

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki

Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Tomasza Jacka Krakówki

pt.:

„Dobór parametrów manipulatorów robotów przenośnych na podstawie technik projektowania topologicznego”

Podstawę recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej nr 51/RDN IM/2025 z dnia 21 maja 2025r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Jacka Krakówki.

Przenośne roboty mobilne przeznaczone do zastosowań specjalnych, w tym wojskowych i antyterrorystycznych stanowią odrębną grupę robotów w stosunku do typowych robotów mobilnych ze względu na znaczne ograniczenia masy związane z koniecznością ich transportu przez człowieka w warunkach polowych. Ich ustrój nośny musi być lekki, ale jednocześnie wytrzymały i w pełni funkcjonalny. Kluczowym elementem takich robotów jest ich organ roboczy – manipulator, który umożliwia wykonywanie złożonych czynności oraz stanowi bazę do montażu czujników oraz efektorów niezbędnych do działań z zakresu C-IED i CBRN.

Cele optymalizacji tego typu manipulatorów są definiowane w sposób odmienny niż w przypadku manipulatorów stosowanych w mobilnych robotach autonomicznych i w robotach przemysłowych. Różnice wynikają z, pracy w nieprzewidywalnym środowisku, konieczności odporności na kolizje oraz bardziej złożonych i zróżnicowanych przypadkach obciążeń oraz z mniejszych prędkości w parach kinematycznych. Istnieje zatem potrzeba opracowania metod projektowych ukierunkowanych na tego typu obiekty. Dysertacja mgr. inż. Tomasza Jacka Krakówki jest poświęcona autorskiej metodzie projektowania manipulatorów, integrującej iteracyjny dobór parametrów konstrukcyjnych z wykorzystaniem istniejących w postaci biblioteki rozwiązań elementów aktywnych par kinematycznych, identyfikację przypadków obciążeń oraz na etapie końcowym optymalizację topologiczną. Tematyka dysertacji i postawione w niej cele posiadają duże znaczenie aplikacyjne jak również są nadzwyczaj aktualne. W pracy położony został nacisk na możliwość implementacji opracowanej metody w przemyśle.

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 9 rozdziałów, wykazu bibliografii, spisu rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Całość pracy liczy 157 stron.

Zakres rozprawy

W krótkim wstępie Autor uzasadnił potrzebę podjęcia się tematu badań oraz sformułował cel pracy. Zaproponował podejście systematyzujące proces projektowy i umożliwiające opracowanie lekkich i funkcjonalnych konstrukcji dopasowanych do wymagań zdefiniowanych indywidualnie przez użytkownika.

Początkowym etapem prowadzącym do osiągnięcia postawionego we wstępie celu było określenie istotnych parametrów manipulatorów robotów przenośnych. Realizacja tego etapu została opisana w rozdziale 2 dysertacji. Dokonano przeglądu istniejących rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych przez czołowych producentów światowych oraz przeprowadzono dyskusję odnośnie wskaźników opisujących ilościowo stopień osiągnięcia celu. Zagadnienie optymalizacji tych wskaźników skutkuje uzyskaniem zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych, gdyż wskaźniki te są antynomiczne.

Właściwy przegląd metod projektowania i optymalizacji w odniesieniu do analizowanej klasy obiektów przedstawiono w obszernym rozdziale 3, który Autor usystematyzował przez podział na 3 podrozdziały. Opisano zadania i budowę manipulatorów przenośnych robotów do zadań specjalnych oraz zastosowanie projektowania systemowego. Szerzej omówiono zastosowanie metod optymalizacyjnych w projektowaniu robotów, zagadnienia optymalizacji strukturalnej i optymalizacji topologicznej. Następnie opisano parametry najczęściej wykorzystywane przy optymalizacji takie jak: struktura kinematyczna, liczba stopni swobody, ruchliwość, manewrowość, zwinnność i dokładność pozycjonowania manipulatora oraz złożone wskaźniki do oceny działania manipulatorów. Dokonano bardzo szerokiego przeglądu metod optymalizacji przedsięwziętej przez różnych autorów. Autor wykazał na podstawie przeprowadzonej analizy wykorzystania metod optymalizacyjnych, w tym optymalizacji topologicznej, że metody przedstawione w literaturze nie mogą być bezpośrednio zastosowane do projektowania manipulatorów robotów przenośnych do zadań specjalnych, ze względu na istotne różnice wynikające ze sposobu sterowania i zakresu prędkości członów.

Przeprowadzone rozważania umożliwiły Autorowi w rozdziale 4 sformułowanie celu: „*opracowanie metody doboru parametrów projektowych, która pozwoli na projektowanie lekkich manipulatorów robotów do zadań specjalnych o wymaganych zdolnościach roboczych*”, co ma umożliwić poprawę wskaźnika stosunku udźwigu do masy robota i przez to zwiększyć możliwości operacyjne robotów. Podkreślono cele aplikacyjne opracowanej metody i jej przydatność w kształtowaniu robotów projektowanych w Łukasiewicz PIAP. Przedstawiono także zakres dalszych badań niezbędnych do osiągnięcia celu: przeprowadzenie identyfikacji obciążeń występujących podczas pracy manipulatorów przenośnych, opracowanie metody doboru parametrów powyższych manipulatorów oraz jej implementację i weryfikację.

Powyższy zakres opisano w kolejnych rozdziałach dysertacji. W rozdziale 5 określono parametry manipulatorów robotów przenośnych, które są konieczne do osiągnięcia wymaganych zdolności roboczych. Opisano poszczególne zdolności robocze i jako najbardziej istotne przyjęto wysięg, udźwig, udźwig na maksymalnym wysięgu oraz stosunek wysięgu do masy robota. Przeanalizowano grupę bardziej złożonych zdolności roboczych określających możliwość wykonania przez manipulator określonych czynności.

Wyznaczono parametry istotne do osiągnięcia zdolności roboczych manipulatora: długość poszczególnych członów, wielkość przegubów wybieranych z szeregu istniejących rozwiązań oraz grupy parametrów określających zdolność korpusów przegubów do przenoszenia obciążeń.

Kolejnym etapem realizacji zakresu badań, opisanym w rozdziale 6, była identyfikacja obciążeń występujących podczas pracy manipulatora. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem robota PIAP Patrol w konfiguracji z lekkim manipulatorem. Ten obiekt badań posłużył także do dalszych prac badawczych. Przyjęta metoda badawcza polegała na rejestracji wzajemnych obrotów członów manipulatora podczas typowych zadań realizowanych przez robota a następnie odtworzenie tych przebiegów w modelach MBS w środowisku PTC Creo. Z modeli numerycznych uzyskano przebiegi momentów w poszczególnych przegubach członów. Analizowano podnoszenie obiektów na maksymalnym wysięgu, podnoszenie obiektów o maksymalnej dopuszczalnej masie, przesuwanie obiektów na podłożu obrotem manipulatora. Przeprowadzone testy obejmowały tylko obciążenia dla wybranych konfiguracji manipulatora (określonych przez Autora jako użyteczne i najbardziej prawdopodobne). Analizowano obciążenia w poszczególnych przegubach: momentami aktywnymi w kierunku osi przegubu oraz momentami biernymi działającymi w kierunku promieniowym.

W rozdziale 7 przedstawiono opracowaną przez Autora metodę doboru parametrów manipulatorów lekkich robotów do zadań specjalnych w aspekcie zwiększenia ich zdolności roboczych. Zaproponowano podejście, które łączy w sobie cechy metodologii typu *top-down* – od ogółu do szczegółu oraz *bottom-up* od szczegółu do ogółu. Przedstawiono schemat logiczny algorytmu optymalizacji struktur mechanicznych manipulatorów. Punktem wyjścia są wymagania dla parametrów oraz zdolności manipulatora. Zdefiniowano te parametry oraz wyprowadzono zależności na ograniczenia wynikające z momentów w poszczególnych przegubach oraz wynikające z stateczności robota dla podstawowych parametrów: maksymalnej masy, którą robot może podnieść, maksymalnej masy, którą robot może podnieść na maksymalnym wysięgu. Te zależności umożliwiają dobór rozwiązań konstrukcyjnych z dostępnej biblioteki. Dodatkowo opisano procedurę doboru struktury kinematycznej manipulatora.

Przedstawiono dobór podstawowych parametrów manipulatora. Określono 3 funkcje dopasowania zgodne z opisanymi powyżej przyjętymi parametrami: maksymalizacja udźwigu, maksymalizacja udźwigu na maksymalnym wysięgu oraz maksymalizacja wysięgu. Zdefiniowano także więzy procesu: ograniczenie masy oraz zapewnienie zdolności do określonych operacji. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji otrzymano zbiór rozwiązań w postaci frontu Pareto. Po doborze podstawowych parametrów manipulatora przedstawiono metodę wyznaczenia krytycznych zestawów obciążeń manipulatora, ze względu na obciążenie przegubów. Procedurę zaaplikowano w oprogramowaniu MATLAB.

Powyższe czynności były elementami procesu przygotowawczego do optymalizacji topologicznej. Taką optymalizację zaaplikowano do przyjętego wcześniej obiektu badań. Celem optymalizacji było zminimalizowanie masy korpusów przegubów, przy zachowaniu

wymaganego współczynnika bezpieczeństwa. Przedstawiono także schemat procesu przygotowania modelu uzyskanego po optymalizacji topologicznej do obróbki elementu.

Odrębnym problemem przy optymalizacji topologicznej jest uwzględnienie zbioru potencjalnych zestawów obciążeń, ze względu na względną zmianę położenia ramion podczas ruchu manipulatora. Za pomocą prostego modelu przeprowadzono analizę minimalnej liczby takich zestawów.

Opracowaną metodę projektowania i optymalizacji zastosowano do manipulatora PIAP Patrol (rozdział 8). Zdefiniowano kryteria kinematyczne oraz kryteria statyczne. Do doboru parametrów manipulatora wykorzystano algorytm ewolucyjny optymalizacji wielokryterialnej NSGA-II dostępny w środowisku MATLAB. Przedstawiono uzyskane wartości funkcji przystosowania i wybrano rozwiązania z frontu Pareto. Po wyznaczeniu reprezentatywnych przypadków obciążeń i konfiguracji, w których występują wyznaczone siły wewnętrzne w przekładni manipulatora. Wyniki zaprezentowano dla przegubu 3 manipulatora. Te obciążenia posłużyły do zdefiniowania zadania optymalizacji topologicznej korpusu tegoż przegubu. Wykonano także optymalizację przegubu 1. Wykazano obniżenie masy elementów. Zoptymalizowany przegub 1 wykonano na obrabiarce CNC. Ze względu na obszerność rozdziału 8 na jego końcu sformułowano wnioski z implementacji opracowanej metody.

Całość rozprawy została podsumowana w rozdziale 9, w którym Autor podsumował wagę skutecznej optymalizacji oraz przedstawił najważniejsze osiągnięcia i sformułował wnioski dotyczące przyjętej metody oraz podkreślił elementy, które uznaje za swój oryginalny dorobek.

Bibliografia rozprawy liczy 142 pozycje dotyczących opisywanych zagadnień. Większość pozycji stanowią publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym z ostatnich kilkunastu lat.

Charakterystyka rozprawy

Praca dotyczy metody projektowania robotów przenośnych, a w szczególności ich manipulatorów. Mgr inż. Tomasz Jacek Krakówka przeprowadził szerokie rozpoznanie istniejącego stanu wiedzy i stwierdził brak metody projektowania ukierunkowanej na roboty przenośne, przeznaczone do zastosowań wojskowych i antyterrorystycznych. Jest to obszar bardzo aktualny ze względu na obecną sytuację międzynarodową i ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa ale oprócz tych potrzeb użytkowych jest on także bardzo istotny i interesujący pod względem naukowym. Dokonany przegląd literatury jest bardzo szczegółowy nie tylko w zakresie związanym z obiektami badań ale także w zakresie metod projektowania, w tym metod optymalizacji ustrojów nośnych maszyn. Jest on przeprowadzony w sposób wzorowy.

Wymagania stawiane tym robotom są odmienne od robotów przemysłowych lub inspekcyjnych stosowanych w zastosowaniach cywilnych. Należy podkreślić w tym przypadku złożoność podjętego do analizy problemu badawczego. Autor pracy poradził sobie w ten sposób, że zaproponował podział procesu projektowania na trzy etapy: dobór napędów manipulatora i jego parametrów geometrycznych, analiza obciążenia i zdefiniowanie wymiarujących obciążeń, konfiguracji manipulatora i realizowanych czynności, optymalizację topologiczną komponentów. Takie podejście stosujące równolegle metodologię typu top-down oraz bottom-up umożliwiło usystematyzowanie przyjętego procesu projektowania.

Autor nie sformułował tezy dysertacji ale precyzyjnie określił jej cel jako opracowanie metody doboru parametrów projektowych, która pozwoli na projektowanie lekkich manipulatorów robotów do zadań specjalnych o wymaganych zdolnościach roboczych. Cel ten został moim zdaniem osiągnięty. Wyznaczono parametry istotne do osiągnięcia zdolności roboczych manipulatora. Przyjęta metoda badawcza wykorzystująca zarejestrowane obroty członów manipulatora podczas typowych zadań realizowanych przez robota a następnie odtworzenie tych przebiegów w modelach MBS jest właściwa. Przyjęte funkcje dopasowania: maksymalizacja udźwigu, maksymalizacji udźwigu na maksymalnym wysięgi oraz maksymalizacji wysięgu są moim zdaniem reprezentatywne; a przyjęte więzy procesu optymalizacji: ograniczenie masy oraz zapewnienie zdolności do określonych operacji właściwe. Na uwagę zasługuje sposób wyznaczenia minimalnej liczby potencjalnych zestawów obciążeń, ze względu na względną zmianę położenia ramion podczas ruchu manipulatora.

Przeprowadzona walidacja metody na obecnie produkowanym robocie przenośnym wykazała poprawność przyjętych procedur oraz przyniosła określone korzyści w postaci obniżenia masy podzespołów.

Opisany wcześniej zakres pracy jest obszerny i spójny. Widoczne jest kompleksowe podejście do zagadnienia i metodyczne rozwiązywanie poszczególnych zagadnień cząstkowych.

Ze względu na duży zakres niezbędnych procedur cząstkowych w procesie projektowania praca jest wyjątkowo obszerna mimo zaprezentowania tylko wybranych wyników. Sformułowane wnioski końcowe są dobrze udokumentowane we wcześniejszych rozważaniach.

Przeprowadzone przez mgr. inż. Tomasza Jacka Krakówki symulacje numeryczne wymagały dużej wiedzy zarówno w zakresie teorii maszyn i mechanizmów oraz budowania złożonych modeli numerycznych do analizy metodą elementów skończonych oraz do optymalizacji topologicznej. Bardzo istotna jest także umiejętność aplikacji wyników optymalizacji topologicznej do ostatecznego kształtowania geometrii korpusów przegubów.

Autor wykazał się także umiejętnością przeprowadzania badań eksperymentalnych do identyfikacji obciążeń manipulatora.

Stwierdzam, że zrealizowany przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej zakres pracy, kompleksowy charakter badań oraz opracowana na metoda projektowania manipulatorów przenośnych robotów mobilnych stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe i ma bardzo duże znaczenie aplikacyjne.

Podstawowe osiągnięcia Doktoranta w rozprawie

Do podstawowych osiągnięć Autora i oryginalnych aspektów pracy można zaliczyć:

- ❑ Analizę parametrów manipulatorów robotów przenośnych w aspekcie wymaganych zdolności przy realizacji zadań specjalnych.
- ❑ Identyfikacja obciążeń występujących podczas pracy manipulatora na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz zastosowania analizy MBS.

- ❑ Opracowanie metody doboru parametrów manipulatora łączącej w sobie podejście typu top-down oraz bottom-up.
- ❑ Metoda formułowania funkcji celu i więzów optymalizacji z uwzględnieniem wymagań oraz dostępnych komponentów.
- ❑ Opracowanie metody definiowania wymiarujących przypadków obciążeń z uwzględnieniem zmiennej konfiguracji członów.
- ❑ Zdefiniowanie przestrzeni pasywnej do optymalizacji topologicznej.
- ❑ Automatyzacja procedury przetwarzania wyników optymalizacji topologicznej na model geometryczny .
- ❑ Integracja opracowanych procedur metod cząstkowych w spójną metodę projektowania tej klasy obiektów.
- ❑ Aplikacja metody do istniejącego manipulatora PIAP Patrol i wykazanie jej przydatności.

Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji

- ❑ Liczba koniecznych przypadków obciążenia korpusu członu istotnie zwiększa czas optymalizacji. W analizowanym przypadku Autor wykazał, że wystarczą tylko 4 przypadki z podziałką kątową 90° . Moim zdaniem nie można tego jednak uogólniać. W każdym przypadku należy sprawdzić jaka jest względna różnica w wynikach optymalizacji dla wartości 4 i np. dwa razy większej,
- ❑ W jaki sposób określono rozkład sił w korpusie pochodzący od łożyska (rys. 7.24)?
- ❑ W rozdziale 6.2 brakuje schematu kinematycznego manipulatora przez co rozważania Autora są niejasne (str. 68), przydałyby się schematy obciążenia takie jak na rysunku 6.6,
- ❑ Nie opisano, które ograniczenia technologiczne opisane w rozdziale 7 zastosowano przy optymalizacji korpusów przegubów manipulatora PIAP Patrol (rozdział 8),
- ❑ Co oznacza sformułowanie „*a kolejne stopnie swobody są coraz mniejsze*”? (str. 117),
- ❑ Co oznacza sformułowanie „*w których przekładnie napędzające przedramię były równie duże lub większe niż koła zębate napędzające ramię*”? (str. 117),
- ❑ Autor twierdzi, że „po przekroczeniu granicznego obciążenia robot będzie się przewracał, co zapobiegnie dalszemu wzrostowi obciążenia” (str. 119). Możliwe jest także zniszczenie najsłabszego elementu łańcucha kinematycznego.
- ❑ Czy w modelach prezentowanych w rozdziale 8.6 uwzględniono sztywności, podatności elementów współpracujących.
- ❑ Nie sformułowano kierunków dalszych prac badawczych w aspekcie rozwijania opracowanej metody.

Stwierdzono także niedociągnięcia głównie dotyczące terminologii, precyzji sformułowań oraz opisów rysunków:

- ❑ co Autor rozumie przez parę obrotową V klasy? (str.42),

- ❑ w maszynach roboczych i transportowych używany jest termin stateczność, a nie stabilność (str. 58),
- ❑ wartości względne odniesione do wartości charakterystycznej np. maksymalnej określamy terminem „unormowany” a nie „znormalizowany” (str. 16),
- ❑ autor nie stosuje deklinacji nazwisk (np. str. 31, str. 33, str. 84))
- ❑ nie można pisać o „ilości” koniecznych przypadków (str. 106. str. 136) tylko o ich liczbie,
- ❑ liczne literówki,
- ❑ opisy osi na wykresach (rys. 6.1 i dalej) są wykonane zbyt małą czcionką,
- ❑ brak numeru rysunku (str. 128),
- ❑ autor miesza opisy rysunków w języku polskim i angielskim.

Powyższe uwagi krytyczne nie zmieniają mojej ogólnej oceny recenzowanej pracy, która jest bardzo pozytywna.

Dysertacja zredagowana jest starannie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Struktura dysertacji jest logiczna.

Pozostałe uwagi zaznaczyłem w przekazanym mi egzemplarzu pracy, który przekazałem Autorowi, i dlatego ich tutaj nie przytaczam.

Wnioski końcowe

Praca dotyczyła zagadnienia kształtowania manipulatorów robotów przenośnych do zadań specjalnych w aspekcie wymaganych parametrów i realizowanych zdolności z wykorzystaniem technik projektowania topologicznego. Kandydat przeprowadził szczegółową analizę istniejącego stanu wiedzy i sformułował potrzebę opracowania metody projektowania ukierunkowanej na tej klasy roboty. Przyjęty cel pracy został zrealizowany.

Metoda obejmowała między innymi formułowanie funkcji celu i więzów optymalizacji na podstawie wymaganych parametrów i zdolności manipulatorów z wykorzystaniem istniejących komponentów, szacowanie reprezentatywnych obciążeń granicznych, procedury definiowania przestrzeni pasywnej w procesie optymalizacji topologicznej i następnie automatycznego przetwarzania wyników optymalizacji topologicznej. Wymagało to wysokich umiejętności merytorycznych oraz dużego nakładu pracy. Metoda została pomyślnie zwalidowana. Treść zawarta w pracy odpowiada tytułowi pracy, choć jej zakres jest znacznie bardziej obszerny.

Wymienione powyżej liczne uwagi krytyczne nie umniejszają w sposób istotny wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy i w dużej mierze mają charakter dyskusyjny.

Praca jest bardzo dobra pod względem merytorycznym, a w przedstawionych analizach Doktorant wykazał duży zasób wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności oryginalnego i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Autor wykazał się dobrą znajomością metod optymalizacji wytrzymałościowej

konstrukcji mechanicznych oraz przeprowadzania badań doświadczalnych. Przedstawiona praca wykazuje dobre przygotowanie Autora do samodzielnej pracy naukowej.

Recenzowana praca jest oryginalna, wartościowa i przedstawia nowe osiągnięcia badawcze, ma wysokie walory użytkowe, stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu badawczego i wnosi istotny wkład w rozwój narzędzi wspomagających projektowanie przy uwzględnieniu specyficznych wymagań eksploatacyjnych i konstrukcyjnych. Ze względu na jej bardzo szeroki zakres i spójność przedstawionej metody projektowania oraz ze względu na wysokie walory aplikacyjne stawiam wstępnie wniosek o jej wyróżnienie, podjęcie ostatecznej decyzji uzależniając wszakże od przebiegu obrony.

Podsumowując podane wyżej oceny uważam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Jaka Krakówki pt. „*Dobór parametrów manipulatorów robotów przenośnych na podstawie technik projektowania topologicznego*” spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom na stopień doktora nauk technicznych i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony, a po pozytywnym jej zakończeniu do nadania mgr. inż. Tomaszowi Jackowi Krakówce stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Wrocław, dnia 9 lipca 2025 r.

Tadeusz
Stanisław
Smolnicki

Elektronicznie podpisany
przez Tadeusz Stanisław
Smolnicki
Data: 2025.07.09 08:45:19
+02'00'

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki