

Katowice, dn. 28 sierpnia 2023 r.

Dr hab. inż. Marcin Staniek, prof. PŚ  
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej  
Politechnika Śląska  
e-mail: marcin.staniek@polsl.pl

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. **Krzysztofa Łukaszewskiego**  
pt. „**Badania symulacyjne oraz ocena układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego**”

Podstawa opracowania: Pismo RD/598/01/2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej, podpisane przez Przewodniczącego Pana prof. dr hab. inż. Jacka Pielechę z dnia 07.07.2023 r.

Dokumentację merytoryczną niezbędną do sporządzenia recenzji stanowi egzemplarz rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego pt. „Badania symulacyjne oraz ocena układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego”.

Promotorem rozprawy jest Pan prof. dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski, natomiast promotorem pomocniczym jest Pan dr inż. Sylwin Tomaszewski.

### 1. Uwagi ogólne o doborze tematu rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego obejmuje swoim zakresem zagadnienia konstrukcji układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego na rozkład sił styku koła z szyną, który jest wykorzystywany do oceny właściwości biegowych. Podjęte przez Doktoranta prace stanowią ważny i aktualny obszar badawczy zarówno w zakresie naukowym, ale również w zakresie praktycznym, co determinuje konieczność wykorzystania tego typu pojazdów w budownictwie, utrzymaniu infrastruktury czy ratownictwie kolejowym, jak również w przetaczaniu wagonów kolejowych jako alternatywy dla tradycyjnych lokomotyw manewrowych. Opracowana w pracy metoda oceny właściwości biegowych pojazdu przy różnych wariantach konstrukcji osi szynowych umożliwi kompleksową ocenę istniejących i projektowanych rozwiązań konstrukcyjnych układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego w zakresie efektywności eksploatacji i bezpieczeństwa ruchu.

Autor rozprawy mając na uwadze powyższe fakty, w swojej rozprawie wykorzystuje współczesne narzędzia symulacyjne do oceny właściwości biegowych pojazdów szynowo-drogowych dla różnych scenariuszy badawczych. Z wykorzystaniem środowiska SIMPACK modeluje zależności pojazdu szynowo-drogowego w połączeniu z układem torowym z uwzględnieniem danych brył masowych, podatności elementów łączących i danych geometrycznych.

Stwierdzam, że Pan mgr inż. Krzysztof Łukaszewski podejmując się realizacji rozprawy doktorskiej dotyczącej oceny właściwości biegowych pojazdu przy różnych wariantach konstrukcji osi szynowych, dobrze wpisuje się w potrzeby aktualnych badań

w przedmiotowym obszarze. Przeprowadzenie badań, zamodelowanie przedmiotowych konstrukcji pojazdów szynowo-drogowych, realizacja symulacji, analiz i ocen uzyskanych wyników nie byłyby możliwe bez odpowiedniego przygotowania naukowego i zawodowego. Uważam, że realizowana praca ma charakter zarówno poznawczy jak i użyteczny dla praktyków.

Praca składa się ze 141 stron, streszczenia w języku polskim i angielskim, wprowadzenia, 5 ponumerowanych rozdziałów, podsumowania i wniosków, oraz bibliografii. Spis materiałów źródłowych zawiera 93 pozycje, w tym 4 pozycje współautorskie Doktoranta.

## **2. Analiza struktury rozprawy – podział treści na rozdziały**

Zasadnicza treść rozprawy doktorskiej zawarta jest w rozdziałach 1-6.

Część merytoryczną pracy rozpoczyna nienumerowany rozdział *Wprowadzenie* (str. 2), który stanowi wstęp do problemu badawczego. Charakteryzuje podział pojazdów szynowo-drogowych pod względem realizacji napędu i hamowania w torze. Wykazuje konieczność opracowania metody oceny wariantów konstrukcyjnych osi szynowych na bieg pojazdu, bezpieczeństwo przed wykolejeniem i podatność na zużycie powierzchni zarysu profilu koła.

W rozdziale 1. *Analiza stanu wiedzy* (str. 24) przedstawiono definicje i typy pojazdów szynowo-drogowych w odniesieniu do konstrukcji szynowego układu jezdny. Dokonano podziału pojazdów ze względu na ich zastosowanie wyodrębniając pojazdy do prowadzenia prac manewrowych zbudowane na bazie ciągników rolniczych i pojazdów ciężarowych, pojazdy szynowo-drogowe dla Kolejowego Ratownictwa Technicznego wykonane na bazie pojazdów ciężarowych wyposażonych w szynowy układ jezdny typu 2 i 3, maszyny do robót budowlanych – koparki, pojazdy do prowadzenia prac naprawczych i utrzymaniowych infrastruktury torowej (pługi, odśnieżarki, kosiarki, czyszczarki, pojazdy ze zwyżką), pojazdy do przewozu osób na bazie mikrobusów i autobusów, pojazdy do monitorowania stanu infrastruktury torowej. Wykazano przewagę dotyczącą emisyjności lokomotywy względem ciągnika szynowo-drogowego w warunkach pracy manewrowej. Skrótowo przedstawiono procedury dopuszczenia pojazdów szynowo-drogowych przeznaczonych do eksploatacji po wydzielonej infrastrukturze kolejowej jak również po krajowych liniach kolejowych. W ramach podrozdziału 1.2 *Symulacje właściwości bieżowych pojazdów szynowych* Autor rozważał stan wiedzy w zakresie zachowania się pojazdu w torze w różnych warunkach eksploatacji zależnie od czynników konstrukcyjnych pojazdu zwłaszcza geometrii profili kół, rodzaju połączenia kół z osią (oś z zależnymi lub niezależnymi kołami), odległości pomiędzy osiami, sztywności i tłumienności elementów podatnych, rozkładu mas na pojeździe i wielu innych parametrów. Odniósł się do publikacji badań dynamiki pojazdów szynowych wykorzystując metodę układów wieloczłonowych i opracowanych algorytmów FASTSIM, CONTACT. Zakończenie rozdziału stanowi podsumowanie analizy stanu wiedzy, gdzie wykazaniem dominującym obszarem dostępnej wiedzy jest konstrukcja, wyposażenie i przeznaczenie pojazdów szynowo-drogowych.

Na podstawie przeprowadzonego studium literaturowego Doktorant zdefiniował następujący problem badawczy, cyt.: „Wyznaczenie rzeczywistego rozkładu sił na styku koła z szyną pojazdu szynowo-drogowego z napędem ciernym bębnowym podczas biegu po łuku toru przy użyciu symulacji komputerowej w celu oceny właściwości bieżowych.”

Rozdział 2. *Cel i zakres pracy* (str. 3) w sposób formalny definiuje cel pracy rozdzielając cele naukowe i użyteczne pracy. Wskazana przez Autora rozprawy luka badawcza w zakresie właściwości biegowych pojazdów szynowo-drogowych typu 9B lub zbliżonych, oraz analiza potrzeb rynku tego rodzaju pojazdów jest podstawą zdefiniowania celu. Cytując Doktoranta:

**„Celem pracy jest analiza wpływu wybranych wariantów konstrukcji układów biegowych pojazdów szynowo-drogowych na ich oddziaływanie z torem”,**

a celem naukowym:

**„Celem naukowym pracy jest analiza porównawcza wpływu wybranych profili kół oraz konstrukcji osi szynowych na prędkość krytyczną (stabilność biegu), bezpieczeństwo przeciwko wykolejeniu oraz poziom zużycia powierzchni zarysu profilu kół.”**

Cel pracy został poprawnie zdefiniowany i nawiązuje do istoty problemu naukowego określonego tytułem rozprawy „Badania symulacyjne oraz ocena układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego”. Uzpełnieniem sformułowanego celu pracy, są postawione cele użyteczne, cyt.:

1. Opracowanie nowego pod względem właściwości biegowych szynowego układu jezdnyego analizowanego pojazdu w zakresie: zwiększenia prędkości eksploatacyjnej i poprawy bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu.
2. Zwiększenie trwałości szynowego układu biegowego analizowanego pojazdu w aspekcie zużycia ściernego powierzchni zarysu profilu kół. Koła pojazdu nie są przeznaczone do reprofiliacji, a więc wskazana jest ich długa żywotność.
3. Opracowane modele wariantów rozwiązań konstrukcyjnych układów biegowych oraz wyniki badań symulacyjnych będą podstawą do projektowania szynowych układów biegowych pojazdów szynowo-drogowych i szynowych.”

Doktorant dążąc do zweryfikowania przyjętych celów pracy postawił następujące zadania badawcze, cyt.:

1. Przegląd i analiza literatury w zakresie pojazdów szynowo-drogowych oraz właściwości biegowych pojazdów szynowych.
2. Opracowanie metodyki badań symulacyjnych.
3. Wykonanie modelu pojazdu szynowo-drogowego na bazie ogólnodostępnego samochodu ciężarowego wyposażonego w trzyosiowy, szynowy układ jezdny z napędem ciernym bębnowym. Uwzględniając w modelu zmienne w zakresie masy pojazdu, konstrukcji osi szynowej i profilu kół.
4. Przeprowadzenie badań symulacyjnych właściwości biegowych pojazdu na torze kolejowym w zakresie:
  - a. wyznaczenia prędkości krytycznej na prostej przy zmiennych prędkościach biegu poprzez rejestrację wychylenia środka osi szynowych względem osi wzłużnej toru oraz rejestrację wartości średnio kwadratowej siły prowadzącej ( $Y_{rms}$ ) dla zestawów kołowych,
  - b. wyznaczenie wartości stosunku siły prowadzącej ( $Y$ ) do siły nacisku ( $Q$ ) koła jako miary podatności na wykolejenie oraz wartości wskaźnika zużycia powierzchni zarysu profilu

kół ( $i_{wn}$ ), określonego z wartości sił stycznych i poślizgów koła podczas biegu po krzywej składającej się z łuku toru o zmiennej wartości promienia od 150 do 900 metrów,

c. przeprowadzenie badań podatności na wykolejenie na torze wichrowatym przy prędkości  $v \geq 10$  [km/h].

5. Zestawienie i porównanie uzyskanych wyników.”

Autor rozprawy określiła kryterium uznania celu głównego i naukowego pracy (str. 33) jako cyt. „...wskazanie najbardziej korzystnej konstrukcji układu biegowego analizowanego pojazdu szynowo-drogowego ze względu na bezpieczeństwo przed wykolejeniem i poziom zużycia powierzchni zarysu profilu kół na podstawie wyników symulacji biegu pojazdu po krzywej torowej uwzględniając wyniki uzyskane w badaniu stabilności biegu”.

W rozdziale 3. *Metodyka badań* (str. 28), w podrozdziale 3.1 *Opis obiektu badań* Autor rozprawy charakteryzuje przedmiotowy pojazd szynowo-drogowy z napędem ciernym bębnowym. Pojazd składa się z dwóch głównych podzespołów: samochodu ciężarowego oraz szynowego układu jezdny, przeznaczony do poruszania się po torze normalnym o rozstawie szyn 1435 [mm], w skład którego wchodzi przedni jednoosiowy układ szynowy oraz tylny dwuosiowy układ szynowy. Elementy łączące szynowy układ jezdny z samochodem umieszczono pomiędzy resorami, a mostami napędowymi samochodu co zapewnia amortyzowanie pionowe pojazdu. Podnoszenie, opuszczanie i docisk do kół drogowych realizowane są siłownikami hydraulicznymi. Napęd i hamowanie pojazdu są realizowane wszystkimi kołami pojazdu – samochód wyposażono w napęd na cztery koła. Wewnątrz każdego koła szynowego i bębna napędowego zastosowano układ łożysk oraz przekładnię planetarną pozwalającą na zachowanie takiego samego kierunku jazdy jak w ruchu drogowym.

W podrozdziale 3.2. *Model symulacyjny pojazdu* Autor rozprawy przedstawił opracowany model wielocłonowy pojazdu składający się z brył masowych, które odwzorowują rzeczywisty rozkład mas na pojeździe oraz elementy podatne zapewniają właściwe sztywności i tłumienia elementów zawieszenia samochodu i innych węzłów wpływających na pracę układu. Część mas szynowego układu jezdny dodano do brył masowych przedniego i tylnego mostu samochodu. Dodatkowo w celu zapewnienia odpowiednich wartości podatności przednią i tylną oś samochodu zamodelowano jako bryły sztywne połączone elementami podatnymi wprowadzającymi zastępczą sztywność skrętną. Opis i parametry brył masowych, wzajemne powiązanie brył masowych elementami podatnymi, jako również wartości sztywności i tłumienia elementów podatnych łączących bryły zestawiono w postaci graficznej i tabelarycznej. Zamieszczono charakterystyki zmiany ugięcia przedniej i tylnej sprężyny piórowej. Z wykorzystaniem opracowanego modelu oraz pozyskanych danych Doktorat zbudował w programie SIMPACK 2017 model symulacyjny przedmiotowego pojazdu szynowo-drogowego. Ponadto, zamodelował podatność styku koło-szyna oraz podatność podkładów kolejowych i podtorza oraz dodatkowy element umożliwiający ustawianie zadanej prędkości w formie bryły masowej połączonej z pojazdem elementem podatnym, który może poruszać się tylko w osi wzdłużnej toru, a z pojazdem połączony jest tylko sztywnością wzdłużną. Brak więzów w pozostałych kierunkach zapewnia swobodę ruchu pojazdu. Do obliczeń sił styku koła z szyną zastosował algorytmy FASTSIM i CONTACT, które są powszechnie wykorzystywane w środowiskach obliczeniowych przeznaczonych do zastosowań kolejowych.

W podrozdziale 3.3 *Warianty badawcze pojazdu* Autor rozprawy zdefiniował cztery warianty konstrukcyjne szynowego układu biegowego modelowanego pojazdu, cyt.: „ wariant o

oznaczeniu: **1.N** – osie z kołami niezależnymi o profilu stożkowym z obrzeżami (pierwotna wersja pojazdu), **2.Z** – osie z kołami zależnymi o profilu stożkowym z obrzeżami, **3.N.W** – osie niezależne, na kołach osi II profil walcowy bez obrzeża co powoduje zanik prowadzenia w torze przez koła tej osi, **4.Z.W** – osie zależne, na kołach osi II profil walcowy bez obrzeża.” Dla zdefiniowanych wariantów konstrukcji Doktorant przyjął następujące warianty badawcze: (1) profil szyny S49 o pochyleniu 1:20 i nowe koło S1002 o ekwiwalentnej stożkowatości profilu koła 0,016; (2) profil szyny S49 o pochyleniu 1:20 i zużyte koło S1002 o ekwiwalentnej stożkowatości profilu koła 0,255; (3) profil szyny UIC60 o pochyleniu 1:40 i nowe koło S1002 o ekwiwalentnej stożkowatości 0,180; (4) profil szyny UIC60 o pochyleniu 1:40 i zużyte koło S1002 o ekwiwalentnej stożkowatości 0,406. Symulacje są przeprowadzane uwzględniając stan pusty i załadowany pojazdu.

W podrozdziale 3.4 *Scenariusze badań* Autor rozprawy określił zakres przeprowadzanych symulacji biegu pojazdu szynowo-drogowego, których celem jest: (1) analiza stabilności biegu i wyznaczenie prędkości krytycznej; (2) ocena bezpieczeństwa przed wykolejeniem oraz podatności na zużycie powierzchni zarysu profilu kół w oparciu o symulację biegu po łuku toru o zmiennym promieniu; (3) ocena bezpieczeństwa przed wykolejeniem na torze wchrowatym. W ramach badania stabilności biegu Doktorant wyznaczył prędkości krytyczne dla zadanych dwóch kryteriów: zaniku biegu niestabilnego (wężykowania, oscylacji osi szynowej) oraz sumy sił prowadzących układu kołowego. Niestabilność pojazdu wymuszała wprowadzeniem poprzecznych zaburzeń torowych na długości 20 metrów w początkowej części toru badawczego. Ocenę bezpieczeństwa przed wykolejeniem Doktorant symulował na łuku toru o zmiennym promieniu od 900 do 150 [m], uwzględnił zmianę wysokości szyny zewnętrznej na łuku celem równoważenia przyspieszenia bocznego do poziomu dopuszczalnego. Założył prędkość biegu po łuku wynoszącą 40 [km/h] celem uniknięcia biegu nadkrytycznego dla wszystkich wariantów badawczych. Przyjął miarę bezpieczeństwa przed wykolejeniem jako wartość współczynnika wykolejenia  $Y/Q$  tj. stosunek siły prowadzącej  $Y$  do siły nacisku  $Q$  koła. Ocenę bezpieczeństwa przed wykolejeniem Doktorant przeprowadził na torze wchrowatym o promieniu  $R=150$  [m] w warunkach quasi-statycznych z prędkością biegu pojazdu  $v=10$  [km/h]. Żadaną wchrowatość określił zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 14363:2019, a ocenie poddaje współczynnik wykolejenia  $Y/Q$  którego wartość graniczna wynosi 1,2 kryterium Nadala.

W rozdziale 4. *Wyniki badań* (str. 63), podrozdziale 4.1 *Wyznaczenie rozkładu nacisku kół* Autor rozprawy zestawia statycznie uzyskane rozkłady nacisku kół pojazdu w stanie pustym (MWP) i załadowanym (DMC). Wykazuje, że pod względem wytrzymałościowym zróżnicowanie wartości nacisków przypadających na poszczególne koła układu biegowego nie naraża pojazdu na uszkodzenie, a uzyskana maksymalna wartość siły nacisku dla kół osi III wynosząca  $Q_{stat.}=29$  [kN] jest poniżej projektowanej wartości dla kół szynowych.

W podrozdziale 4.2. *Badanie stabilności biegu i wyznaczenie prędkości krytycznej* Doktorant przedstawia uzyskane wartości prędkości przy której bieg niestabilny pojazdu przechodzi w stabilny oraz wartości prędkości dopuszczalnej określonej zgodnie z kryterium sumy sił prowadzących. Wykazuje, że dla pojazdów wyposażonych w układ biegowy z niezależnymi kołami na osi (1.N i 3.N.W) nie zaobserwowano w procesie symulacji biegu niestabilnego dla ustalonej wartości dopuszczalnej prędkości 50 [km/h]. Zauważa jednakże, że dla pojazdów wyposażonych w układ biegowy z zależnymi kołami (2.Z i 4.Z.W) występuje bieg niestabilny (wężykowanie), który zanika przy prędkościach niższych od prędkości

dopuszczalnej uzyskanej z kryterium sumy sił. Obniżenie prędkości zaniku wężykowania obserwowane jest przy zwiększeniu ekwiwalentnej stożkowatości kół lub zwiększeniu masy pojazdu szynowo-drogowego.

W podrozdziale 4.3. „Ocena biegu po łuku toru” Autor rozprawy zestawiał wyniki uzyskane z realizacji symulacji na łuku toru o zmiennym promieniu od 900 do 150 [m] podczas biegu z prędkością 40 [km/h] przy oddziaływaniu siły dociażenia koła nabiegającego, które pozwalają na ocenę wariantów konstrukcji układu biegowego w zakresie bezpieczeństwa przed wykolejeniem oraz podatności na zużycie ścierne kół. Uzyskane wartości współczynnika wykolejenia  $Y/Q$  oraz wskaźnika zużycia kół  $i_{wn}$  dla poszczególnych wariantów konstrukcyjnych pojazdu odniesiono dla założonych promieni łuków poziomych: 150, 500 i 900 metrów. Podatność na wykolejenie wariantów konstrukcji pojazdu Doktorant określił na podstawie analizy liczby maksymalnych i minimalnych wartości współczynnika wykolejenia  $Y/Q$  badanego wariantu dla zadanych parametrów wejściowych w procesie symulacji. Autor rozprawy wykazał, że bezpieczniejsze są warianty pojazdu szynowo-drogowego wyposażone w koła zależne: 2.Z i 4.Z.W dla których uzyskano dodatnie wartości sumy różnic ekstremów. Najkorzystniej ocenił wariant z zależnymi kołami i profilem walcowym na osi środkowej 4.Z.W przy małej jak i dużej stożkowatości. Warianty z kołami niezależnymi 1.N i 3.N.W uzyskały wartości ujemne sumy różnic ekstremów. Wariant pierwotny 1.N został uznany jako najbardziej narażony na wykolejenie podczas przemieszczania się po łuku toru. Podatności na zużycie ścierne profilu koła Doktorant wykazał na podstawie wartości sumarycznej  $i_{wn}$  uzyskanej dla wszystkich kół danego wariantu konstrukcyjnego oraz sumy różnic ekstremów. Najwyżej ocenił wariant 1.N, natomiast najniżej – wariant 2.Z. Zauważył, przesunięcie środka osi zestawu kołowego względem osi toru w kierunku szyny zewnętrznej dla wariantów konstrukcyjnych 1.N i 3.N.W i pojawienie się siły poprzecznej  $Y$  o wyższej wartości w porównaniu do wariantów konstrukcyjnych 2.Z i 4.Z.W. Tym samym uznał większą podatność na wykolejenie dla wariantów konstrukcyjnych 1.N i 3.N.W. i wyższe wskaźniki zużycia kół dla wariantów konstrukcyjnych 2.Z i 4.Z.W.

W podrozdziale 4.4. „Ocena bezpieczeństwa przed wykolejeniem na torze wichrowatym” Autor rozprawy przedstawia wartość współczynnika wykolejenia dla badanych wariantów konstrukcyjnych układu biegowego, uzyskane w biegu do przodu i tyłu z prędkością 10 [km/h]. Identyfikuje przekroczenie wartości granicznej współczynnika wykolejenia określonej kryterium Nadala celem analizy wartości uniesienia koła nadbiegającego. Doktorant wykazał, że podane analizie warianty badawcze bezpiecznie pokonują tor wichrowaty w trakcie biegu do przodu, a maksymalna uzyskana wartość współczynnika wykolejenia 0,64 jest dużo niższa od wartości granicznej. W trakcie biegu do tyłu dla analizowanych wariantów konstrukcyjnych układu biegowego pojazdu w stanie pustym, Doktorant odnotował wartość równe lub przekraczające wartość graniczną współczynnika wykolejenia i uzyskał wartość uniesienia koła nadbiegającego  $\Delta z = 3,58$  [mm]; poniżej wartości dopuszczalnej. Wykazał tym samym, że badane warianty konstrukcji osi szynowej spełniają kryteria oceny bezpieczeństwa przed wykolejeniem na torze wichrowatym określone normą PN-EN 14363+A1:2019-02 dla biegu do przodu i tyłu.

W podrozdziale 4.5 Podsumowanie badań symulacji Autor rozprawy stwierdza, że układ biegowy w wariantcie konstrukcji 4.Z.W jest najmniej podatny na wykolejenie podczas pokonywania łuku toru z prędkością eksploatacyjną spośród badanych wariantów

konstrukcyjnych i pozwala zachować prędkość konstrukcyjną pojazdu  $v=50$  [km/h], przy uzyskanej prędkości krytycznej ( $v_{kr}=61$  [km/h]). Pod względem zużycia powierzchni zarysu profilu kół Doktorant najwyżej ocenia wariant konstrukcyjny 1.N o kołach niezależnych i profilu S1002 z obrzeżami na wszystkich kołach. Konkludując ten podrozdział rozprawy Autor stwierdza cyt.: „...najbardziej korzystnym rozwiązaniem konstrukcyjnym układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego spośród ocenianych jest konstrukcja składająca się z osi z zależnymi kołami i profilem walcowym na osi środkowej, oznaczenie 4.Z.W. Zastosowanie na osi środkowej profilu walcowego obniża koszty wykonania układu biegowego.”

W rozdziale 4. *Weryfikacja modelu symulacyjnego (str. 1)* Autor rozprawy przedstawia porównanie wartości współczynnika wykolejenia  $Y/Q$  uzyskane dla symulacji biegu pojazdu szynowo-drogowego w wersji uproszczonej zgodnej z obliczeniami analitycznymi zawartymi w raporcie „OR-8299, Obliczenia mechaniczne i wytrzymałościowe szynowego układu jezdnego samochodu ciężarowego IVECO Eurocargo model HL 130E23W”. Pojazd będący podstawą wymienionego raportu został zamodelowany w badanych wariantach konstrukcyjnych w środowisku SIMPACK, a różnica procentowa pomiędzy wynikami obliczeń analitycznych a symulacją wynosi około 2% zarówno dla biegu do przodu i tyłu. Ze względu na zakres treści tego rozdziału zasadnym wydaje się przeniesienie jego treści jako jednego z podrozdziałów do rozdziału 4. *Wyniki badań*.

W nienumerowany rozdziale *Podsumowanie i wnioski (str. 7)* Autor rozprawy konkluduje treści przekazywane w poszczególnych rozdziałach pracy. Odnosi się do badań stabilności biegu i wyznaczenia prędkości krytycznej, oceny biegu po łuku toru o zmiennym promieniu oraz oceny bezpieczeństwa przed wykolejeniem na torze wichrowatym. Formułuje wnioski poznawcze dotyczące stabilności biegu i prędkości krytycznej – 7 punktów, dotyczące bezpieczeństwa przed wykolejeniem oraz podatności na zużycie ścierne kół – 12 punktów oraz dotyczące bezpieczeństwa przed wykolejeniem na torze wichrowatym z niską prędkością biegu – 5 punktów. Doktorat formułuje również wnioski użytkowe – 7 punktów, wynikające z realizacji badań symulacyjnych w środowisku SIMPACK. Sformułowane wnioski zarówno poznawcze jak i użytkowe są poprawne i wynikają z treści rozprawy doktorskiej i realizowanych badań. Kończąc ten rozdział pracy Doktorant przedstawia kierunki dalszych badań.

Podsumowując uważam, że całościowy układ rozprawy jest logiczny, czytelny, a ogólna jej forma, zakres podział treści na rozdziały, ujmują wszystkie istotne elementy tematu rozprawy.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Analiza treści całości rozprawy wykazuje, że Pan mgr inż. Krzysztof Łukaszewski podjął się trudnego zadania, zdefiniowanego w celu pracy, a dotyczącego badania wpływu wybranych wariantów konstrukcji układów biegowych pojazdów szynowo-drogowych na ich oddziaływanie z torem. Rezultatem osiągnięcia przedmiotowego celu pracy była identyfikacja wariantu konstrukcyjnego układu biegowego 4.Z.W, tj. składającego się z osi z zależnymi kołami i profilem walcowym na osi środkowej, jako najbardziej korzystnego wariantu przy uwzględnieniu analizy stabilności biegu i wyznaczenia prędkości krytycznej, oceny bezpieczeństwa przed wykolejeniem i podatności na zużycie powierzchni zarysu profilu kół w oparciu o symulację biegu po łuku toru o zmiennym promieniu, oraz oceny bezpieczeństwa

przed wykolejeniem na torze wichrowatym. W tym kontekście, uważam że najważniejszą częścią rozprawy są rozdziały 2, 3 i 4, w których Autor przedstawia zaproponowaną metodę badawczą określając m.in. elementy modelu symulacyjnego, warianty konstrukcyjne pojazdu, scenariusze realizacji badań, metody przetwarzania uzyskanych wyników i weryfikacji poprawności modelowania.

Uważam, że postawiony przez Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego cel rozprawy jest istotny zarówno z punktu widzenia naukowego jak i użytecznego. Przeprowadzone badania symulacyjne i dokonane analizy uzyskanych wyników potwierdzają realizację celu głównego oraz celów naukowych i użytecznych przedmiotowej pracy pt. „Badania symulacyjne oraz ocena układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego”.

Wysoko należy ocenić proces odwzorowywania z wykorzystaniem narzędzia SIMPACK pojazdu szynowo-drogowego będącego podstawą realizacji m.in. badań stabilności biegu i wyznaczenie prędkości krytycznej, czy oceny bezpieczeństwa przed wykolejeniem. Uzyskane w procesie symulacji wyniki pozwoliły na szczegółowe analizy i oceny badanych wariantów konstrukcyjnych pojazdu i wnioskowania na postawione przez Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego pytania badawcze.

Uważam, że przedstawiona do recenzji praca jako rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego jest oryginalnym, autorskim ujęciem problemu oceny właściwości biegowych pojazdu szynowo-drogowego o niestandardowej konstrukcji układu biegowego podczas przemieszczania się po łuku toru. Wypełniona przez Doktoranta luka badawcza umożliwia ocenę wariantów konstrukcji układu biegowego dla różnych scenariuszy badawczych. Analiza wyników obejmuje zestawienie i porównanie uzyskanych w trakcie symulowanego biegu pojazdu wartości sił styku koła szyna i przemieszczeń kół i osi z których wyznaczono wskaźniki do oceny stabilności biegu, bezpieczeństwa przed wykolejeniem oraz podatności na zużycie ścierne kół.

Przytoczone fakty wskazują, że Doktorant zrealizowała cel główny pracy oraz cele naukowe i użyteczne. Jako główne osiągnięcia Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego uważam:

1. Opracowanie modelu pojazdu szynowo-drogowego zbudowanego z samochodu ciężarowego wyposażonego w szynowy układ biegowy w którym napęd jest przekazywany z kół drogowych na koła szynowe poprzez bębny napędowe.
2. Badanie stabilności biegu i wyznaczenie prędkości krytycznej przy zadanym zmiennym profilu prędkości na prostym odcinku toru w którym na początku zadano poprzeczne nierówności wzbudzające wężykowanie (oscylację) zestawów kołowych.
3. Ocenę biegu po łuku toru o zmiennym promieniu  $R$  od 900 do 150 [m] z prędkością eksploatacyjną  $v_e=40$  [km/h], uwzględniając przyspieszenie odśrodkowe  $a_r=1,0$  [m/s<sup>2</sup>] które dociąża koło nabiegające.
4. Ocenę bezpieczeństwa przed wykolejeniem na torze wichrowatym charakteryzującym się różnicą w wysokości szyn, przy quasi-statycznej prędkości biegu pojazdu wynoszącej  $v_b=10$  [km/h].
5. Weryfikację modelu w oparciu o wartości współczynnika wykolejenia  $Y/Q$  dla kół prowadzących podczas biegu do przodu i tyłu uzyskane w procesie symulacyjnym oraz metodach analitycznych.



Stwierdzam, że podjęta w rozprawie problematyka oraz sposób rozwiązania postawionego problemu badawczego świadczy o dobrym przygotowaniu merytorycznym Doktoranta, dojrzałości naukowej i umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Omawiane zagadnienia potwierdzają dobre przygotowanie i zaangażowanie Autora rozprawy w rozwiązywaniu problemu.

Podsumowując, uważam że omówiona konstrukcja rozprawy oraz sposób opracowania materiału empirycznego, a także forma przeprowadzonej analizy, w tym przyjęta metodyka badawcza są właściwe dla tego rodzaju prac. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną, dobrą znajomością przedmiotu badań oraz opanowaniem metod eksperymentalnych i stosowanych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

#### 4. Pytania szczegółowe i uwagi krytyczne

Analiza tekstu rozprawy rodzi pytania szczegółowe, które nasunęły się w trakcie pisania recenzji. Odpowiedzi na poniższe pytania oczekuje podczas publicznej obrony:

1. W pracy używa Pan stwierdzenia „pojazd typu 2” z oznaczeniem „9C” wg normy PN-EN15746-1 pisząc na str. 31 cyt.: „W przypadku pojazdów typu 2 (9C) z napędem ciernym bębnowym...” oraz na str. 35 cyt.: „Obiektem badań jest pojazd szynowo-drogowy z napędem ciernym bębnowym, wg przyjętej wcześniej klasyfikacji typ 2 (9C).” Proszę o wyjaśnienie czy oznaczenie 9C jest właściwe? Zasadnym z punktu widzenia przedmiotu badań oraz przyjętej klasyfikacji wydaje się oznaczenie 9B.
2. W pracy zastosował Pan pakiet narzędzi symulacyjnych SIMPACK nie określając jednoznacznie dlaczego z tego rozwiązania skorzystał. Proszę o wyjaśnienie jakie funkcjonalności tego narzędzia zdecydowały o jego wykorzystaniu w Pana pracy doktorskiej.
3. Pojazdy szynowo-drogowe z napędem ciernym bębnowym narażone są m.in. na samowolne staczanie, ograniczoną efektywność hamowania co jest związane najczęściej z niewystarczającą siłą docisku koła drogowego do bębna koła szynowego. Proszę o wyjaśnienie jak zamodelowano ten element i jakie przyjęto siły docisku koła do bębna.
4. W podrozdziale 3.3 Warianty badawcze pojazdu napisał Pan cyt. „Możliwe jest wyposażenie pojazdu w sprzęg z przodu lub z tyłu umożliwiające przetaczanie pojazdu przez inny pojazd...”. Czy w swoich badaniach zrealizował Pan symulację przetaczania przedmiotowego pojazdu? Jak Pan sądzi jaki będzie to miało wpływ na stabilność biegu, prędkość krytyczną i bezpieczeństwo przed wykolejeniem.
5. W podsumowaniu przedstawia Pan kierunki swoich dalszych badań. Proszę o krótki komentarz jakie rozwiązanie układu biegowego zamierza Pan zastosować w projektowanym / modelowanym pojeździe szynowo-drogowym na bazie samochodu ciężarowego.

W pracy dostrzeżono niedociągnięcia, które nie wpływają na ocenę merytoryczną rozprawy, stanowią jedynie pewne niedociągnięcia edytorskie czy upraszczające. Wśród nich należy wymienić m.in.:

1. Błędy interpunkcyjne: „przecinek” – częsty brak uwzględniania zasady oddzielania zdania nadrzędnego od zdania podrzędnego.
2. W streszczeniu pracy na str. 2 jest zapis „...podczas przemieszczania się w łuku toru”, a powinno być „...podczas przemieszczania się **po łuku toru**”.

3. Na str. 48 jest zapis „Do obliczeń sił styku koła z szyną zastosowano dwa algorytmy (opis w rozdziale 2.2) ...”, a powinno być „Do obliczeń sił styku koła z szyną zastosowano dwa algorytmy (opis w rozdziale 1.2) ...”.
4. Na str. 123 jest zapis „...pojazd wyposażony w osie z zależnymi kołami wariantów badawczych 2.Z i 4.W.Z...”, a powinno być „...pojazd wyposażony w osie z zależnymi kołami wariantów badawczych 2.Z i 4.Z.W...”.
5. Na str. 126 jest zapis „Zestawienie uzyskanych wartości znajduje się w tabeli 4.12...”, a powinno być „Zestawienie uzyskanych wartości znajduje się w tabeli 5.1”.
6. W pracy pojęcie ilość (np. ilość zębów na kole) ze względu na charakter policzalny opisywanego przedmiotu powinno być zamienione na liczba.

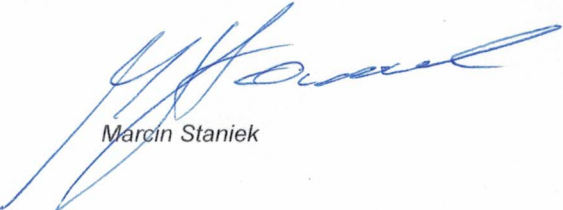
## 5. Konkluzja

Uważam, że przedstawiane w recenzji uwagi i zastrzeżenia absolutnie nie zmniejszają merytorycznej wartości naukowej i aplikacyjnej recenzowanej pracy. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu badawczego sformułowanego w tezie pracy oraz opisanej przeze mnie w charakterystyce rozprawy. Jej zakres mieści się w obszarze badań właściwym dla dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego pt. „Badania symulacyjne oraz ocena układu biegowego pojazdu szynowo-drogowego”, spełnia wymagania art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595, z późn. zm.) i Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) oraz mieści się w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej oraz o dalsze procedowanie postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Ponadto, biorą pod uwagę wysoce pozytywną wartość merytoryczną rozprawy, w przypadku pozytywnego przebiegu obrony, w tym pozytywnych odpowiedzi na pytania podczas obrony oraz spełnienia stosownych wymagań, wystąpię o wyróżnienie rozprawy Pana mgr inż. Krzysztofa Łukaszewskiego.



Marcin Staniek