbek nawierzchni drogowej oraz 8 opon o zróżnicowanej konstrukcji i przeznaczeniu.
- Analizę wyników badań przeprowadzono dwoma metodami:
  1. Przez porównanie przebiegów eksperymentalnych z teoretycznymi, opartymi o model opisany układem równań 3.1. Zgodność przebiegów uzyskiwano dobierając współczynnik tłumienia w modelu i ocenę wizualną pokrycia obydwu krzywych. Statyczna charakterystyka sztywności opony wyznaczana na maszynie bieżnej była jednym z parametrów użytych w obliczeniach symulacyjnych. Pozostałe parametry wynikały z konstrukcji stanowiska. Przebieg współczynników oporów toczenia przedstawiono na rys.51.
  2. Przez wyznaczenie obwiedni górnych i dolnych eksperymentalnej charakterystyki amplitudowej i określeniu pola między nimi. Równanie 3.4 jest zaproponowanym przez Doktoranta współczynnikiem metody oscylacyjnej. Na rys.53 zestawiono przebieg współczynników oporów toczenia otrzymanych metodą bębnową w funkcji współczynnika metody oscylacyjnej. Otrzymano współczynnik korelacji liniowej

*Handwritten signature*

Pearsona 0.89, co wskazuje na silną współzależność obydwu metod i było podstawą przyjęcia tej metody w dalszych badaniach.

- Wykonanie serii pomiarów określających wpływ czynników eksploatacyjnych i konstrukcyjnych oraz ich analizę omówiono w rozdziale 4.

Rozproszenie uzyskiwanych współczynników metody oscylacyjnej określono współczynnikiem zmienności zdefiniowanym równaniem 4.1. Otrzymano następujące jego zakresy:

Dla opon AVON AAV4 SUPERVAN AV4, o dużym współczynniku oporów toczenia:

- 1.33%÷3.18% przy porównaniu nawierzchni rzeczywistych z ich replikami, Tabela 4,
- 1.94%÷2.74% w badaniach wpływu głębokości profilu nawierzchni, Tabela 5.

Dla opon CONTI.ECONTACT BLUECO, o małym współczynniku oporów toczenia:

- 0.63%÷2.49% przy porównaniu nawierzchni rzeczywistych z ich replikami, Tabela 6,
- 0.84%÷2.16% w badaniach wpływu głębokości profilu nawierzchni, Tabela 7.

Dla opon UNIROYAL TIGER PAW M+S SRTT, o średnim współczynniku oporów toczenia:

- 0.56%÷1.93% przy porównaniu nawierzchni rzeczywistych z ich replikami, Tabela 8,
- 0.36%÷1.33% w badaniach wpływu głębokości profilu nawierzchni, Tabela 9.

Brak komentarza uzasadniającego powyższy rozkład wyników.

- Jako czynnik eksploatacyjny przyjęto ciśnienie pompowania opony. W rozdziale 4.2 porównano wartości współczynnika metody oscylacyjnej dla wyżej wymienionych opon z ich współczynnikami oporów toczenia wyznaczonych metodą bębnową dla nawierzchni wg Tabeli 10. Otrzymane przebiegi aproksymowano funkcjami liniowymi o zbliżonych współczynnikach. Najwyższy stopień korelacji 0.95 otrzymano dla ciśnienia 150 kPa, który zmniejszał się dla ciśnień wyższych: 0.91 dla 210 kPa i 0.87 dla 270 kPa.
- Kolejną serią badań było określenie wpływu obciążenia na wartość współczynnika metody oscylacyjnej. Badania przeprowadzono dla tych samych nawierzchni co poprzednio, przy ciśnieniu pompowania 210kPa i trzech masach dociążających: 52, 62 i 72 kg. Otrzymano odpowiednio w kolejności współczynniki korelacji: 0.94, 0.96 i 0.96 oraz bardzo zbliżone funkcje liniowe łączące te parametry: Tabela 11 i rysunki 72÷74. Stwierdzono niewielki wpływ zmiany obciążenia.
- W rozdziałach 4.4, 4.5 i 4.6 omówiono kolejno wpływ: sztywności nawierzchni oraz jej głębokości profilu, temperatury opony, mieszanki gumowej, stwierdzając zbieżność metody oscylacyjnej z bębnową, polegającą na identycznym uszeregowaniu wyników.
- Na rysunkach 89 i 90 przedstawiono korelacje między współczynnikiem oporu toczenia a współczynnikiem metody oscylacyjnej z podziałem na badane opony i badane nawierzchnie, udowadniając tym samym tezę pracy. Otrzymano tę samą funkcję liniową i ten sam współczynnik determinacji  $R^2$ . Co uzasadnia taką zgodność, ze względu na badane opony i badane nawierzchnie?
- Wnioski końcowe jako podsumowanie uzyskanych wyników nie budzą moich wątpliwości.

Zakres pracy, przedstawiony w skrócie powyżej, spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Zawiera niezbędne procedury jakie należy wykonać przy podobnych opracowaniach. Uzyskane wyniki są odwzorowaniem obszernej pracy i świadczą pozytywnie o przyjętym planie badań. Wartość merytoryczną pracy oceniam bardzo wysoko.

Możliwość praktycznego wykorzystania wyników stanowi wartość dodaną pracy a ich potwierdzenie przez budowę prototypowego stanowiska i zweryfikowaną doświadczalnie metodę, to dodatkowe wymierne efekty naukowe i dydaktyczne.

Popieram zaproponowaną kontynuację własnego rozwoju naukowego, którą Doktorant wyznaczył w oparciu o ocenę uzyskanych wyników oraz istniejące w Zespole stanowiska.

Układ treści i opracowanie redakcyjne w swojej edytorskiej wymowie nie budzą zastrzeżeń. Praca liczy 109 stron, 90 rysunków (wykresów), 20 tabel i 32 pozycje literatury. W znaczącej większości to opracowania autorskie. Omówienie wyników w bezpośredniej bliskości rysunków

bądź tabel, znacznie ułatwiło ich śledzenie. Należy podkreślić zwięzłość podsumowań autora na każdym etapie pracy oraz tak przygotowany tekst, że zrezygnowałem z wymieniania tzw. „literówek”. Świadczy to pozytywnie o Doktorancie i Szkole profesora Ejsmonta.

Dorobek użytkowy pracy dotyczy zaproponowanej metody oraz związanego z nią nowego stanowiska badawczego. Objęte są ochroną patentową z dnia 29.06.2018, patent RP nr 229187. Należy tu zauważyć:

- Innowacyjną metodę badań, która pozwala na:
  1. Określenie funkcji korelacyjnej pomiędzy współczynnikami: metody oscylacyjnej i oporami toczenia wyznaczonymi na stanowisku bębnowym. Różnice między wynikami poniżej 5% potwierdzają jej przydatność.
  2. Testowanie rzeczywistych próbek nawierzchni drogowych o polu nieco większym niż ślad styku opony i tym samym ograniczenia do minimum kosztownych testowych odcinków drogowych bądź replik nawierzchni dla stanowiska bębnowego.
- Koncepcję stanowiska badawczego pozwalającego na:
  1. Laboratoryjną ocenę oporu toczenia opon na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności.
  2. Niskie koszty budowy stanowiska, pozyskiwania próbek i prowadzenia badań.
  3. Rozwojową koncepcję stanowiska np. w przewidywanych badaniach envelopingu.
- Zgromadzoną aparaturę zbudowaną i używaną w badaniach drogowych i stanowiskowych Zespołu Pojazdów Politechniki Gdańskiej, tj.
  - przyczepę R<sup>2</sup> Mk.2 do pomiaru współczynnika oporu toczenia opon i nawierzchni, uważaną za najbardziej zaawansowaną technologicznie do badań drogowych,
  - dwie maszyny bieżne wykorzystywane w badaniach stanowiskowych,
  - opracowane własne technologie tworzenia próbek nawierzchni drogowych w warunkach laboratoryjnych,
  - aparatura kontrolno-pomiarowa i do archiwizowania pomiarów.
- Opracowane procedury i metodyki badań stosowane praktycznie w dowolnym zestawie opona-nawierzchnia, świadczące o przemyślanej i uporządkowanej wiedzy w tym zakresie.

Stopień rozwiązania zagadnień zrealizowano w pełni. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w rozprawie doktorskiej mgr inż. Wojciecha Owczarżka zaobserwować można bardzo dobre przygotowanie do prowadzenia badań eksperymentalnych.

Niektóre wyniki z tematu pracy doktorskiej opublikowano w czasopiśmie MEASUREMENT, 2019, vol.145, s.144-149. O randze czasopisma świadczy 200 punktów wg MNiSW na liście A. Doktorant jest również współautorem wspomnianego wyżej patentu RP.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca mgr inż. Wojciecha Owczarżka reprezentuje dyscyplinę „Inżynierii mechanicznej” i obejmuje pełny zakres: od analizy teoretycznej, przez weryfikację doświadczalną, podsumowania i określenie kierunków dalszych prac. Zbudowane stanowisko, zaproponowana metodyka badań i możliwość weryfikacji wyników na innych stanowiskach Zespołu, posiadają potencjał przekraczający potrzeby tego doktoratu. Stanowią dobrą podstawę do ich kontynuacji.

Uwzględniając powyższe proponuję pracę wyróżnić.

Reasumując, wyrażam opinię, że dysertacja mgr inż. Wojciecha Owczarżka spełnia wymagania, jakie stawia obowiązująca Ustawa o pracach doktorskich (*Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw*) i może być dopuszczona do publicznej obrony.