

5 września 2025r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgra inż. Tomasza Jacka Krakówki

pt.

„DOBÓR PARAMETRÓW MANIPULATORÓW ROBOTÓW PRZENOŚNYCH NA PODSTAWIE TECHNIK PROJEKTOWANIA TOPOLOGICZNEGO”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Pana dr hab. inż. Stanisława Kachela, profesora uczelni - Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej na podstawie uchwały nr 51/RDN IM/2025 z dnia 30.05.2025 r.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedmiotem przedstawionej do zaopiniowania rozprawy doktorskiej jest opracowanie metody doboru parametrów manipulatorów przenośnych robotów mobilnych przeznaczonych do zadań specjalnych (wojskowych, antyterrorystycznych, ratowniczych). Motywem naukowym jest zauważalna luka w literaturze dotyczącej definiowania obciążeń i parametrów projektowych dla lekkich manipulatorów tych robotów wykonujących zadania dotyczące utylizacji materiałów wybuchowych (EOD) czy też pobieranie próbek lub wykonywanie pomiarów przy użyciu czujników (CBRN). Tego typu roboty wymagają szczególnego podejścia, a ich rozwiązania nie mogą być zaczerpnięte wprost z rozwiązań przemysłowych.

Autor wskazuje na braki w literaturze dotyczące opracowania metodyki projektowania lekkich manipulatorów przenośnych odpornych na obciążenia dynamiczne, typowe dla misji EOD czy CBRN. Dotychczasowe rozwiązania przemysłowe nie przenoszą się wprost na te zastosowania ze względu na odmienne priorytety, tu kluczowe są: udźwig przy niskiej masie, stabilność i odporność na kolizje, a mniej ważna jest np. powtarzalność czy prędkość.

Zaproponowana przez Autora metoda łączy podejście systemowe *top-down* (analiza wymagań, architektura systemu) z modułowością oraz elementami *bottom-up* (wybór komponentów z biblioteki rozwiązań). W pierwszym etapie formułowane są funkcje celu i ograniczenia wynikające z wymaganych zdolności roboczych (wysięg, udźwig, udźwig na maksymalnym wysięgu, stosunek udźwigu do masy, możliwości sięgania do specyficznych miejsc). Parametry manipulatora – długości członów i dobór przegubów – optymalizowane są wielokryterialnie algorytmem ewolucyjnym NSGA-II, dla trzech funkcji dopasowania

wybijającej maksymalizacji udźwigu manipulatora. Kolejny etap to analityczno-eksperymentalne wyznaczanie obciążeń – zarówno osiowych, jak i promieniowych – dla konfiguracji generujących największe siły w warunkach granicznych wynikających z maksymalizacji udźwigu, w tym uwzględniające kolizje, podpieranie robota czy użycie narzędzi pirotechnicznych. Ostatnia faza to optymalizacja topologiczna wybranych komponentów z uwzględnieniem przestrzeni pasywnej, wielu przypadków obciążeń oraz ograniczeń technologicznych ich produkcji. Wynikiem tej fazy jest dokumentacja konstrukcyjna gotowa do wdrożenia.

Walidacja autorskiej metodyki odbyła się na przykładzie platformy manipulatora robota PIAP Patrol, dla którego uzyskano redukcję masy wybranych korpusów przegubów do 38%, poprawę współczynnika bezpieczeństwa i zachowanie wymaganych zdolności roboczych. Badania potwierdziły też, że wystarczy rozpatrywać cztery reprezentatywne przypadki obciążeń przy optymalizacji topologicznej, aby skrócić czas obliczeń i projektowanie manipulatora.

Z naukowego punktu widzenia praca integruje kilka nurtów – optymalizację wielokryterialną, analizę mechanizmów, modelowanie MES i optymalizację topologiczną – w procedurę dostosowaną do specyfiki przenośnych robotów specjalnych. Praca ta zgodna z trendami w światowej literaturze, gdzie rośnie znaczenie projektowania *mission-oriented* oraz *design for manufacturing*, ale idzie dalej, bo obejmuje pełen łańcuch: od wymagań operacyjnych, przez konstrukcję, po przygotowanie geometrii do produkcji.

Na podstawie przedstawionej charakterystyki rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że Doktorant dobrze dobrał temat rozprawy, a przede wszystkim cenne jej praktyczne zastosowanie i walidacja w realnym robocie mobilnym. Sprawia to, że oceniana rozprawa doktorska ma niewątpliwie aspekt naukowy i jest dobrze osadzona w aktualnych badaniach naukowych. Stanowi ono solidną bazę dla przyszłych prac nad rozwojem efektywnych, adaptacyjnych manipulatorów w zastosowaniach wojskowych, ratowniczych i przemysłowych.

2. Zawartość pracy i układ rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy i oryginalność tematu

Oceniana rozprawa została opracowana na Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego pod kierunkiem promotora dra hab. inż. Andrzeja Typiaka, profesora WAT oraz promotora pomocniczego i opiekuna dra inż. Macieja Cadera, koncentrując się na nowatorskim podejściu do projektowania manipulatorów mobilnych z wykorzystaniem topologicznej optymalizacji struktur mechanicznych.

Rozprawa jest logicznie skonstruowana: obejmuje 9 zasadniczych numerowanych rozdziałów, od wstępu i analizy parametrów manipulatorów, przez przegląd literatury i technik projektowych, aż po badania własne, implementację autorskiej metody i podsumowanie. Czytelny podział pozwala prześledzić proces badawczy krok po kroku, a treść każdego rozdziału przyczynia się do realizacji głównego celu pracy, którą opisano na 157 stronach. Ponadto praca zawiera bardzo obszerny i aktualny przegląd literatury: 142 pozycje, z czego 59% to publikacje po 2015 roku, w tym liczne z lat 2020–2024, co świadczy o aktualności źródeł i ich powiązaniu z najnowszym stanem badań. Autor cytuje kluczowe prace z dziedziny optymalizacji, inżynierii mechanicznej i robotyki, a na całość bibliografii składają się dwie publikacje własne. Odwołania do prac promotora dra hab. inż. Andrzeja Typiaka, prof. WAT, pojawiają się w sumie w 11 miejscach – zarówno jako cytowania bezpośrednie, jak i we współautorstwie, ale nie

dominują ani nie wypaczają przeglądu literatury. Odwołania w pracy są spójne ze spisem treści i wykazem literatury — nie wykryto brakujących cytowań lub niespójności numeracji. Na końcu pracy znajduje się bibliografia oraz spis rysunków i tabel.

Rozdział 3 jest najobszerniejszy pod względem treści i dotyczy analizy zagadnień w obszarze projektowania i metod optymalizacji manipulatorów robotów przenośnych, który wskazuje na występowanie luki badawczej wynikającej z obszernej analizy literatury i przeglądu metod — brak metodyki projektowania manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych z uwzględnieniem rzeczywistych przypadków obciążeń. Na podstawie tego rozdziału został sformułowany cel i zakres pracy - przedstawiony w rozdziale 4., w którym Doktorant wskazuje jednoznacznie: *opracowanie metody doboru parametrów projektowych umożliwiającej projektowanie lekkich manipulatorów o możliwie wysokim stosunku udźwigu do masy, a więc bezpośrednio odpowiadającej na zidentyfikowane potrzeby instytucji i praktycznych odbiorców systemów EOD.*

Zakres pracy został określony klarownie — od analizy wymagań operacyjnych, przez identyfikację obciążeń, po optymalizację topologiczną komponentów oraz wdrożenie metody na przykładzie platformy robota PIAP Patrol. Doktorant logicznie powiązał „cel” z kolejnymi rozdziałami. W kolejnym rozdziale - 5, Autor definiuje kluczowe parametry istotne dla osiągania wymaganych zdolności roboczych, uzupełnione przykładami zadań EOD i analizą obciążeń. Następnie w rozdziale 6 opisuje szczegółowe badania identyfikacyjne obciążeń na rzeczywistej platformie robota PIAP Patrol wraz z metodyką pomiarową oraz wynikami symulacji i wnioskami. Kluczowe dla pracy są dwa rozdziały: 7 i 8. W rozdziale 7 Doktorant przedstawia opracowaną metodykę doboru parametrów manipulatora i jej elementy: od analizy wymagań, poprzez projekt koncepcyjny, dobór parametrów z użyciem algorytmów ewolucyjnych NSGA-II, wyznaczenie przypadków obciążeń maksymalnych, po optymalizację topologiczną z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych. Natomiast w rozdziale 8 zawiera implementację metody na przykładzie platformy manipulatora PIAP Patrol, z opisem doboru komponentów z biblioteki rozwiązań, analizą przypadków obciążeniowych, wynikami optymalizacji topologicznej wybranych przegubów oraz testami zweryfikowanych części – bogato zilustrowany zdjęciami, modelami CAD i wynikami MES.

Pracę kończy podsumowanie, opisane w rozdziale 9, w którym są zaprezentowane wnioski końcowe, syntetyzujące efekty badań. Jednocześnie Doktorant wskazuje na uniwersalność metody oraz jej spójność z nowymi trendami w procesie projektowania i produkcji. Całość jest spójna z literaturą przedmiotu, Autor omawia i rozwija koncepcje znanych autorów, takich jak: Sigmunda, Bendsoe, Yoshiwaki (przy czym w pracy jest odwołanie do Yoshiwaki) czy Gosselina, a także odnosi się do norm NIST i licznych wdrożeń przemysłowych.

Podsumowując ogólną charakterystykę rozprawy trzeba odnotować, że praca jest interdyscyplinarna i integruje wiedzę z inżynierii mechanicznej, robotyki i metod optymalizacji, a przy tym struktura pracy jest logiczna, metodycznie poprawna i zgodna z aktualnym stanem wiedzy. Ponadto, przy tak szerokim zakresie pracy, Doktorant bardzo skrupulatnie unika ogólników, a cel nie jest sformułowany w zbyt szeroki sposób, lecz zawiera konkretne mierzalne rezultaty (np. poprawa wskaźnika udźwig/masa, implementacja na realnym robocie). Sformułowania są jednoznaczne, a zakres jasno wyznacza granice tematu, co ułatwia recenzję i ocenę niniejszej rozprawy pt: *Dobór parametrów manipulatorów robotów przenośnych na podstawie technik projektowania topologicznego* Pana mgr inż. Tomasza Jacka Krakówki.

2.2. Uwagi merytoryczne i szczegółowe

Pod względem merytorycznym i metodycznym, pracę oceniam bardzo pozytywnie. Uważam, iż Doktorant z uwagi na wielowątkowość tematu włożył dużo pracy w opracowanie tematu rozprawy, a sama praca jest bogato ilustrowana (ponad 150 rysunków i tabel). Wyniki analiz, porównań i testów poligonowych są czytelne, konkretne i podparte obliczeniami oraz eksperymentami na realnym manipulatorze.

Nie mniej jednak, w każdej pracy można znaleźć minusy w postaci niedociągnięć edytorskich, jak w wykazie symboli nie przedstawiono jednostek dla wylistowanych parametrów czy też występują bardzo liczne powtarzalne błędy kodowania polskich znaków (np. „, „, „, „ zamiast diakrytycznych liter), widoczne np. na stronach 3, 7, 13, 73, 104, 158 – ale jest to typowe dla inżynierów i programistów, którzy w pracy posługują się językiem angielskim. Pozostałe literówki i drobne pomyłki jednostek są rzadkie i nie mają wpływu na wartość naukową. Zalecana jest korekta automatyczna czy też ręczna tych fragmentów przed dalszymi publikacjami naukowymi.

W odniesieniu do uwag merytorycznych, to nasuwają się pewne pytania, które stanowią punkt wyjścia do dyskusji i rozwijania tematyki rozprawy w przyszłości, a wynikają one z ciekawości Recenzenta. Mam w tym kontekście sformułowane poniżej pytania, do których prosiłbym Doktoranta o odniesienie się:

1. W pracy Doktorant zdecydował się na wykorzystanie algorytmu ewolucyjnego NSGA-II jako podstawowe narzędzie optymalizacji wielokryterialnej. Czy rozważano efektywność alternatywnych metod (np. algorytmów ewolucyjnych multiobiektowych, MOEA/D) dla tego problemu projektowego?
2. W pracy dokonano weryfikacji poprawności modeli MES w stosunku do rzeczywistych pomiarów na platformie robota PIAP Patrol? Jakie były maksymalne dopuszczalne rozbieżności?
3. Doktorant bardzo ciekawie dokonał w algorytmie doboru parametrów, przy czym przyjęto konkretne funkcje celu (maksymalny udźwig, udźwig na maksymalnym wysięgu, wysięg maksymalny) a co z innymi np. dynamicznymi lub kinematycznymi dotyczącymi manipulacyjności?
4. W tym kontekście dobre byłoby odniesienie się Doktoranta do określonego poziomu współczynników bezpieczeństwa dla projektowanego manipulatora i transportowanych mas. Czy są one zgodne z normami branżowymi, czy wynikają wyłącznie z eksperymentów Doktoranta?
5. Odnosząc się do implementacji metodyki na robota PIAP Patrol - czy przedstawione wnioski pozwalają na generalizację metody na inne platformy mobilne o odmiennej kinematyce manipulatora i parametrach masowych? Jakie warunki należałoby spełnić, aby przenieść metodykę bez utraty jej skuteczności?

Powyższe uwagi szczegółowe mają charakter wyłącznie porządkowy, estetyczny, czyniący pracę klarowniejszą, a wskazane uwagi o charakterze merytorycznym nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy. Ocenianą pracę uważam za ciekawą, wartościową i innowacyjną, a pytania merytoryczne, choć dotyczą pracy to mają na celu wyznaczenie kierunków dalszych badań.

3. Podsumowanie oceny

Rozprawa spełnia wymagania pracy doktorskiej w zakresie nowatorskości, poziomu eksperymentu, aktualności literatury oraz implementacji praktycznej. Opracowana metoda ma wyraźnie potwierdzone zastosowanie w Polskiej i światowej robotyce mobilnej. Część własna jest merytorycznie pełna, a wyniki eksperymentów bronią celu pracy i odpowiadają na pytania badawcze. Wyodrębnione wątki projektowe, obciążeniowe i wdrożeniowe są prowadzone logicznie, a realizacja procesu jest transparentna. Praca ma też charakter wdrożeniowy i jest osadzona w praktycznych potrzebach przemysłowych. Doktorant udowodnił praktyczną przydatność metody, stosując ją do modernizacji manipulatora PIAP Patrol. W wyniku zastosowania optymalizacji topologicznej:

- masa podstawy manipulatora spadła o 38%,
- masa przegubu 2 spadła o 22%,
- przegub 3 zyskał większą wytrzymałość (choć masa nieco wzrosła).

Dodatkowo przeprowadzono badanie wpływu liczby przypadków obciążeniowych na wynik optymalizacji topologicznej, wykazując, że dla tej klasy konstrukcji wystarczy rozważanie 4 reprezentatywnych stanów, co istotnie skraca czas obliczeń.

Umiejętności te doprowadziły do osiągnięcia założonego głównego celu badawczego rozprawy, a Doktorant mgr inż. *Tomasz Jacek Krakówka* udowodnił, że potrafi samodzielnie formułować i rozwiązywać zadania naukowe na poziomie prac doktorskich i reprezentuje **bardzo dobry** poziom wiedzy związanej z tematyką rozprawy.

4. Uzasadnienie wyróżnienia rozprawy doktorskiej

Mając to na względzie i stosując się do wytycznych zapisanych w zasadach wyróżniania rozpraw doktorskich opracowanych przez Radę Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej, składam wniosek o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.

Oceniana rozprawa została opracowana na Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego pod kierunkiem promotora dra hab. inż. Andrzeja Typiaka, profesora WAT oraz promotora pomocniczego i opiekuna dra inż. Macieja Cadera, koncentruje się na nowatorskim podejściu do projektowania manipulatorów mobilnych z wykorzystaniem topologicznej optymalizacji struktur mechanicznych. Zaproponowana przez Doktoranta praca jest interdyscyplinarna i integruje wiedzę z inżynierii mechanicznej, robotyki i metod optymalizacji, a przy tym struktura pracy jest logiczna, metodycznie poprawna i zgodna z aktualnym stanem wiedzy. Ponadto, przy tak szerokim zakresie pracy, Doktorant bardzo skrupulatnie realizuje cel pracy, a przede wszystkim trzeba podkreślić jej praktyczną walidację i przyszłościowe zastosowanie w realnym robocie mobilnym. Sprawia to, że oceniana rozprawa doktorska ma niewątpliwie dobry aspekt naukowy i jest bardzo dobrze osadzona w aktualnych badaniach naukowych. Praca stanowi solidną bazę dla przyszłych prac nad rozwojem efektywnych, adaptacyjnych manipulatorów w zastosowaniach wojskowych, ratowniczych i przemysłowych.

Podsumowując stawiam wniosek, jak w wstępie do tego rozdziału, o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Tomasza Jacka Krakówki pt: *Dobór parametrów manipulatorów robotów przenośnych na podstawie technik projektowania topologicznego* przed Radą Naukową Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.



5. Wniosek końcowy

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgra inż. Tomasza Jacka Krakówki **pt. „Dobór parametrów manipulatorów robotów przenośnych na podstawie technik projektowania topologicznego”** spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz.U. nr 65, poz. 595 (z późniejszymi zmianami) oraz Ustawy o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 2018 r., stawiam zatem wniosek **o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Wojskowej Akademii Technicznej** w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Manuela Jankowska
05.08.2025