

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

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Chołodowskiego

pt. „Metoda identyfikacji oporów wewnętrznych układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych”

Opinię opracowano w odpowiedzi na prośbę Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej, prof. dra hab. inż. Tomasza Nowakowskiego, wyrażoną w piśmie z dnia 8.10.2019 r. Podstawą opracowania opinii jest praca doktorska przesłana wraz ze zleceniem.

Tematykę pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Chołodowskiego uważam za ważną ze względów naukowych, bowiem praca ta ma posłużyć zagadnieniu oceny sprawności gąsienicowego układu napędowego, także już we wstępnej fazie projektowania. Jest to możliwe tylko w przypadku dysponowania poprawnym modelem oporów ruchu w układzie. Jak wiadomo, napęd gąsienicowy ma zastosowanie w pojazdach poruszających się po podłożu nieutwardzonym, gdzie mały nacisk jednostkowy gąsienic na podłoże pozwala przemieszczać się po gruntach o małej nośności, osiągając przy tym również współczynniki uciągu podobne do pojazdów kołowych. Wprowadzenie gąsienic elastomerowych poprawiło dodatkowo manewrowość pojazdu i nie wymaga przystosowywania się do przemieszczania po drogach utwardzonych. Wynika stąd wzrost liczby pojazdów przemysłowych i roboczych wyposażonych w tego typu napęd. Z punktu widzenia producentów dobór układu napędowego pod kątem energochłonności powinien odbywać się bez negatywnego wpływu na inne właściwości eksploatacyjne. Recenzowana praca doktorska zmierza w tym kierunku, gdyż na jej podstawie można dobierać parametry gąsienicowego układu napędowego maszyny roboczej już podczas projektowania a także porównywać układy istniejące.

Możliwość praktycznego wykorzystania wyników stanowi wartość dodaną pracy a ich potwierdzenie przez budowę modeli zweryfikowanych doświadczalnie, to dodatkowe wymierne efekty naukowe i dydaktyczne.

Recenzowane w pracy zagadnienia dotyczą układów mechatronicznych, będących rezultatem integracji urządzeń mechanicznych, hydraulicznych i sterowania. Wynika stąd ich złożoność.

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

Celem było opracowanie zweryfikowanych doświadczalnie modeli oporów wewnętrznych, skutkujących rozpraszaniem energii w układach podwoziowych z gąsienicami elastomerowymi.

Tezę pracy można zredukować do sformułowania wytycznych, dla praktyki inżynierskiej, dotyczących optymalizacji układów jezdnych ciągników gąsienicowych.

Zakres pracy doktorskiej obejmuje:

- Omówienie stanu wiedzy na temat gąsienicowych układów napędowych zamieszczono w rozdziale 2, od strony 8 do 57. Pomimo dość obszernego przeglądu nie udało się ustalić modelu, który pozwalałby na optymalizację podwozi pojazdów terenowych z gąsienicami elastomerowymi pod kątem sprawności. Na podstawie cytowanej literatury nie udało się przyjąć jednolitego podziału oporu wewnętrznego napędu na składowe, gdyż analiza stanu wiedzy wykazała wiele rozbieżności pomiędzy dostępnymi modelami. Często stosowano modele empiryczne, odnoszące się do rozważanego w danej pracy wariantu. Stąd wynikło



uzasadnienie podjęcia się tematu pracy doktorskiej o powyższym tytule, która pozwalałaby na uniwersalność oszacowania strat w układzie napędowym gąsienicy.

- Rozdziały 4 i 5 to podstawowa część pracy doktorskiej (114 stron), zawierająca propozycje modeli oporów składowych układu napędowego z gąsienicami elastomerowymi oraz ich weryfikację na trzech stanowiskach badawczych, przy czym zarówno modele jak i stanowiska charakteryzują się bardzo wysokim stopniem uniwersalności, pozwalającym na przystosowanie do różnorodnych odmian i wersji napędu. Zależności empiryczne, teoretyczne oraz ich weryfikacje zestawiono w tabelach i na rysunkach (19 tabel i 77 rysunków). Przeanalizowano następujące przypadki:

- Opory ruchu rolek nośnych po gąsienicach elastomerowych na przykładzie rolek dwukrawędziowych (z bandażem gumowym lub poliuretanowym) oraz gąsienic posiadających i nieposiadających wkładki metalowe.
- Procentowy wzrost współczynnika oporów wskutek odchylenia osi obrotu rolki od gąsienicy o kąt $2,2^\circ$ i 7° . Dla kąta 7° stwierdzono kontakt tylko jedną krawędzią i wzrost nawet o 18%.
- Wzrost współczynnika oporu w wyniku tarcia ślizgowego rolki po powierzchni zębów prowadzących gąsienicy. Przy niskich obciążeniach pionowych możliwy jest wzrost nawet 7-krotny.
- Wpływ materiału pokrycia rolek. Większe opory ruchu wykazały rolki z bandażem gumowym.
- Wpływ wkładek metalowych w gąsienicy. W gąsienicach z wkładkami opory ruchu mają charakter cykliczny, od zera do dwukrotności siły średniej oporu ruchu.
- Zaproponowano metodę obliczania oporów ruchu dwukrawędziowej rolki nośnej, która uwzględnia siłę poprzeczną przenoszoną z rolki na gąsienicę oraz zmienny współczynnik tarcia między rolką i zębami gąsienicy. Weryfikację modelu przeprowadzono w warunkach równomiernego i nierównomiernego podparcia oraz przy stałym i zmiennym poprzecznym położeniu rolki we współpracy z gąsienicą z wkładkami metalowymi. Porównując wartości współczynników oporu ruchu dla analizowanych kombinacji stwierdzono między nimi duże i zmienne różnice, a zaproponowane w pracy doktorskiej, podejście do modelowania oporów ruchu rolek nośnych, pozwala na ich prawidłowe oszacowanie.
- Zaproponowano metodę obliczania oporów przeginalnia gąsienic elastomerowych na kołach układu jezdnego, wynikających z cyklicznych zmian odkształcenia podczas zginania i prostowania oraz właściwości elastomeru. Uwzględniono:
 - Straty energii wywołane histerezą właściwości mechanicznych gąsienicy.
 - Stan odkształceń i naprężeń okładziny zewnętrznej.
 - Stan odkształceń i naprężeń okładziny wewnętrznej.
 - Jakościową analizę oporów przeginalnia.
 - Wpływ promienia zginania i siły napinającej.
 - Wpływ grubości okładziny zewnętrznej, współczynnika tarcia w kontakcie koło-gąsienica oraz kąta opasania.

Weryfikację modelu przeprowadzono dwustopniowo na dwóch stanowiskach odpowiednio:

- w warunkach quasi-statycznego zginania,
- w warunkach szybkiego zginania.

Do badań przyjęto gąsienice pozbawione wkładek metalowych. Uzyskano wysoką zgodność wyników z obydwu stanowisk, zwłaszcza w zakresie prędkości roboczych. Tylko przy prędkościach bliskich zeru, stwierdzono moment oporów zginania nieco wyższy dla przypadku quasi-statycznego. Odpowiednio do otrzymanych wyników, przyjęto postać funkcji korygującej model, uzyskując tym samym odpowiednie charakterystyki dla szerokiego zakresu sił napinających i wytyczne do projektowania układu napędowego, udowadniając tym samym tezę pracy.

Z badań wynika, że wzrost oporów wewnętrznych podwozia na gąsienicach elastomerowych jest wywołany przede wszystkim wzrostem oporów łożysk kół, na których dochodzi do przeginięcia gąsienic. Opory tych łożysk przewyższały opory cyklicznego zginania i prostowania. Stąd zagadnienie doboru łożysk staje się istotne w fazie projektowania.

- Przeprowadzono analizę teoretyczną i doświadczalną wpływu zjawiska falowania gąsienic elastomerowych na opory wewnętrzne. Stwierdzono, że drgania gąsienicy w małym stopniu wpłynęły na wartość momentu przewijania, natomiast ze wzrostem intensywności rośnie obciążenie promieniowe łożysk kół napędowych i zwrotnych. Popieram Doktoranta w zamiśle kontynuowania badań w tym temacie.
- Wnioski końcowe jako podsumowanie uzyskanych wyników nie budzą moich wątpliwości. Zamieszczono je na 16 stronach. Rysunki 6.1, 6.2 i 6.3 to zbiorcze wytyczne dla konstruktora, pokazujące zależności oporu wewnętrznego ruchu oraz sprawności przykładowych układów napędowych z gąsienicami elastomerowymi w funkcji przenoszonej mocy, siły napięcia oraz liczby rolek nośnych.

Zakres pracy, przedstawiony w skrócie powyżej, spełnia z nadmiarem wymagania stawiane pracom doktorskim. Zawiera niejako instrukcje niezbędnych procedur, jakie należy wykonać przy podobnych opracowaniach. Uzyskane wyniki są odwzorowaniem bardzo obszernej pracy, w której nie proponowałbym żadnych uproszczeń a wręcz przeciwnie chętnie zapoznałbym się z pozostałymi wynikami. Odnoszę wrażenie, że Doktorant dysponując znacznie obszerniejszym materiałem badawczym, musiał dokonać wyboru, o czym świadczy propozycja zamieszczania ich w postaci tabel i wykresów.

W pełni popieram zaproponowaną kontynuację własnego rozwoju naukowego, którą Doktorant wyznaczył w oparciu o ocenę uzyskanych wyników.

Układ treści i opracowanie redakcyjne w swojej edytorskiej wymowie nie budzą zastrzeżeń. Praca liczy 179 stron, 117 rysunków (wykresów) i 29 tabel. W znaczącej większości, ponad 90%, to opracowania autorskie. Omówienie wyników w bezpośredniej bliskości rysunków bądź tabel, znacznie ułatwiło ich śledzenie. Należy podkreślić przy tym zwartość podsumowań autora na każdym etapie pracy oraz utrzymywanie dystansu do rezultatów. Świadczy to pozytywnie o Doktorancie i Szkole profesora Dudzińskiego.

W ocenianej pracy nie znalazłem sformułowań, które wzbudziłyby mój niepokój a tzw. „literówki” wymieniam poniżej:

- Str.3 „...postawiono jako pracy.” Proponuję „...jako cel pracy.”
- Str.8 „...koła nośne, koła napinające i rolki podtrzymujące.” Może „... koła nośne, mechanizm napinający i rolki podtrzymujące.”
- Str.10 „...koła podtrzymujące te stosuje się...” Może „koła podtrzymujące stosuje się...”
- Str.12 „Budowę gąsienice ujętych...” – „Budowę gąsienic ujętych...”
- Str.21 powinno być „rys.2.13. Przykładowe...”
- Str.22 w Tab.2.3 jest Rys.XX
- Str.27 „...koła nośne biorą one udział...” – „...biorą udział...”
- Str.29 „...Jeśli rowki okładziny są spodziewane środkiem niewystarczającym....”
- Str.31 „...zawulkanizowane są zbrojenie wykonane...”
- Str.36 „...odbywa się po gałęzi hiperboli oraz”
- Str.38 „Na podstawie tabeli Tab.2.5. wskazują ponadto, że dla...”
- Str.48 w tabeli Tab.2.9. znajduje się dwukrotnie jako składowa oporu określenie „Opór prowadzenia gąsienicy na kołach nośnych”
- Str.54 „...średnia czopa wału pod łożyskiem bębna”
- Str.67 „Na podstawie Rys.4.4 pokazano...” może „Rys.4.7...”
- Str.69 „...nie podlegała tak drastycznym zmianom....” – niewłaściwe określenie
- Str.81 Czy krzywa teoretyczna na Rys.4.17 odpowiadająca $\alpha=2,2^\circ$ na pewno przebiega w pobliżu $\alpha=7,0^\circ$ dla obciążeń poniżej 1000 [N]

- Str.87 „...rzędu 3,5 kG..”
 - Str.90 „...oporami zginania...”, „Rys.6.1 – powinno być 5.1”
 - Str.94 Równanie 5.7 określa parametr „n”, który nie znajduje omówienia w pracy.
 - Str.116 „...parametru m zależności 5.46...” powinno być 5.52
 - Str.116 Czy wartości przyrostu momentu oporów zginania w funkcji promienia bębna są prawidłowe. Czy kolejność nie powinna być odwrotna?
 - Str.120 „...można w graniach od ..” lepiej „...można regulować w granicach od...”
 - Str.123 Tab.6.8 powinno być Tab.5.8.
 - Str.131 „...Długość określono wyznaczono na podstawie....”
 - Str.133 Na Rys.5.26 jest „wg równ. 4.92” powinno być 5.92
 - Str.135 „...rozpatrywanej gąsienicy wartością...powinno być „...z wartością..”
 - Str.143 „...Pomiary prowadzono na przestrzeni 3 miesięcy.”. Jaki to miało wpływ na wyniki skoro cała praca trwała dłużej.
 - Str.144 „...była mniejsza od 4,125 mm ..”. Skąd ta wartość dzieląca wyniki na dwa podzbiory?
 - Str.165 „...obliczonych na podstawie na podstawie danych...”.
- Jak wynika z powyższego wymienione pomyłki nie mają wpływu na wartość merytoryczną pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

Dorobek użytkowy pracy jest wartościowy, bowiem dotyczy opracowania koncepcji i zbudowania dwóch stanowisk oraz przystosowania do zadań pracy doktorskiej trzeciego, istniejącego w Katedrze. Koncepcja stanowisk i zastosowana aparatura, pozwalają na różnorodną konfigurację układów napędowych oraz prowadzenie badań z wysoką dokładnością. Klasa tych stanowisk to już światowy poziom. Służą one:

- Do identyfikacji oporów ruchu rolek nośnych po gąsienicach, dla różnych obciążeń pionowych oraz kątów odchylenia osi obrotu rolek od płaszczyzny powierzchni wewnętrznej gąsienicy. Jego głównym podzespołem jest płyta pomiarowa, umożliwiająca pomiar trzech składowych: pionowej, poprzecznej i wzdłużnej, działających w styku rolki z gąsienicą. Toczenie rolki wymusza się ruchem płyty wzdłuż podstawy stanowiska, ok. 0,5 m. Obciążenie pionowe jest zadawane górnym ramieniem stanowiska. Odchylenie osi obrotu rolki jest realizowane przy pomocy dodatkowej płyty zamontowanej na płycie pomiarowej. Zasilanie przetworników siły, przesunięcia oraz archiwizowanie sygnałów pomiarowych zrealizowano za pomocą wzmacniacza QuantumX MX840A firmy HBM i komputera PC.
- Do identyfikacji oporów przeginania gąsienic z małymi prędkościami, dla zmiennych wartości siły napinającej, prędkości zginania oraz promienia gięcia. Stanowisko składa się z ramy podwieszanej na haku wciągarki suwnicy, na której zamontowano obrotowy bęben z przymocowaną próbką gąsienicy z jednej strony i pasem o pomijalnie małej sztywności ze strony drugiej, który za pośrednictwem stalowej linki przytwierdzono do płyty (podłogi). Podczas badań rejestrowane są siły napinające próbkę, pas i linkę oraz położenie katowe bębna. Opory zginania próbki wyznacza się przez nawijanie i odwijanie próbki podczas podnoszenia bądź opuszczania ramy z bębniem. Zasilanie przetworników, rejestrację i archiwizowanie realizowane są za pomocą wzmacniacza HBM Spider 8 i komputera PC.
- Do identyfikacji oporów zginania gąsienicy z prędkościami roboczymi, na stanowisku wyposażonym w gąsienicowy układ jezdny, odpowiadający napędowi stosowanym w ciągnikach rolniczych o masie do 15 t. Podstawowymi parametrami mierzonymi są:
 - moment obrotowy na wale koła napędowego,
 - siła na tłoczysku siłownika napinającego gąsienicę,
 - prędkość obrotowa koła napędowego,
 - prędkość obrotowa koła zwrotnego,
 - położenie górnego ciągu gąsienicy względem ramy stanowiska,
 - temperatura wewnątrz koła napędowego.

Akwizycję sygnałów ze wszystkich przetworników zapewnia wzmacniacz HBM Quantum MX840A i komputer PC. Specyfikację zastosowanych przetworników zamieszczono w Tabeli 5.7. Stanowisko pozwoliło na wyznaczenie:

- oporów w łożyskach kół napędowego i zwrotnego,
 - oporów drgań poprzecznych gąsienicy
 - masy jednostkowej gąsienicy,
 - sztywności zginania gąsienicy,
 - dekrementu tłumienia drgań swobodnych gąsienicy,
 - zmian siły na tłoczysku siłownika napinającego w wyniku drgań poprzecznych gąsienicy,
 - oporów falowania gąsienicy,
 - oporów zginania gąsienicy w warunkach roboczych.
- Stanowiska te pozwoliły na weryfikację zaproponowanych modeli matematycznych, które mogą posłużyć m.in. do wstępnej oceny oporów w projektowanym układzie napędowym z gąsienicą elastomerową. Modele te dotyczą wielu parametrów oraz wariantów obciążeń podwozi pojazdów podczas eksploatacji.
 - Zaproponowane modele, opracowane procedury i metodykę badań, można zastosować praktycznie dla dowolnego układu gąsienicowego, co świadczy o przemyślanej i uporządkowanej wiedzy w tym zakresie.

Co do samodzielności opracowania nie mam wątpliwości. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w rozprawie doktorskiej mgr inż. Jakuba Chołodowskiego zaobserwować można bardzo dobre przygotowanie do prowadzenia równoległe, badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Stopień rozwiązania zagadnień zrealizowano w pełni i często przekraczał zaplanowany zakres badań.

Umiejętność budowy modeli matematycznych za pośrednictwem programu Matlab oraz ich weryfikacja eksperymentalna, to narzędzia pracy inżynierskiej opanowane przez Doktoranta.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca mgr inż. Jakuba Chołodowskiego reprezentuje dyscyplinę „Budowa i eksploatacja maszyn” (wg nowej klasyfikacji „Inżynierii mechanicznej”) i obejmuje pełny zakres: od analizy teoretycznej, poprzez badania symulacyjne, weryfikację doświadczalną, podsumowania i określenie kierunków dalszych prac, do których gorąco zachęcam, tym bardziej, że zbudowane stanowiska i opracowane modele posiadają potencjał przekraczający potrzeby tego doktoratu. Proponuję pracę wyróżnić.

Reasumując, wyrażam opinię, że dysertacja mgr inż. Jakuba Chołodowskiego 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.

