

Szczecin 17.09.2025

Prof. dr hab. inż. Mirosław Pajor  
Wydział Mechatroniki i Elektrotechniki  
Politechnika Morska w Szczecinie  
Ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin

## **Recenzja pracy doktorskiej pt. ” Kinematyka i dynamika automatycznego pociągu logistycznego” autorstwa mgr inż. Wojciecha Paszkowiaka.**

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia DIM.075.190.2025 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego prof. PP z dnia 20.06.2025.

### **Przedstawienie treści pracy**

Robotyzacja procesów produkcyjnych to powszechnie widoczny trend w transformacji przemysłu. Proces ten jest silnie powiązany z postulatem cyfryzacji produkcji, który zakłada czwarta rewolucja przemysłowa. Szeroko pojęta robotyzacja i automatyzacja obejmuje coraz szersze obszary aktywności człowieka. Ważnym obszarem robotyzacji, obok zagadnień manipulacji elementami procesu produkcyjnego w przestrzeni roboczej maszyn, jest transport wewnętrzny w systemach produkcyjnych, czyli tzw. intralogistyka. Podejmuje się liczne próby wdrożenia wielu rozwiązań zautomatyzowanych w obszarze szeroko pojętego transportu wewnętrznego i obsługi magazynowej. Budowane są coraz bardziej zaawansowane rozwiązania transportowych robotów mobilnych. Ważnym aspektem jest tutaj autonomiczność działania tego typu urządzeń. Na rynku dostępne są już roboty mobilne typu AGV/AMR pracujące w zmiennym otoczeniu z uwzględnieniem obecności w nim człowieka. Szacuje się, że ten obszar robotyzacji procesów produkcyjnych jest obecnie, i będzie w przyszłości, obszarem o największej dynamice rozwoju. Podejmowane są liczne prace nad zwiększeniem efektywności działania transportu opartego o roboty AGV poprzez rozwój koncepcji automatycznych pociągów logistycznych. Rozwój tej technologii wymaga zaawansowanych badań z dziedziny modelowania, sterowania oraz sensoryki i analizy

danych w czasie rzeczywistym. Badania tego typu często wykorzystują najnowsze osiągnięcia informatyki jakim jest algorytmy sztucznej inteligencji.

W tej tematyce realizowana jest rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Paszkowiaka. Autor przeprowadził bardzo obszerną analizę problemów badawczych jakie występują w pracach nad wdrażaniem autonomicznych pociągów logistycznych, które zwiększają wydajność zautomatyzowanego, wewnętrznego systemu transportu w systemie produkcyjnym. Na tej podstawie zaprojektował szereg własnych oryginalnych rozwiązań w tym obszarze. Autor zbudował zaawansowane, wielowymiarowe modele opisujące kinematykę i dynamikę ruchu urządzeń typu autonomiczny pociąg logistyczny, z zastosowaniem których zrealizował obszerne badania symulacyjne ich działania w różnych warunkach charakteryzujących otoczenie zewnętrzne oraz parametry konstrukcyjne urządzenia. Ponadto opracowano układ sterowania i programowania ruchu tego typu konstrukcji, również z zastosowaniem algorytmów klasyfikowanych jako sztuczna inteligencja. Autor przeprowadził następnie szereg badań eksperymentalnych na rzeczywistej konstrukcji pociągu logistycznego, których celem było ocena dokładności i efektywności modeli symulacyjnych umożliwiając programowanie i symulację działania pociągu z zastosowaniem technologii cyfrowego bliźniaka.

Opiniowana praca doktorska jest napisana w języku polskim i liczy 202 strony i 15 stron załączników oraz obszerne cyfrowe repozytorium udostępnione w formie zasobu internetowego. Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykazu ważniejszych oznaczeń. W załącznikach Autor dołączył opis rozszerzonego dynamicznego modelu pociągu logistycznego o oznaczeniu DM-EXT, w którym zaimplementowano rozbudowany model tarcia. Ponadto rozprawa zawiera spis źródeł literaturowych obejmujący 186 cytowanych pozycje literaturowe. Dobór źródeł jest prawidłowy, zawiera najnowsze pozycje literaturowe i nie budzi zastrzeżeń. Autor przeanalizował dostępne źródła i wyciągnął poprawne wnioski podsumowujące stan wiedzy. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: przegląd stanu wiedzy, uzasadnienie celowości badań oraz pięć rozdziałów merytorycznych zakończonych rozdziałem końcowym z wnioskami krytycznymi i omówieniem perspektyw dalszych badań.

W pierwszych rozdziale rozprawy Autor wprowadza w tematykę wdrażania rozwiązań typu pociągi logistyczne, prezentując problemy powiązane z tego typu autonomicznymi pojazdami i dotychczas realizowane badania w tych obszarach.

Prezentowane są rozwiązania konstrukcyjne, stosowane techniki modelowania, problemy z modelowaniem interakcji z podłożem oraz zagadnienia sterowania.

W rozdziale drugim Autor zaprezentował genezę, cele i zakres realizowanej pracy. Nie została jawnie sformułowana hipoteza badawcza, która pośrednio wynika z przyjętego celu pracy – jednak uważam, że korzystniej byłoby w rozprawie naukowej tego typu wyraźnie sformułować hipotezę badawczą. Postawione cele są ambitne a zakres planowanych działań adekwatny do założonego celu.

W rozdziale trzecim Autor przedstawia model kinematyczny pociągu logistycznego. Prezentowany jest model ciągnika w kilku wariantach napędu. Ponadto Autor przedstawia modele przyczep w wariacie z układem stałego dyszla oraz w wariacie z układem podwójnego Ackermanna.

W rozdziale czwartym Autor zaprezentował modele dynamiczne pociągu logistycznego. Zaprezentowano szczegółowo technikę modelowania tego typu obiektów. Zastosowano generalnie dwa podejścia, uproszczone bazujące na przyjęciu więzów nieholonomicznych, zakładających brak poślizgów bocznych i wzdłużnych, czyli tzw. dryftu i buksowania kół jezdnych. W drugim rozwiązaniu uwzględniono zjawiska tarcia kół o podłoże wprowadzając do modelu możliwość poślizgów bocznych i wzdłużnych.

W rozdziale piątym Autor opisał algorytmy sterowania pociągiem logistycznym. Skupiono się na algorytmach, w których zakłada się śledzenie trajektorii jedynie przez ciągnik pociągu logistycznego. Ponadto zaprezentowano autorskie rozwiązanie neuroewolucyjnego algorytmu sterowania pociągiem logistycznym bazującego na sieciach neuronowych uczonych z zastosowaniem algorytmów genetycznych.

W szóstym, kluczowym rozdziale pracy Autor przedstawił wyniki bardzo obszernych badań symulacyjnych. Zaprezentowano rozbudowany, wielowariantowy plan badań. W pierwszej części zrealizowano badania symulacyjne z zastosowaniem modelu kinematycznego. Następnie Autor przedstawił wyniki badań symulacyjnych, których celem była analiza wpływu kół swobodnie skrętnych. W kolejnych podrozdziałach zaprezentowano symulacje dla modelu dynamiki, w których analizowano poślizg poprzeczny przyczep pociągu logistycznego. Następnie Autor zaprezentował badania symulacyjne procedur sterowania pociągiem logistycznym ze szczególnym uwzględnieniem opracowanego algorytmu neuroewolucyjnego. Ponadto Autor w rozdziale szóstym zaprezentował analizę porównawczą metod wyznaczania macierzy jacobianowej prędkości. Rozszerzone wyniki symulacji numerycznych wraz z modelami Autor zamieścił w cyfrowym repozytorium.

W rozdziale siódmym zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych rzeczywistego pociągu logistycznego. Autor przedstawił konstrukcję ciągnika i przyczep pociągu logistycznego, który został zastosowany w badaniach eksperymentalnych. Następnie zaprezentował wyniki badań eksperymentalnych, które posłużyły do walidacji dokładności opracowanych modeli symulacyjnych.

W ostatnim rozdziale ósmym Autor dokonał podsumowania rezultatów pracy i przedstawił wnioski końcowej oceny uzyskanych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Ponadto przedstawiono plany dalszych działań nad rozwojem technik modelowania automatycznego pociągu logistycznego.

Podsumowując należy stwierdzić, że na podstawie zaprezentowanej analizy wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych Autor rozwiązał postawiony problem naukowy i wykazał skuteczność działania opracowanej modli symulacyjnych do planowania trajektorii ruchu pociągu logistycznego.

## **1. Oryginalne osiągnięcia pracy**

Praca doktorska Pana Wojciecha Paszkowiaka jest bardzo obszerna, multidyscyplinarna i ma bardzo duży poziom innowacyjności. Autor rozwiązuje szereg problemów multidyscyplinarnych z zakresu robotyki mobilnej, technik modelowania (zgodnie z koncepcją cyfrowych bliźniaków), inżynierii mechanicznej, automatyki i technologii informatycznych. Autor posiada dużą wiedzę w zakresie technik modelowania układów mobilnych oraz w dziedzinie sterowania i nowoczesnych technologii informatycznych (sztuczna inteligencja). Ponadto Autor posiada dużą biegłość w prowadzeniu badań eksperymentalnych. Autor przeprowadził bardzo dużą ilość symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych, których wyniki posłużyły do walidacji opracowanych modeli. Wyniki pracy badawczej mgr inż. Wojciecha Paszkowiaka dostarczają innowacyjnego narzędzia do wspomagania procesów sterowania i planowania trajektorii ruchu pociągów logistycznych. Zaplanowane zadania Autor zrealizował konsekwentnie, a uzyskane rezultaty poddał stosownej analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Opracowane wyniki badań symulacyjnych, różnych wariantów konstrukcyjnych pociągów logistycznych (różne napędy ciągników oraz różne warianty konstrukcyjne łączenia wagonów) z zastosowaniem wielowariantowych modeli kinematycznych i dynamicznych o różnym

poziomie złożoności. Symulacje zrealizowano w nowoczesnych środowiskach do modelowania numerycznego. Wyniki symulacji wraz z modelami upubliczniono w cyfrowym repozytorium. Działania te stanowią etap budowy cyfrowego bliźniaka dla elementu systemu produkcyjnego jakim jest pociąg logistyczny. Wyniki tych symulacji stanowią kompendium wiedzy na temat samych technik modelowania tego typu pojazdów mobilnych oraz są efektywnym narzędziem do planowania trajektorii ruchu pociągów logistycznych z uwzględnieniem wielu zmiennych środowiskowych.

2. Opracowane oryginalne procedury sterowania pociągiem logistycznym, bazujące na sztucznej inteligencji. Zastosowano neuroewolucyjny algorytm sterowania pociągiem logistycznym bazującego na sieciach neuronowych uczonych z zastosowaniem algorytmów genetycznych. Wykazano dużą efektywność planowania trajektorii bezkolizyjnej z zastosowaniem opracowanych algorytmów.
3. Opracowane wyniki badań eksperymentalnych dla wybranych wariantów konstrukcyjnych pociągu logistycznego. Badania te posłużyły walidacji opracowanych modeli symulacyjnych. Przeprowadzona pogłębiona analiza porównawcza wyników symulacji z pomiarami eksperymentalnymi umożliwia gruntowną ocenę zaproponowanych technik modelowania.

Jestem pod dużym wrażeniem bardzo szerokiego zakresu zrealizowanych badań symulacyjnych. Jednocześnie bardzo wysoko oceniam oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy wymienionych osiągnięć.

### **3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Na str. 72 i 73, w równaniach 3.51 i 3.52, Autor użył funkcji jednoargumentowej  $\arctan$  do wyznaczania kątów skręcenia kół. Czy równania te są uniwersalne dla wszystkich przedziałów zmienności (ćwiartek) kąta skręcenia kół? Czy nie należało użyć dwuargumentowej funkcji  $\arctan$ ?
2. W rozdziale trzecim opisano model kinematyczny zakładający brak poślizgów bocznych (dryftu) i wzdłużnych (boksowania) kół. Jednak w przyjętych więzach nieholonomicznych, opisanych macierzą jacobianową, uwzględniono tylko

ograniczenia (więzy) narzucone na liniowe prędkości wybrane punkty ramy związane z osią tylną i kołami przednimi. Czy w macierzy jacobianowej nie powinny znaleźć się również ograniczenia wymagające zerowania się prędkości w styku kół z podłożem?

3. Na str. 90, w rozdz. 4.3.2.1 w czwartym podpunkcie Autor stwierdza, że siły reakcji podłoża w kierunku pionowym są obliczane na podstawie wyrażen wynikających ze statycznej równowagi danej jednostki. Takie założenie jest w pełni słuszne dla układu z trzema kołami (statycznie wyznaczalnego). Jak należy rozumieć to założenie, gdy mamy cztery koła, a układ staje się statycznie niewyznaczalny? W dalszej części pracy na str.105 Autor podaje układ równań 4.102, które wyrażają stan równowagi statycznej dla przyczepy czteroślowej. Pierwsze trzy z nich są zrozumiałe. Jaka jest geneza czwartego równania?
4. Na str. 139 i 142 w Scenariuszu 2 i 3 zaproponowano przyjęcie współczynnika tarcia poprzecznego  $\mu_{y,max}$  z przedziału od 1 do 0,4. Czy tak wysoka wartość dochodząca do 1, świadcząca o tym, że siła tarcia będzie równa sile nacisku, są uzasadnione? Czy jest to fizycznie realizowalne?
5. Na str. 148 Autor podaje, że wyznacza jacobian na dwa sposoby, metodą A i B i metody te porównuje. Z literatury poprzednich rozdziałów wynika, że jacobiany prędkości są wyznaczane analitycznie, a stosowne wzory zostały zaprezentowane w pracy. Na czym zatem polega metoda B? Zaznaczę, że te działania nie zostały ujęte we wcześniej prezentowanych celach pracy.
6. Na str. 149 Autor stwierdza, że dla potrzeb badań doświadczalnych zaprojektowano i wykonano rzeczywisty pociąg logistyczny. Czy te działania były elementem pracy i czy Autor samodzielnie zrealizował te działania? Czy też skorzystano z gotowego rozwiązania?
7. W opisie badań eksperymentalnych zamieszczonych na str. 154 nie do końca opisano parametry przyjętej trajektorii ruchu pociągu logistycznego w badaniach eksperymentalnych. Proszę o podanie więcej szczegółów, jaka jest geometria tej trajektorii i z czego ona wynika.
8. Na str. 172 oraz 186, Autor zamieścił dość niefortunne stwierdzenie, że mierzone odchyłki od zadanej trajektorii to wynik niedokładności pomiaru. Takie stwierdzenie podważa sens całego eksperymentu. Jeżeli błędy pomiaru są większe od rzeczywistych błędów trajektorii to wyniki pomiarów błędów są położone w przedziale

niepewności pomiarowej, zatem są fikcją. Czy mogę prosić o komentarz do tego stwierdzenia.

9. Na str. 179 do 181 analizowane są błędy orientacji w modelowaniu trajektorii ruchu wózków pociągu logistycznego. Czy można wyjaśnić, dlaczego błąd orientacji wózka 1 i 2 jest zdecydowanie większy od błędu wózka 3 i 4? Logicznym wydaje się, że z uwagi na kumulację błędów obliczeń powinno być na odwrót. Z kolei na str. 183 do 185 analizowane są błędy pozycji w modelowaniu trajektorii ruchu wózków pociągu logistycznego. W tym przypadku, dla dyszla z przodu, jest podobnie jak w błędach orientacji, 1 i 2 większy błąd, 3 i 4 mniejszy błąd. Natomiast dla dyszla odwróconego jest inaczej (odwrotnie), wózki 1 i 2 są dokładniej odwzorowane w modelu, a 3 i 4 mają większy błąd. Czy można to jakoś logicznie wytłumaczyć?

Ponadto porównując model kinematyczny KM z modelami z uwzględnieniem tarcia, nie widać wyraźnej poprawy dokładności odwzorowania trajektorii, wręcz niekiedy jest nieco gorzej. Proszę o skomentowanie tego, bo to sugeruje, że model kinematyczny jest wystarczający – po co zatem komplikować model jak nie uzyskuję się wyraźnej poprawy dokładności.

10. Na str. 189 wniosek IX nie jest w pełni uzasadniony. Wiąże się to bezpośrednio z uwagą nr 9 (jej druga część).

Tekst pracy został napisany bardzo starannie, część edytorska pracy jest na wysokim poziomie. Zamieszczone w pracy rysunki i wykresy są na wysokim poziomie edytorskim i bardzo dobrze ilustrują prezentowane treści. W trakcie czytania pracy zauważyłem następujące błędy edycyjne:

1. Na str. 27 i 30 w równaniu 1.2 i 1.8  $A(q).q=0$ , co oznacza kropka pomiędzy macierzą a wektorem prędkości, czy to jakiś operator?
2. Str. 28, równanie 1.4, zero powinno być pogrubione, bo jest to macierz. Podobnie na str.55 w równaniach 3.4 i 3.5.
3. Str. 37, opis nad wzorem 1.22, jest definiuje -> powinno być definiowany.
4. Str. 60, opis pod wzorem 3.20, jest  $x,y,\beta_0$  -> powinno być z kropkami, bo to prędkości.
5. Autor wielokrotnie powtarza wzory i równania, które były zamieszczone wcześniej w treści pracy. Dotyczy to równań 3.3, 3.4, 4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7, 4.10-4.14, 4.25-4.27, 4.32-4.33, 4.40-4.46, 4.57-4.59, 4.69-4.72, 4.78-4.81, 4.83, 4.85-4.87, 4.96-4.98.

Należy zdecydowanie unikać powtórzeń, a w recenzowanej rozprawie powtarzanie równań wraz z opisami pojawia się to nader często.

#### **4. Podsumowanie**

**Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).** Zrealizowana przez mgr. inż. Wojciecha Paszkowiaka praca charakteryzuje się wysokim poziomem innowacyjności w obszarze wdrażania technologii cyfrowych bliźniaków do budowy modeli symulacyjnych zaawansowanych obiektów mechatronicznych oraz ma duży potencjał wdrożeniowy. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu badawczego, wnosi nową wiedzę w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz wskazuje na duży poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. **Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Ponadto, pragnę zwrócić uwagę, że zrealizowane badania symulacyjne są bardzo obszerne i wskazują na ogromny nakład pracy jaki wykonał Autor. Wyniki symulacji zostały poddane walidacji eksperymentalnej. Bardzo cenną inicjatywą jest ich zamieszczenie w dostępnym cyfrowym repozytorium. Uważam, że opracowane zaawansowane modele, procedury ich rozwiązywania w środowisku Python i Wolfram Mathematica oraz opracowane analitycznie wyniki symulacji stanowią bardzo cenne kompendium wiedzy w zakresie projektowania i programowania trajektorii ruchu robotów mobilnych klasy pociąg logistyczny. Z uwagi na powyższe będę wnioskował do Rady Dyscypliny o **wyróżnienie pracy.**