



Bielsko-Biała dn. 25.08.2025

## **Recenzja**

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Wojciecha Paszkowiaka**  
zatytułowanej

### **Kinematyka i dynamika autonomicznego pociągu logistycznego**

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Bartkowiak, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Pelic

#### **1. Podstawa opracowania**

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie pisma dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 26.06.2025 - pismo DIM.075.190.2025.

#### **2. Charakterystyka ogólna rozprawy**

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 217 stron, zawierających: spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, 8 rozdziałów, 1 dodatek oraz wykaz cytowanej literatury.

Rozdział pierwszy recenzowanej rozprawy jest poświęcony przeglądowi aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętego przez Doktoranta problemu badawczego. W pierwszej części tego rozdziału przedstawiono ogólną charakterystykę pociągów logistycznych ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań konstrukcyjnych wózków, które istotnie wpływają na realizowaną trajektorię pojedynczego wózka i w rezultacie całego pociągu logistycznego. Druga część rozdziału wprowadza do modelowania kinematyki i dynamiki pociągu logistycznego. W przypadku modelowania dynamiki uwzględniono interakcję kół z podłożem,

przyjmując model kontaktu i tarcia uwzględniający zjawisko oporu toczenia, tarcia w warunkach poślizgu wzdłużnego lub/i poprzecznego. W trzeciej części rozdziału przedstawiono modele i metody sterowania układami wielocłonowymi w ujęciu klasycznym i z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej.

W drugim rozdziale przedstawiono genezę, cel i zakres rozprawy. Za cel pracy przyjęto opracowanie modelu matematycznego pociągu logistycznego z uwzględnieniem zjawisk dynamicznych oraz opracowanie algorytmów sterowania wspomaganych danymi pomiarowymi otrzymanymi z czujnika LIDAR, zapewniających bezkolizyjny przejazd pojazdu przez zamknięty korytarz transportowy.

Rozdział trzeci poświęcono opracowaniu modeli kinematyki pociągu logistycznego, potraktowanego jako otwarty łańcuch kinematycznego o  $n$ -członach (ciągnik i układ wózków) z  $k$ -ograniczeniami. Opracowano modele, w których uwzględniono dwa warianty konstrukcyjne ciągnika, tj. z napędzanymi różnicowo kołami tylnej osi i z napędzanym i sterowanym skrętnym przednim kołem oraz dwa warianty przyczep, tj. z układem stałego dyszla i z układem podwójnego Ackermanna. Opracowane modele kinematyki bazują na formalizmie równań prędkości i ograniczeń nieholonomicznych.

W rozdziale czwartym przedstawiono modele dynamiki dla układów opisanych szczegółowo w rozdziale trzecim. Do wyprowadzenia równań dynamiki zastosowano równania Lagrange'a, które uzupełniono o siły uogólnione wynikające z uwzględnienia siły kontaktowej i siły tarcia w punkcie styku koła z podłożem.

Rozdział piąty poświęcono opracowaniu autorskiego algorytmu sterowania pociągiem logistycznym bazującym na modelu kinematyki oraz modelach dynamiki. Algorytm sterowania opracowano z zastosowaniem regulatora PD (dla modelu kinematyki), dwustopniowego regulatora PID (dla modeli dynamiki) oraz sztucznych sieci neuronowych (dla modeli dynamiki). Zaproponowany algorytm umożliwia śledzenie zadanej trajektorii – określonej przez punkt referencyjny – realizowanej przez ciągnik i generuje wartości wielkości sterujących. Układ regulacji bazuje na uchybach położenia określonego punktu ciągnika oraz orientacji ciągnika w układzie odniesienia. W przypadku algorytmu sterowania bazującego na sztucznej sieci neuronowej dane dostarczane są z pomiarów z czujnika LIDAR, zamontowanego na ciągniku. Ponadto, algorytm sterowania zawiera procedurę wykrywania kolizji każdej jednostki pociągu z obrysem korytarza transportowego.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych, które wykonano w pakiecie komercyjnym Wolfram Mathematica. Przeprowadzono obliczenia według odpowiednich scenariuszów dla modelu kinematyki oraz dla modeli dynamiki pociągu

logistycznego zawierającego ciągnik i cztery wózki. W modelu kinematyki wykonano obliczenia według dwóch scenariuszy. W pierwszym, analizowano zachowanie pociągu logistycznego zawierających ciągnik z napędem tylnych kół oraz dwoma wariantami konstrukcyjnymi wózków, tj. z układem stałego dyszla oraz z układem podwójnego Ackermanna, który realizował trajektorię „po okręgu”. W wariacie drugim zastosowano ciągnik z napędem na przednie koło, który realizował trajektorię w postaci „ósemki”. W przypadku modeli dynamiki wykonano szerszą analizę. Najpierw dla pociągu z ciągnikiem z napędem tylnych kół oraz czterech wózków z układem stałego dyszla przeprowadzono analizę wpływu położenia kół swobodnie skrętnych na realizację trajektorii liniowej, a w dalszej części analizowano wpływ poślizgu poprzecznego kół. Analizę przeprowadzono według trzech scenariuszy. Według pierwszego, pociąg logistyczny składał się z ciągnika z napędem tylnych kół oraz czterech nieobciążonych lub obciążonych wózków z układem stałego dyszla i realizował trajektorię w postaci „eski”. W scenariuszu drugim, dla tego samego pociągu analizowano wpływ współczynnika tarcia poprzecznego podczas realizacji trajektorii w postaci odcinka prostoliniowego i ostrym zakrętem w lewo o kąt  $100^\circ$ . W scenariuszu trzecim dla pociągu zawierającego ciągnik z napędem tylnych kół i cztery wózki z układem podwójnego Ackermanna analizowano wpływ współczynnika tarcia poprzecznego na realizację trajektorii w postaci „ósemki”. Przeprowadzono również badania neuroewolucyjnego algorytmu sterowania do wytrenowania sztucznej sieci neuronowej do sterowania pociągiem logistycznym poruszającym się w korytarzu transportowym.

W rozdziale siódmym przeprowadzono badania eksperymentalne w celu weryfikacji zaproponowanych modeli i algorytmów.

W ostatnim, ósmym rozdziale, na podstawie przeprowadzonych eksperymentów oraz wyników obliczeń, sformułowano wnioski i przedstawiono kierunki dalszych prac.

Rozprawę kończy wykaz cytowanej literatury (186 pozycje).

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Niniejsza rozprawa doktorska jest rozwinięciem tematyki podjętej już przez Doktoranta podczas przygotowania pracy magisterskiej i której wyniki zostały opublikowane w postaci artykułu naukowego: Paszkowiak W., Bartkowiak T., Pelic M.: Kinematic model of multiple trailers on a tractor system for production logistics applications, Archives of Mechanical Technology and Materials, T. 39, No.1, pp. 16-25, 2019.

Na podstawie badań przeprowadzonych w trakcie przygotowania pracy magisterskiej Doktorant słusznie zauważył ograniczenia w zakresie sterowania bazującym na modelu kinematyki. To skłoniło go do rozszerzenia rozważań o modele dynamiki, uwzględniające zjawisko kontaktu oraz tarcia koło-podłoże i opracowania nowych, autorskich algorytmów sterowania, które zawarł w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Ponadto, na podstawie gruntownego przeglądu literatury, Doktorant wykazał ważność i aktualność tematyki podjętej w rozprawie doktorskiej.

Uważam, że temat badawczy podjęty przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej jest **oryginalny, aktualny i wpisuje się w dyscyplinę naukową Inżynieria mechaniczna.**

Zdaniem recenzenta pewnym mankamentem recenzowanej rozprawy jest brak tezy naukowej. Ma ona istotne znaczenie w ocenie rozprawy doktorskiej, ponieważ wyznacza kierunek i zakres badań, które Doktorant powinien przeprowadzić, by udowodnić słuszność postawionej tezy lub weryfikacji trafności hipotezy badawczej. Jest również wyznacznikiem wysiłku intelektualnego, który Doktorant wkłada w przygotowanie rozprawy.

Powyższy mankament w pewnym stopniu rekompensują trzy cele naukowe rozprawy jasno sformułowane w podrozdziale 2.2 oraz szczegółowy zakres rozprawy podany w 19 punktach.

W rozdziale trzecim Doktorant w zwięzły i czytelny sposób przedstawił model kinematyki dla każdego podukładu pociągu logistycznego, dla których zdefiniował macierze transformacji prędkości oraz macierze ograniczeń. Według wiedzy recenzenta takie podejście jest oryginalne i nie jest stosowane w literaturze.

W rozdziale czwartym Doktorant wyprowadził modele dynamiki pociągu logistycznego uwzględniające zjawisko kontaktu oraz tarcie koła o podłoże. Wyprowadzenie tych modeli poprzedza, świadomie przyjęcie założeń upraszczających.

W rozdziale piątym Doktorant przedstawia algorytmy sterowania wykorzystujące regulator PD dla modelu kinematyki oraz regulator PID dla modeli dynamiki. Brakuje jednak uzasadnienia dlaczego używa różnych regulatorów dla tych modeli. Brakuje również uzasadnienia przyjęcia różnych punktów, dla których wyznaczany jest uchyb położenia i orientacji. W przypadku pierwszego wariantu z ciągnikiem z napędem tylnych kół jest to punkt  $B_0$ , a w przypadku drugiego wariantu z ciągnikiem z napędem na przednie koło jest to punkt  $A_0$ .

Rozdziały szósty oraz siódmy stanowią najistotniejszą część rozprawy. W rozdziale szóstym Doktorant bazując na modelu kinematyki pociągu logistycznego wykazał, że

rozwiązanie konstrukcyjne wózków mają istotne znaczenie na powtarzalność realizowanej trajektorii. Powtarzalność jest najlepsza dla konstrukcji z układem podwójnego Ackermanna. Brakuje jednak porównania wpływu występowania wariantów ciągnika na powtarzalność określonej trajektorii. Jako miarę powtarzalności trajektorii Doktorant przyjmuje odległość środków geometrycznych przyczep – punkt  $P_i$  względem środka pierwszej przyczepy. Dla lepszego zrozumienia można było zamieścić ten punkt na rysunku. Zdaniem recenzenta wózki powinny poruszać się możliwie najbliżej trajektorii charakterystycznego punktu ciągnika tzn. na przykład punktu  $B_0$ .

Porównując wyniki przeprowadzonych symulacji modeli dynamiki pociągu logistycznego nasuwa się pytanie, dlaczego przyjęto różne wartości masy ciągnika w modelach dynamiki (700 kg – tab. 6.3, str. 133 oraz tab. 6.6, str. 140, tab. 6.7, str. 143; 250 kg – tab. 6.8, str. 145; w eksperymencie 300 kg – str. 150<sup>3</sup>). Podobna uwaga dotyczy wartości masy wózków nieobciążonych (238 kg – tab. 6.3, str. 133, tab. 6.7, str. 143, tab. 7.1, str. 154; 20 kg – str. 135<sup>1</sup>; 50 kg – tab. 6.8, str. 145; w eksperymencie 304 kg oraz 307 kg – str. 150<sup>3</sup>) oraz zakresu i inkrementacji wartości współczynników tarcia poprzecznego (str. 139<sup>10</sup> i str. 142<sup>13</sup>).

W warunkach początkowych przyjęto ujemne wartości prędkości  $\dot{x}^P$  (wzór (6.14) oraz (6.18)).

Bardzo pozytywnym aspektem opiniowanej rozprawy doktorskiej jest udostępnienie kodów źródłowych programów opracowanych przez Doktoranta, które można analizować *online* na podanej stronie internetowej.

Na pozytywną ocenę zasługuje niewątpliwie przeprowadzenie badań eksperymentalnych pociągu logistycznego w celu weryfikacji zaproponowanych przez Doktoranta modelu kinematyki i modeli dynamiki. Przedstawione w rozdziale siódmym rozprawy charakterystyki porównawcze badanych wariantów modeli zdaniem Doktoranta są wystarczające, aby stwierdzić, że opracowane modele są adekwatne do rzeczywistości. Wątpliwości recenzenta w tej kwestii wynikają z faktu, iż Doktorant całkowicie pominął w rozprawie problem określenia błędów pomiarów oraz niepewności wyników pomiaru, ograniczając się do zdawkowego i nieudowodnionego stwierdzenie str. 185<sup>5</sup> „*głównym źródłem obserwowanych odchyłek nie jest jakość opracowanych modeli, lecz niedokładności związane z pomiarem*”. Szkoda, że nie podjęto żadnych prób zbadania powtarzalności wyników pomiarów eksperymentalnych, powtarzając choćby trzykrotnie eksperymentalne przejazdy badanych wariantów pociągu logistycznego, aby następnie uśrednić wyniki pomiarów, zbadać rozrzuty i oszacować niepewności wyników.

Podsumowując, do najważniejszych osiągnięć recenzowanej rozprawy zaliczam:

1. opracowanie autorskich modeli matematycznych pociągu logistycznego o złożonej strukturze kinematycznej, uwzględniających różne zjawiska dynamiczne,
2. opracowanie metody wyznaczania macierzy transformacji prędkości,
3. zaproponowanie oryginalnego, autorskiego algorytmu sterowania umożliwiającego śledzenie zadanej trajektorii,
4. zaprojektowanie i zbudowanie pociągu logistycznego, umożliwiającego weryfikację opracowanych modeli i algorytmów.

Podsumowując, uważam, że rozprawę cechuje dobry poziom naukowy a wyniki, które Doktorant przedstawił mają **dużą wartość poznawczą**. Opracowane modele matematyczne oraz algorytmy mają **walory aplikacyjne** i mogą być podstawą do zastąpienia sterowania manualnego pociągiem logistycznym w warunkach transportu wewnątrzzakładowego sterowaniem automatycznym.

#### 4. Uwagi i pytania do rozprawy

1. Czym Doktorant argumentuje użycie różnych regulatorów w sterowaniu z użyciem modelu kinematyki i modeli dynamiki?
2. Czym Doktorat uzasadnia pominięcie składnika całkującego regulatora w algorytmie sterującym bazującym na modelu kinematyki?
3. Czym Doktorant uzasadnia przyjęcia różnych punktów, określających uchyb położenia i orientacji dla wariantów ciągnika?
4. Czym Doktorant uzasadnia wybór punktu  $P_1$  do oceny powtarzalności realizowania zadanej trajektorii?
5. W jaki sposób zostały wyznaczone masowe momenty bezwładności ciągnika oraz wózków?
6. Doktorant pisze na str. 124<sub>2</sub> „Zastosowane nastawy regulatora PD dobrano eksperymentalnie w taki sposób, aby zapewnić wysoką jakość śledzenia trajektorii przez ciągnik”. Jaki zakres nastaw przyjęto do eksperymentu? Jakie kryterium oceny przyjęto? W jaki sposób przyjęto nastawy do regulatora PID?
7. Jaki zestaw danych został użyty do wytrenowania sztucznej sieci neuronowej?
8. Jaki jest czas obliczeń dla modelu kinematyki oraz modeli dynamiki?
9. Z jaką dokładnością otrzymywano dane pomiarowe z czujnika LIDAR?

## 5. Ocena redakcyjna i edycyjna rozprawy

Uważam, że recenzowana rozprawa została zredagowana w sposób właściwy dla rozpraw doktorskich z zakresu nauk technicznych z odpowiednim podziałem na rozdziały przy zachowaniu logiki wyводу. Używany przez Doktoranta język jest precyzyjny i zrozumiały. **Zachowano ciągłość rozumowania i sformułowano logiczne wnioski.**

Stronę edycyjną rozprawy, a w szczególności koncepcję i wykonanie rysunków – poza bardzo nielicznymi uchybieniami, które jednak są nieuniknione przy tak obszernej pracy – **można uznać za wzorcowe.**

Poniżej zestawiono kilka propozycji, które mogłyby zdaniem recenzenta poprawić strukturę i czytelność rozprawy.

1. Czytelność wzorów poprawiłoby używanie różnych rodzajów nawiasów w kolejności:  $\{[( )]\}$ .
2. Interpretacja równań (3.8), (3.23) i (3.36) była ułatwiona, gdyby z wektorami pozycji zawartymi po prawej stronie tych równań a określającymi lokalną pozycję charakterystycznych punktów ciągników oraz wózków, związane były lokalne układy współrzędnych na rys. 3.3, 3.7 i 3.11.
3. W pracy występują powtórzenia dużej części tekstu oraz wzorów: str. 76<sup>4-14</sup> ze str. 87<sup>10-20</sup>, str. 79<sup>1-17</sup> ze str. 92<sub>4-1</sub> i str. 93<sup>1-13</sup>, str. 81<sub>7-1</sub> i str. 82<sup>1-10</sup> ze str. 96<sup>7-23</sup>, str. 79<sub>11-1</sub> i str. 80<sup>1-9</sup> ze str. 99<sub>10-1</sub> i str. 100<sup>1-9</sup>.

W tekście rozprawy zauważono następujące nieliczne błędy literowe, interpunkcyjne i drobne usterki:

1. str. 55 – wzór (3.4) i (3.55). Prawa strona wzoru jest macierzą zerową. Zero powinno być pogrubione.
2. symbol "d" w wyrażeniach różniczkowania nie jest zmienną a działaniem, dlatego nie powinien być pisany kursywą, tj.  $\frac{d}{dt}(\ )$  - wzory (4.2), (4.41)
3. brak transpozycji w zapisie wektorów we wzorach: (6.2), (6.4), (6.11), (6.13), (6.15), (6.17), (6.20), (6.22), (A.23), (A.24), (A.35), (A.36), (A.48), (A.49) .
4. str. 130 – błędne opisy rys. 6.9 - 6.10. Jest: ciągnik DDT. Ma być: ciągnik TTFS. Dotyczy to również tekstu str.130<sup>1</sup>.
5. błędne wartości masy kół tylnych ciągnika. str. 133, tab. 6.3.

6. błędna jednostka przyspieszenia ziemskiego: str. 10<sup>10</sup>; str. 133, tab. 6.3; str. 136, tab. 6.5; str. 140, tab. 6.6; str. 143, tab. 6.7; str. 154, tab. 7.1 – Jest: N/s<sup>2</sup>. Ma być: m/s<sup>2</sup>

Wykaz literatury został przygotowany właściwie z zachowaniem standardów prac naukowych. Wszystkie wyszczególnione w nim pozycje zostały zacytowane w tekście rozprawy.

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy

W opiniowanej rozprawie Doktorant przedstawił oryginalne autorskie rozwiązanie problemu naukowego, co świadczy o tym, że potrafi samodzielnie formułować i rozwiązywać problemy badawcze. Wykazał się przy tym odpowiednią wiedzą teoretyczną, umiejętnościami w zakresie opracowywania modeli matematycznych pociągu logistycznego, przeprowadzania obliczeń numerycznych i przygotowania eksperymentu.

Rozprawę mgr. inż. Wojciecha Paszkowiaka zatytułowaną „*Kinematyka i dynamika autonomicznego pociągu logistycznego*” **oceniam pozytywnie**. Uważam, że w **wystarczającym stopniu spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim** określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 1668 z późn. zm.).

**Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony** przed Radą Dyscypliny Inżynieria mechaniczna Politechniki Poznańskiej.

