

**Dr hab. inż. Zbigniew Żebrowski, prof. uczelni**

Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Politechnika Warszawska

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Chołodowskiego**

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

wykonanej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Piotra Dudzińskiego prof. zw.  
oraz promotora pomocniczego dr inż. Damiana Stefanowa.

**Podstawa wykonania opinii:** pismo Nr W10/41d/ 161 /2019 z dnia 08.10.2019 r.

Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej

prof. dr hab. inż. Tomasza Nowakowskiego prof. zw. Praca doktorska została mi przesłana  
razem ze zleceniem wykonania recenzji.

### 1. TEMATYKA ROZPRAWY

Omawiana rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Chołodowskiego dotyczy zagadnień identyfikacji i modelowania oporów wewnętrznych ruchu układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych. **Tematyka ta jest ważna i aktualna, biorąc pod uwagę gwałtownie rosnącą liczbę zarówno maszyn roboczych, pojazdów przemysłowych jak też i pojazdów wojskowych wyposażonych w gąsienice elastomerowe.** Pojazdy i maszyny robocze na takich gąsienicach mogą poruszać się zarówno na podłożu odkształcalnym, jak też i po drogach (podłożu nieodkształcalne). W ostatnich latach czołowi światowi producenci układów jezdnych wyposażonych w gąsienice elastomerowe dążą do zwiększenia prędkości jazdy oraz zmniejszenia energochłonności gąsienic, a tym samym zwiększenia ich sprawności.

### 2. STRUKTURA I CHARAKTERYSTYKA PRACY

Omawiana praca liczy 179 stron i podzielona jest na 7 rozdziałów. Zawiera 117 rysunków (zdjęć i wykresów), oraz 30 tabel. Układ i redakcja pracy prawidłowe. Układ pracy logiczny, kolejność rozdziałów prawidłowa. Dobór materiału ilustracyjnego chociaż ilościowo liczny, jednak ograniczony do niezbędnego, trafnie dobrany. Praca napisana poprawnym językiem, wykonana bardzo starannie pod względem edytorskim. Pewien niedosyt budzi brak zamieszczenia wykazu użytych przez Doktoranta w pracy symboli i skrótów, co nie ułatwia jej czytania. Należy też podkreślić zamieszczanie opisów i objaśnień bezpośrednio po rysunkach i wykresach, co ułatwia czytającemu ich analizę. Każdy z rozdziałów zakończony jest syntetycznym podsumowaniem Autora.

**Rozdział 1** stanowi wstęp pracy. Autor dokonuje tu porównania gąsienic elastomerowych z gąsienicami metalowymi i kołami oponowymi, wykazując zalety gąsienic

elastomerowych w stosunku do w/w (3-4 krotne wyższe prędkości jazdy niż na gąsienicach metalowych, oraz mniejsze naciski jednostkowe w stosunku do opon).

**W rozdziale 2.** Doktorant dokonał przeglądu stanu techniki w zakresie stosowanych w praktyce struktur gąsienicowych układów jezdnych, znanych typów gąsienic metalowych i elastomerowych oraz budowy podzespołów, np.: rolek (kół) nośnych, kół napędowych oraz zwrotnych i napinających stosowanych w układach jezdnych wyposażonych w różnego rodzaju gąsienice. Podsumował ponadto dostępną w literaturze wiedzę dotyczącą metod matematycznego opisu oporów wewnętrznych podwozi gąsienicowych. W formie tabelarycznej zestawiał znane z literatury wartości współczynnika oporu wewnętrznego przykładowych podwozi. Ponadto podsumował dostępne w literaturze wykresy i równania empiryczne reprezentujące charakterystyki współczynnika oporu wewnętrznego oraz sprawności podwozi gąsienicowych w funkcji prędkości przemieszczania się pojazdu. Przegląd ten odnosi się zarówno do pojazdów z gąsienicami metalowymi jak i elastomerowymi.

Doktorant wykazał świadomość, iż z powodu złożonej budowy podwozi gąsienicowych, oraz nielicznych i fragmentarycznych publikacji z badań tych obiektów analiza wartości współczynników oporu wewnętrznego podwozi istniejących nie przynosi przejrzystych wskazówek dotyczących konstruowania nowej generacji podwozi o zmniejszonej energochłonności. Racjonalizacja podwozi pod tym kątem jest możliwa na podstawie bardziej złożonych modeli, wyrażających opory wewnętrzne jako sumę oporów wynikających ze zjawisk prowadzących w trakcie przemieszczania się pojazdów do rozpraszania energii, np.: oporów ruchu kół nośnych po gąsienicach, oporów przeginania gąsienic na kołach napędowych i zwrotnych, oporów falowania gąsienic. Pełny opracowany przez Doktoranta katalog zjawisk prowadzących do strat wewnętrznych podwozi gąsienicowych zawarto w pracy.

Autor dokonał przeglądu literatury w zakresie modeli zgodnych z podanym podejściem. **W podsumowaniu rozdziału drugiego Doktorant wskazał jednocześnie na brak modelu odnoszącego się do konwencjonalnych maszyn roboczych na podwoziach z gąsienicami elastomerowymi, który pozwalałby na optymalizację podwozi najpopularniejszych pojazdów terenowych na gąsienicach elastomerowych pod kątem maksymalizacji ich sprawności. Z uwagi na nieustannie rosnącą liczbę maszyn tej klasy Autor uznał, że istnieje pilna potrzeba opracowania tego typu modelu.**

### **Rozdział 3. - cel pracy**

Autor wytycza tu 3 cele:

- **Cel nadrzędny** – opracowanie metody modelowania oporów wewnętrznych układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych.
- **Cel poznawczy** - identyfikacja i opis matematyczny zjawisk skutkujących rozpraszaniem energii w układach jezdnych z gąsienicami elastomerowymi.
- **Cel użytkarny** - sformułowanie wytycznych dla praktyki inżynierskiej dotyczących optymalizacji układów jezdnych z gąsienicami elastomerowymi z punktu widzenia doboru ich mocy napędowej.

#### **Rozdział 4. Badania i modelowanie oporów ruchu rolek nośnych po gąsienicach elastomerowych**

Pierwszą część badań poświęcono zagadnieniu oporów ruchu rolek nośnych po gąsienicach. W znanych dotąd pozycjach literaturowych odnoszących się do pojazdów na gąsienicach elastomerowych opory te obliczano wg zaczerpniętych z literatury poświęconej przenośnikom taśmowym modeli oporów toczenia krążników po taśmie. Nie uwzględniano przy tym wpływu rozkładu nacisków w kontakcie rolek nośnych z wewnętrzną powierzchnią gąsienic. Podejście takie jest uproszczone i niekompletne. Pomija przede wszystkim fakt, iż podczas użytkowania pojazdów, np. w trakcie skrętu lub jazdy po podłożu pochylonym w płaszczyźnie poprzecznej pojazdu, dochodzi do interakcji rolek nośnych z zębami prowadzącymi gąsienicy. Wg eksperymentów przeprowadzonych przez mgr Chołodowskiego interakcja ta skutkować może istotnym, od 1,5- do nawet 7,7-krtonym, wzrostem oporów ruchu rolek względem przypadku ich przetaczania bez kontaktu z zębami. Z badań tych wynika ponadto, że przy braku kontaktu rolek nośnych z zębami prowadzącymi, opory przetaczania rolek po gąsienicach rosną ze wzrostem nierównomierności rozkładu nacisku w kontakcie rolka – gąsienica. Przykładowo, w kontekście rolek typu dwukrawędziowego skrajny przypadek stanowi sytuacja, w której rolka styka się z gąsienicą tylko jedną z dwóch krawędzi.

Wobec powyższego w ramach pracy opracowano udoskonalony model oporów ruchu najczęściej stosowanych w pojazdach z gąsienicami elastomerowymi rolek dwukrawędziowych. Uwzględnia on straty wywołane zarówno toceniem rolek po powierzchni wewnętrznej gąsienic jak i ich tarcie ślizgowym po powierzchni zębów prowadzących.

Dla zwiększenia dokładności obliczeń modelowych współczynnik tarcia w kontakcie rolka – gąsienica został opisany funkcją siły normalnej nacisku rolki na ząb prowadzący gąsienicy. Model uwzględnia ponadto wpływ nierównomierności podparcia rolki na powierzchni gąsienicy na opory jej ruchu.

Oprócz ww. modelu, na podstawie wyników eksperymentów oraz obliczeń modelowych doktorant sformułował następujące wytyczne projektowe, których przestrzeganie powinno przyczynić się do ograniczenia oporów ruchu pojedynczych rolek nośnych.

- Opory związane z tarcie rolek po zębach prowadzących obniżyć można przez pokrycie powierzchni rolek materiałem o małym współczynniku tarcia we współpracy z gumą.
- Metodą ograniczenia oporów przetaczania rolek po gąsienicach jest zapewnienie możliwie równomiernego rozkładu nacisków w kontakcie rolek z gąsienicą. Efekt ten można osiągnąć przez stosowanie układów zawieszenia rolek umożliwiających ruch wahliwy rolek w płaszczyźnie poprzecznej pojazdu.
- W ciężkich maszynach roboczych, dla zapewnienia samooczyszczenia rolek z oblepiających je grudek podłoża, a tym samym zapobieżenia uszkodzeniom gąsienicy wywołanym jej miejscowym nagrzewaniem, rolki pokrywa się zazwyczaj bandażem elastomerowym. Wg wyników zawartych w pracy mgr-a Chołodowskiego opory przetaczania rolek z pokryciem elastomerowym można ograniczyć przez dobór elastomeru o możliwie małej histerezie.

## Rozdział 5. Badania i modelowanie oporów przeginania gąsienic elastomerowych na kołach

Rozdział ten omawia drugą część badań przeprowadzonych przez Doktoranta. Autor pracy skupił się tu na zagadnieniu oporów przeginania gąsienic elastomerowych na kołach gąsienicowych układów jezdnych. **Tematyka ta nie była dotąd poruszana w literaturze dotyczącej pojazdów gąsienicowych.** W literaturze dotyczącej przenośników taśmowym dostępne są modele oporów przeginania taśm przenośnikowych na bębnach. Są to jednak zależności o współczynnikach wyznaczanych empirycznie. Co więcej, klasa funkcji opisującej opory przeginania taśm przenośnikowych zmienia się zależnie od cytowanego źródła literaturowego.

Wobec powyższego Doktorant przeprowadził niezależne rozważania nad oporami przeginania gąsienic elastomerowych obejmujące analizę teoretyczną zjawiska, oraz badania eksperymentalne. Badania przeprowadził z użyciem dwóch stanowisk badawczych, w warunkach powolnego i dynamicznego przeginania, sprawdzając wpływ na opory przeginania gąsienic takich czynników jak: grubość okładzin gąsienicy, promień i prędkość zginania oraz siła napięcia gąsienicy poddanej zginaniu. Na podstawie powyższych rozważań zaproponował klasę funkcji reprezentującej opory wywołane zginaniem lub prostowaniem gąsienicy elastomerowej w pojedynczym punkcie przegięcia. Wykazał ponadto, że najbardziej efektywną metodą obniżenia oporów przeginania gąsienic elastomerowych jest stosowanie kół napędowych i zwrotnych o relatywnie dużym promieniu. Zidentyfikowana w dysertacji zależność oporów przeginania gąsienic od promienia zginania ma charakter hiperboli.

W praktyce istnieje zatem wartość promienia koła, przy której dalsze jej zwiększanie nie przynosi istotnego obniżenia oporów zginania gąsienic.

Co istotne, wg eksperymentów przeprowadzonych przez mgr-a Chołodowskiego opory przeginania gąsienic elastomerowych jedynie w niewielkim stopniu zależą od siły napięcia cięga poddanego zginaniu. Wynik taki uzyskano konsekwentnie na obu stanowiskach użytych do w/w badań. Mimo to układy podwoziowe na gąsienicach elastomerowych, podobnie jak ich odpowiedniki z gąsienicami metalowymi, wykazują wzrost oporów wewnętrznych ze wzrostem siły napięcia wstępnego gąsienic. Na podstawie wyników badań przeprowadzonych przez Doktoranta stwierdzić można, że w kontekście pojazdów z gąsienicami elastomerowymi efekt ten wynika przede wszystkim ze wzrostu oporów obracania łożysk kół, pomiędzy którymi rozpięta jest gąsienica.

Ostatnim problemem poruszonym szczegółowo przez mgr-a Chołodowskiego jest zagadnienie oporów układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych wywołanych zjawiskiem falowania gąsienic. Doktorant odniósł się do tego problemu, ponieważ opory falowania stanowiły potencjalne zakłócenie w badaniach oporów przeginania gąsienic prowadzonych w warunkach dynamicznych. W ramach tych rozważań w pierwszej kolejności sformułował model teoretyczny przeznaczony do obliczania przyrostu momentu podawanego na koło napędowe układu jezdnego z gąsienicą elastomerową, pod warunkiem wystąpienia zjawiska falowania. Model oparto na założeniu, że opór falowania wynika z rozpraszania energii w objętości odcinka gąsienicy poddanego cyklicznemu zginaniu i prostowaniu na skutek lepko-sprężystych właściwości gumy. Odcinek gąsienicy poddanej drganiom przybliżono modelem belki o określonej sztywności zginania, tłumieniu i masie. Parametrami modelu są ponadto numer postaci drgań oraz długość odcinka gąsienicy poddanego drganiom, siła napinająca tenże odcinek oraz prędkość przemieszczania się pojazdu. Po uprzednim eksperymentalnym wyznaczeniu sztywności zginania oraz dekrementu tłumienia drgań

swobodnych przykładowej gąsienicy doktorant przeprowadził serię obliczeń modelowych. Wynika z nich, że opory falowania gąsienic pod względem ilościowym mogą dorównywać oporom wywołanym przeginianiem gąsienic na kołach napędowych i zwrotnych, jeśli gąsienica poddana jest drganiom drugiej, trzeciej lub wyższej postaci o dużej amplitudzie, zaś pojazd w nią wyposażony przemieszcza się z małą prędkością. Hipoteza ta nie została potwierdzona eksperymentalnie, gdyż w warunkach stanowiska, na którym zasadniczo prowadzono badania oporów zginania gąsienic, nie odnotowano drgań gąsienicy o podanej specyfice, ponieważ na stanowisku badawczym nie zanotowano drgań gąsienicy wyższych postaci.

Drgania postaci pierwszej, nawet o znacznej amplitudzie, nie powinny natomiast prowadzić do znacznych strat. Model ten został częściowo zweryfikowany. W realiach eksperymentów przeprowadzonych w pracy zaobserwowano wyłącznie drgania postaci pierwszej.

Ich wystąpienie przejawiało się zauważalnym, choć małym na tle oporów przeginięcia rozpatrzonej w eksperymentach gąsienicy, wzrostem oporów wewnętrznych. Drgań gąsienicy wyższych postaci należy się jednak spodziewać podczas jazdy w nierównym terenie. Badania w tym zakresie jak podaje Autor w podsumowaniu rozdziału 5. będą kontynuowane w przyszłości w Jego dalszych pracach badawczych.

**Rozdziały 4 i 5 stanowią główny dorobek Doktoranta. Autor opracował modele do wyznaczania oporów poszczególnych elementów układu napędu jazdy maszyn i pojazdów z gąsienicami elastomerowymi.**

**Następnie Doktorant przeprowadził badania tych układów na trzech stanowiskach badawczych, przeprowadził identyfikację opracowanych modeli, oraz zweryfikował uzyskane wyniki z modeli teoretycznych z wynikami badań doświadczalnych.**

**Przeprowadzona szczegółowa analiza identyfikacyjna niezbędnych do opisu parametrów modeli podwozia z gąsienicami elastomerowymi została przeprowadzona profesjonalnie i starannie, a zamieszczone po kolejnych parametrach komentarze są na wysokim poziomie.**

**Wyniki porównawcze zamieścił Autor w formie tabel i wykresów, co znacznie ułatwia ich analizę i umożliwia porównywanie różnorodnych odmian tego typu napędów. Dzięki temu opracowane przez Doktoranta modele są uniwersalne i przydatne dla konstruktorów układów jezdnych pojazdów gąsienicowych z gąsienicami elastomerowymi.**

#### **Rozdział 6. Podsumowanie i wnioski końcowe**

**W części podsumowującej rozprawę Autor zaznaczył, że połączył modele oporów sformułowane w ramach ww. badań szczegółowych w jeden model nadrzędny, umożliwiając szacowanie całkowitego oporu wewnętrznego układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych. Na podstawie modelu przeprowadzono obliczenia oporów wewnętrznych przykładowych podwozi o strukturze płaskiej oraz w układzie delta.**

**Doktorant wyciągnął przy tym następujące wnioski stanowiące użyteczną wiedzę w zakresie projektowania układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych:**

- a) Sprawność oraz opory wewnętrzne układów jezdnych na gąsienicach elastomerowych zmieniają się w zależności od mocy przenoszonej w układzie jezdny. Przy określonej sile na haku wzrost mocy spowodowany wzrostem prędkości przemieszczania się pojazdu skutkuje spadkiem sprawności podwozia. Przy założonej prędkości przemieszczania się pojazdu wzrost mocy wywołany wzrostem siły na haku

pojazdu prowadzi natomiast do wzrostu sprawności. Oznacza to, że w trakcie eksploatacji pojazdów przy sile uciążu znacznie mniejszej od maksymalnej, określonej ciężarem pojazdu i współczynnikiem przyczepności, opory wewnętrzne podwozia stanowią mogą znaczną część całkowitego oporu ruchu pojazdu.

- b) Podczas obliczeń mocy jednostek napędowych pojazdów na gąsienicach elastomerowych należy rozpatrywać warunki eksploatacyjne pojazdu, w których opory wewnętrzne ruchu będą spodziewanie największe. Zarówno wzrost prędkości przemieszczania się pojazdu jak i siły na haku prowadzi do wzrostu oporów wewnętrznych wyrażonych w jednostkach siły lub momentu.
- c) W trakcie doboru mocy napędowej pojazdów gąsienicowych dużo uwagi należy poświęcić prawidłowemu oszacowaniu oporów ruchu rolek nośnych pojazdu. Podczas obliczeń inżynierskich, spośród prawdopodobnych wariantów obciążenia rolek, wytypować należy wariant, w którym sumaryczny opór ruchu rolek będzie maksymalny. Sytuacja taka będzie mieć miejsce przede wszystkim, gdy rolki będą obciążone siłami poprzecznymi o znacznej wartości. Badania nad oporami ruchu rolek przeprowadzone w rozprawie wykazały ponadto, iż opory ruchu pojedynczej rolki nie są liniową funkcją jej obciążenia pionowego. W konsekwencji sumaryczny opór ruchu rolek nośnych będzie tym większy, im bardziej nierównomierny będzie rozkład obciążenia pionowego pojazdu pomiędzy rolki.
- d) Na energochłonność układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych można wpływać przez umiejętny dobór struktury i parametrów eksploatacyjnych podwozia.

**Doktorant podał także wytyczne dla ograniczenia oporów wewnętrznych ruchu gąsienic elastomerowych, a tym samym zmniejszenie energochłonności i zwiększenia sprawności tych układów:**

- 1. Dla ograniczenia oporów wewnętrznych ruchu tej klasy układów siła napięcia wstępnego gąsienic powinna być możliwie mała, a jednocześnie wystarczająca do niezawodnego przeniesienia napędu między kołem napędowym i gąsienicą. Korzystne pod tym względem mogą być podwozia wyposażone w adaptacyjne układy napinania gąsienic, w których siła napinająca regulowana jest na bieżąco.
- 2. Energochłonność podwozi gąsienicowych jest tym mniejsza, im mniejsza jest liczba kół, na których dochodzi do przeginięcia gąsienic. W ten sposób zmniejszeniu ulega bowiem sumaryczny opór związany z obracaniem łożysk kół napędowych i zwrotnych jak również opór związany z przeginianiem gąsienic. W obliczeniach modelowych przeprowadzonych w omawianej pracy doktorskiej układy o strukturze płaskiej charakteryzują się mniejszą energochłonnością niż układ o strukturze delta.
- 3. W odniesieniu do układów o strukturze płaskiej mniejszymi stratami wewnętrznymi charakteryzują się te ich warianty, w których koło napędowe umieszczone jest w tylnej, zaś zwrotne w przedniej części pojazdu.
- 4. W konsekwencji nieliniowej zależności oporów ruchu rolek nośnych po gąsienicach elastomerowych od obciążenia pionowego rolek sumaryczny opór ruchu rolek nośnych można obniżyć, projektując pojazdy gąsienicowe w ten sposób, aby obciążenie pionowe pojazdu było rozłożone równomiernie pomiędzy

wszystkie rolki przez większą część czasu użytkowania pojazdu. Stosowanie się do tej wytycznej pozwala również na ograniczenie oporów zewnętrznych ruchu pojazdu gąsienicowego wynikających z tworzenia kolein w podatnym, sprężysto-plastycznym gruncie. Dalsze obniżenie sumarycznego oporu ruchu rolek nośnych osiągnąć można przez zastosowanie możliwie dużej liczby rolek.

## **Rozdział 7. Bibliografia**

**Biorąc pod uwagę, że publikacje z tej dziedziny są unikalne i prezentują fragmentaryczne wyniki badań, jestem pełen uznania za zgromadzoną przez Doktoranta literaturę dotyczącą układów jezdnych pojazdów gąsienicowych.**

Bibliografa zawiera 50 pozycji książkowych, artykułów, opisów patentowych, oraz 55 pozycji internetowych.

### **3. OCENA OGÓLNA I UWAGI DOTYCZĄCE ROZPRAWY**

**Zaproponowany temat rozprawy jest aktualny i ważny zarówno z punktu widzenia naukowego jak i inżynierskiego. Wpisuje się bardzo dobrze w trend prac badaczy i naukowców zajmujących się rozwojem napędów jazdy pojazdów wyposażonych w gąsienice elastomerowe. Dotyczy to zarówno maszyn wolnobieżnych jak i pojazdów szybkobieżnych (wojskowych).**

Według dostępnej literatury, w aktualnym stanie wiedzy i techniki nie jest znany model, który pozwalałby na optymalizację podwozi najpopularniejszych pojazdów terenowych na gąsienicach elastomerowych pod kątem maksymalizacji ich sprawności.

Z uwagi na nieustannie rosnącą liczbę maszyn tej klasy Doktorant zauważył pilną potrzebę **opracowania metody modelowania oporów wewnętrznych układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych** i uznał to **jako nadrzędny cel pracy.**

Oprócz tego Autor wyznaczył jeszcze dwa dodatkowe cele rozprawy:

**Cel poznawczy pracy, którym** jest identyfikacja i opis matematyczny zjawisk skutkujących rozpraszaniem energii w układach jezdnych z gąsienicami elastomerowymi.

**Cel użytkowy pracy** jako sformułowanie wytycznych dla praktyki inżynierskiej dotyczących optymalizacji układów jezdnych z gąsienicami elastomerowymi z punktu widzenia doboru ich mocy napędowej.

Do materiału zgromadzonego w poszczególnych rozdziałach pracy odniosłem się wcześniej w p.2 dobrze oceniając zawarty w niej materiał.

**Z punktu widzenia dokonań Doktoranta zarówno naukowych badawczych oraz nowatorskich elementów pracy materiał zawarty w rozdziałach 4 oraz 5 są najważniejsze.**

**Jednocześnie należy stwierdzić, że uzyskane przez Doktoranta wyniki są nowatorskie i są użyteczne w dalszych badaniach i modelowaniu nowych projektowanych konstrukcji.**

**Podsumowując stwierdzam, że materiał zawarty w pracy spełnia z dużym nadmiarem wymagania stawiane pracom doktorskim.** Doktorant zebrał mnóstwo wyników z badań i identyfikacji oraz analizy zbudowanych modeli matematycznych. Świadczy o tym skondensowana forma przedstawienia uzyskanych wyników w postaci tabel i wykresów na podstawie wielu wyników z prac badawczych.

Jako uwagę krytyczną podaję brak zamieszczenia w pracy przyjętych przez Autora symboli oznaczeń.

#### 4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

W omawianej pracy doktorskiej nie znalazłem błędów merytorycznych, a jedynie „literówki” i przejęzyczenia, których trudno się ustrzec w tego typu opracowaniach, np.:

- Zamienne używanie przez Autora wyrażen „za pomocą” i „przy pomocy”.  
To ostatnie określenie Autor używa w odniesieniu do przedmiotów m. inn. na str.: 13, 14, 21, 25, 32, 35, 61, 62, 72, 82, 109. *Mówimy przy pomocy kogoś (osoby), ale za pomocą czegoś (przedmiotu, pojęcia): nie: Za pomocą rodziny wybudował dom/ Przy pomocy rodziny wybudował dom; nie: Przy pomocy narzędzi złożył regał/ Za pomocą narzędzi złożył regał.* M. Tytuła, M. Łosiak "Polski bez błędów. Poradnik językowy dla każdego". Opracowano przy współpracy z Wydawnictwem Szkolnym PWN.
- Str. 3 – „...postawiono jako pracy” powinno być: „postawiono jako cel pracy”;
- Str. 21 – Rys. 1.13 powinno być: Rys. 2.13;
- Str. 21 i 31 – „...skręt metodą poślizgową” powinno być: „skręt burtowy”  
„czołgowy”, lub „skręt z wykorzystaniem kąta bocznego znoszenia opon”;
- Str. 22 – w tab. 2.3 podano nr rys XX
- Str. 23 – Rys. 2.15 – brak w tekście pracy opisu do części rys. a) i b)
- Str. 24 – Rys. 2.18 – brak w tekście pracy opisu do części rys. a) i b)
- Str. 26 – „...skatalogowano na Rys. 2.22” – powinno być: „...zaprezentowano na Rys. 2.22”;
- Str.29 – „Jeśli rowki okładziny są spodziewane środkiem niewystarczającym...” ?
- Str. 31 – „...zawulkanizowane są zbrojenie” – powinno być: „zawulkanizowane jest zbrojenie”;
- Str. 31 – „...metalowe wkładki (4, Rys. 2.25b.)” – powinno być: „Rys. 2.26b.”;
- Str. 33 – „Gąsienicowe układy jezdne charakteryzują się skończoną sprawnością” – czy może być sprawność nieskończona ?
- Str. 46 – „...i starty w przegubach” - powinno być: „...i straty...”;
- Str. 48 – w tab. 2.9 dwukrotnie powtórzony jest wiersz: „Opór prowadzenia gąsienicy na kołach nośnych”
- Str. 54 – jest: „ $d_0$  – średnia czopa wału pod łożyskiem bębna” – powinno być: „... średnica...”;
- Str. 60 i inne – jest „siłownik hydrauliczny” - wg PN „cylinder hydrauliczny”;
- Str. 69 – jest „...siła oporu ruchu rolki nie podlegała tak drastycznym zmianom.”  
Co to jest „drastyczna” zmiana siły oporu ruchu ?
- Str. 87 – „obciążenie rolki nośnej nawet niewielką siłą poprzeczną (rzędu 3,5 kG)” - powinno być podane w Newtonach [N];
- Str. 90 – „...jeśli liczba rolek w każdym układzie zostanie zwiększona do 8.” – jeżeli brać pod uwagę rys. z tab. 4.5., gdzie pokazane są pojazdy szybkobieżne (wojskowe), to sędzę, że 8 kół nośnych (zwanym przez Autora rolkami) się nie zmieści;
- Str. 91 – brak nazwy parametru  $\psi_{pg}$  ;
- Str. 108 – Nie wyjaśnił Autor ani w tekście, ani na rys. co oznacza bęben (‘) i bęben (‘‘) podając: „... w położeniu kątowym bębna  $\varphi$  podczas nawijania próbki na bęben (‘) i odwijania próbki z bębna (‘‘)” :
- Str. 112 – zamiast „...przesunięciu w kierunku powierzchni” – powinno być: w kierunku;
- Str. 116 – „...dotyczy estymowanej wartości parametru m zależności 5.46.” – chyba chodzi tu o zależność raczej 5.52, bo w zależności 5.46 parametr m nie



występuje.;

- Str. 125 – brak wyjaśnienia co to są za współczynniki modelu: „A1, B1, B2, B3, C1, C2, C3, D1, D2 – współczynniki modelu”.

## 5. KOŃCOWA OCENA PRACY

Przedstawione do recenzji praca wychodzi naprzeciw oczekiwaniom naukowców i badaczy nie tylko wolnobieżnych maszyn roboczych, ale także szybkobieżnych pojazdów terenowych posiadających układy jezdne z gąsienicami elastomerowymi.

Oceniając całość zaprezentowanej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą, badawczą i techniczną analizowanych w pracy zagadnień.

Praca ta ma charakter teoretyczno – badawczy. Autor z dużą swobodą dokonuje zarówno modelowania na podstawie opracowanej przez siebie metodyki modelowania złożonych układów jakimi są podwozia z gąsienicami elastomerowymi, jak również prawidłowo zaplanował i przeprowadził badania stanowiskowe.

Podsumowując wykonaną pracę Doktoranta należy stwierdzić, że:

- opracował nowatorską metodę do eksperymentalnej identyfikacji wybranych wskaźników oporów ruchu podwozi z gąsienicami elastomerowymi;
- opracował nowatorską metodę identyfikacji oporów przeginań gąsienic z małymi i roboczymi prędkościami ruchu dla różnych obciążeń pionowych oraz zmiennych wartości sił i prędkości zginania;
- zrealizował szeroki zakres badań stanowiskowych stosując zaproponowaną własną nowatorską metodę;
- wyznaczył eksperymentalne wskaźniki dla szeregu parametrów .
- opracował metodykę modelowania oporów ruchu rolek (kół) nośnych po gąsienicach elastomerowych.

Moje uwagi krytyczne dotyczą drobnych błędów w opracowaniu edycyjnym rozprawy i nie umniejszają jej wartości merytorycznej.

**Jestem pełen uznania za bardzo szerokie i wnikliwe ujęcie prezentowanej w pracy tematyki. Autor po dokonaniu przeglądu literatury, zbudował liczne modele, na podstawie których opracował metodykę modelowania oporów wewnętrznych układów podwoziowych na gąsienicach elastomerowych. Następnie zweryfikował uzyskane z obliczeń wyniki na stanowiskach badawczych (dwa z nich zbudował od podstaw, a trzecie gąsienicowe istniejące w Katedrze zmodernizował) i dokonał identyfikacji eksperymentalnej oporów zginania gąsienicy i drgań poprzecznych. Pozwoliło to Doktorantowi zrealizować cel użyteczny pracy, którym jest sformułowanie wytycznych dla praktyki inżynierskiej dotyczących optymalizacji układów jezdnych z gąsienicami elastomerowymi z punktu widzenia doboru ich mocy napędowej.**

Biorąc pod uwagę przedstawiony mi do zaopiniowania materiał, wysoki poziom aparatu matematycznego, oryginalność rozwiązanego w rozprawie istotnego zadania naukowego, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i badawczej uważam, że przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym z dnia 14.03.2003 roku (DU RP nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami), stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Jakuba Chołodowskiego do publicznej obrony opiniowanej pracy jako pracy doktorskiej reprezentującej dyscyplinę Budowa i eksploatacja maszyn (a wg nowej klasyfikacji „Inżynieria mechaniczna”).

Jednocześnie informuję Pana Dziekana o zamiarze złożenia wniosku o wyróżnienie recenzowanej przeze mnie rozprawy doktorskiej.

Niniejszą opinię przedkładam Dziekanowi Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej, zlecniodawcy powyższej recenzji.



Warszawa dn. 23.11.2019 r.

