

Prof. dr hab. inż. Piotr Dudziński
Laboratorium Maszyn Roboczych
i Pojazdów Przemysłowych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska

Wrocław, 20.09.2023

RECENZJA

**rozprawy habilitacyjnej nt.: „Problemy mobilności robotów inżynierskich”
oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego**

dr. inż. Mariana Janusza Łopatki

Podstawa wykonania opinii: zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej
„Inżynieria Mechaniczna” WAT prof. dr. hab. inż. Jerzego
Małachowskiego z dnia 13.07.2023 roku.

1. Uwagi ogólne

Opiniowana rozprawa habilitacyjna pt. „Problemy mobilności robotów inżynierskich” została opublikowana w 2023 roku przez Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, ISBN: 978-83-7938-386-3. Praca zawiera 272 strony, w tym wstęp, w którym sformułowany został cel i zakres pracy, 4 rozdziały oraz podsumowanie. Na końcu każdego rozdziału cytowana jest literatura. Numeracja rysunków oraz tabel są przyporządkowane również do każdego rozdziału, a więc: rozdział 1 zawiera 95 cytowanych pozycji literaturowych, 41 rysunków i 4 tabele; rozdział 2 zawiera 163 cytowane pozycje literaturowe, 79 rysunków i 27 tabel; rozdział 3 zawiera 73 cytowane pozycje literaturowe, 49 rysunków i 6 tabel; rozdział 4 zawiera 80 cytowanych pozycji literaturowych oraz 36 rysunków.

Recenzje wydawnicze opracowali: prof. dr hab. inż. Jan Szlagowski oraz prof. dr hab. inż. Wiesław Trąpczyński.

Należy podkreślić, że cytowana bardzo bogata literatura, w tym przede wszystkim zagraniczna, jest reprezentatywna dla tematyki rozprawy habilitacyjnej.

2. Ocena rozprawy habilitacyjnej

2.1 Problematyka rozprawy

W obszarze aplikacji robotów inżynierskich, na przykład w wojsku, wyróżniają się zadania, podczas których występują duże zagrożenia utraty zdrowia lub życia dla realizujących te prace osób. Jeśli takie zadania są wykonywane na dystansach nie większych niż 1,5 km, to z powodzeniem można wykorzystać systemy teleoperacji, gdyż drogie systemy autonomiczne, w rozpatrywanym zakresie aplikacji, nie osiągnęły jeszcze obecnie wystarczającego poziomu rozwoju. Należy podkreślić, że obecnie istnieje coraz większe zapotrzebowanie na roboty inżynierskie do zastosowań w bardzo różnorodnych, zmiennych

warunkach eksploatacyjnych. Tego typu roboty inżynieryjne są dopiero w początkowym stadium rozwoju. W literaturze polskiej jak i zagranicznej istnieją istotne braki i niejednoznaczności w zakresie rozpatrywanego zagadnienia, bądź istniejące publikacje dotyczą tylko częściowych problemów rozpatrywanej tematyki badawczej. Niestety brak jest generalnie, oczekiwanych przez praktykę inżynierską, kompleksowych opracowań w tym zakresie.

Zaprezentowana praca habilitacyjna stanowi znakomity materiał źródłowy do klasycznej optymalizacji nie tylko mobilnych robotów inżynieryjnych ale również innych obiektów ruchomych podobnej klasy.

Dr inż. M. J. Łopatka, na podstawie analizy stanu wiedzy i techniki na świecie oraz własnych badań symulacyjnych a przede wszystkim złożonych i pracochłonnych badań eksperymentalnych, głównie w warunkach eksploatacyjnych, opracował metodę racjonalnego kształtowania mobilnych robotów inżynieryjnych, przede wszystkim z punktu widzenia wysokiej mobilności i zdolności do realizacji zadań inżynieryjnych z wysoką efektywnością. Habilitant, w celu ograniczenia wpływu czynników subiektywnych oraz właściwej oceny zdolności realizacji zadań, zaproponował własną metodę oceniania układów konstrukcyjnych tej klasy obiektów. Metodę tą nazwał metodą zdolności krytycznych

Należy podkreślić, że wysoka mobilność terenowa robotów rozumiana jest przez Autora jako zdolność rozwijania oczekiwanych prędkości jazdy na zróżnicowanych podłożach w połączeniu ze zdolnościami pokonywania przeszkód i wzniesień, zapewnienie wymaganej stateczności poprzecznej i wzdłużnej, zwrotności i manewrowości oraz zdolności do realizacji zadań w trybie teleoperacji.

Jak wiadomo klasa tych robotów przeznaczona jest do realizacji swoich zadań w różnorodnych warunkach eksploatacyjnych a mianowicie: przy wysokim stopniu zagrożenia, presji czasu, stresu oraz z uwzględnieniem względnie niskiego poziomu umiejętności operatorów.

Autor ponadto na podstawie analizy literatury wykazuje, że z uwagi na relatywnie małe masy i rozmiary robotów, do ich oceny mobilności terenowej nie można bezpośrednio wykorzystywać rezultatów badań z zakresu mobilności, uzyskanych na standardowych pojazdach załogowych.

Uważam, że temat rozprawy jest bardzo aktualny, posiada istotne interdyscyplinarne walory poznawcze a przede wszystkim utylitarne.

2.2 Ocena merytoryczna rozprawy habilitacyjnej

Na stronach 5 do 9 oznaczonych jako **Wstęp** Habilitant definiuje cel pracy a mianowicie jako: *określenie pożądanych kierunków rozwoju konstrukcji robotów inżynieryjnych z punktu widzenia zapewnienia wysokiej efektywności realizacji zadań w systemie teleoperacji oraz zbadanie możliwości i ograniczeń w zakresie szeroko rozumianej mobilności, uwzględniając potrzebę zapewnienia wysokiej wydajności pracy.*

Autor główną uwagę skupił na rozwiązaniach robotów klas lekkich i średnich o masie nie przekraczającej 1000 kg, których mobilność oraz możliwości robocze powinny pozwalać na efektywną realizację zadań w terenie. Z uwagi na ich ograniczoną masę i rozmiary, znacznie odbiegające od typowych pojazdów terenowych, brak jest dla tej klasy pojazdów

wyczerpujących badań na temat ich oporów i energochłonności ruchu, stateczności, zdolności pokonywania przeszkód itp. Przeprowadzone przez Kandydata badania własne oporów ruchu oparto o wyniki eksperymentów, natomiast badania stateczności i zdolności pokonywania przeszkód przeprowadzono metodami symulacyjnymi. Habilitant podkreśla, że największy wpływ na zdolności realizacji zadań i efektywność wykorzystania robotów mają jednak nie parametry techniczne, jak w przypadku maszyn i pojazdów załogowych, lecz świadomość sytuacyjna, świadomość akcyjna oraz przystosowanie konstrukcji platformy oraz systemu napędu i sterowania do teleoperacji. Ponadto, Habilitant zwraca uwagę, że dążenie do zapewnienia wysokiej efektywności użycia robotów w warunkach wysokiego zagrożenia i stresu podczas pracy oraz ograniczonym czasie szkolenia operatorów, wymaga selekcji najkorzystniejszych, z punktu widzenia teleoperacji, rozwiązań konstrukcyjnych platform. Oczekiwane rozwiązania powinny zapewnić intuicyjność sterowania oraz właściwe zobrazowanie stanu platformy i otoczenia, które pozwalają na budowę wysokiej świadomości sytuacyjnej i akcyjnej. Wiedza w tym zakresie jest bardzo ograniczona. Selekcja najlepszych rozwiązań sprzyjających teleoperacji i zwiększających efektywność pracy robotów wymaga prowadzenia badań eksperymentalnych na relatywnie dużych, reprezentatywnych populacjach ludzi, weryfikujących alternatywne rozwiązania przez pryzmat ich percepcji, nawyków, doświadczeń oraz umiejętności. Metody symulacyjne w tym zakresie nie są jeszcze dostatecznie rozwinięte.

W przedstawionej pracy położono duży nacisk na aspekt badań eksperymentalnych, weryfikując tą metodą alternatywne rozwiązania: przede wszystkim systemów skrzętu i sterowania jazdą oraz systemów zobrazowania otoczenia.

Rozdział 1 (str.12-58) dotyczy przeznaczenia i sposobów wykorzystania robotów inżynierskich. Rozdział ten powstał na podstawie własnych koncepcji Habilitanta.

Wizualizacje graficzne rozwiązań przeprowadził, pod nadzorem Autora, zespół pracowników Instytutu.

Kandydat zaprezentował w sposób przejrzysty, w formie tabel klasy robotów wraz z ich charakterystykami, a mianowicie; roboty plecakowe - o masie 15 kg, przenośne – o masie do ok. 70-80 kg, lekkie - o masie do 250-300 kg, średnie – o masie do ok. 800 kg, ciężkie – o masie 3 000-10 000 kg oraz roboty bardzo ciężkie – o masie 10 000 kg. Ten typoszereg robotów inżynierskich został zbudowany na podstawie ich możliwości roboczych oraz oczekiwanej podatności transportowej.

Zaproponowany typoszereg wielkości robotów ułatwia prawidłowy ich dobór do przewidywanych zadań oraz tworzenia z nich ugrupowań.

W dalszej części rozdziału Habilitant zaprezentował rozwój robotów inżynierskich od zdalnie sterowanej zrobotyzowanej ciężkiej koparki gaśnicowej opracowanej w WAT w latach 70. XX w. do współczesnych rozwiązań, głównie zagranicznych, zweryfikowanych w misjach wojskowych w strefach konfliktów na świecie a mianowicie głównie roboty inżynierskie do oczyszczania terenu z niewybuchów i rakiet oraz roboty przystosowane do usunięcia elementów maskujących czy też maszyny trałujące i torujące, itp.

Operacje wojskowe w Iraku, Syrii czy Donbasie potwierdziły rolę użycia min oraz różnego typu improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED). Miny i duże IED umieszczane są między innymi na drogach i głównych ciągach komunikacyjnych, elementach infrastruktury, a zwłaszcza w samochodach oraz na poboczach dróg i ulic itp. Miny tego typu są obecnie jedną z głównych przyczyn strat ludzkich. Z uwagi na bardzo wysoki poziom występujących zagrożeń, dąży się do w tym wypadku do robotyzacji. Jedną z koncepcji zrobotyzowanego

systemu rozpoznania i oczyszczania dróg z IED opracowano w ramach programu IEDDET, Europejskiej Agencji Obrony. Przewiduje ona zastosowanie: robota wczesnego ostrzegania oraz robota potwierdzającego i neutralizującego zagrożenia. Ponadto ugrupowanie powinno współpracować z latającą platformą bezzałogową.

Przedstawiona koncepcja nie uwzględnia jednak możliwości nowoczesnych środków rażenia w postaci *EFP* oraz granatników.

Biorąc pod uwagę te dodatkowe zagrożenia w Habilitant opracował własną odmienną koncepcję ugrupowania, która przewiduje, że ugrupowanie będzie się składać z :

- *robota detekcyjnego – poruszającego się po wyznaczonym pasie ruchu, przenoszącego główny system detekcyjny bliskiego rozpoznania z GPR,
- *robota interwencyjnego – poruszającego się po koronie drogi,
- *robota interwencyjnego wysokiej mobilności terenowej – poruszającego się poza koroną,
- *robota trałującego – wyposażonego w trał naciskowy.

W dalszej części rozdziału Autor prezentuje inne roboty różnych klas armii zagranicznych jak i opracowane w WAT, takie jak: ciężki robot interwencyjny – nośnik osprzętu „Marek” opracowany w WAT w latach 2008-2010 r, ciężki robot interwencyjny „Rohatyniec” o zwiększonym zasięgu manipulatora podczas podejmowania kłody o średnicy 50 cm, opracowany w WAT w latach 2011- 2013 r, średni robot interwencyjny ekstremalnej mobilności „Dromader” opracowany w WAT w 2012 r.

Należy podkreślić, że powyższe rozwiązania powstały w zespole kierowanym przez Habilitanta, przy dominującym Jego udziale.

Rozdział 2 poświęcony jest mobilności terenowej robotów. Definicja ta jest trochę zawężona w stosunku do definicji sformułowanej w rozdziale 1. Mobilność terenowa platformy robota w tym wypadku, rozumiana jest jako zdolność przemieszczania się po podłożach o dużych nierównościach, niskiej nośności lub porośniętych gęstą roślinnością, pokonywania wzniesień oraz różnorodnych przeszkód terenowych. Istotnym aspektem związanym z mobilnością terenową jest energochłonność ruchu. Habilitant przyjął do dalszych rozważań w rozpatrywanych robotach inżynierskich układ jezdny gąsienicowy i kołowy.

W tym miejscu należy podkreślić, że w rozdziale 2 wykorzystano wyniki pomiarów oporów toczenia zrealizowanych przez autora z zespołem technicznym w ramach pracy PBS 23-841/2013/WAT – „Rozwój nowych konstrukcji i technologii systemów sterowania i badań maszyn i pojazdów”, gdzie metodyki, zakres i wyniki badań opracował autor. Badania symulacyjne dotyczące stateczności i zdolności pokonywania przeszkód zrealizowano w ramach projektu nr DOBR-BIO4/083/13431/2013 – „Platforma średnia (klasa 800 kg)”, którym kierował autor. Metodykę badań, założenia do modelowania, modele platform, kryteria oceny oraz wyniki opracował autor. Implementację modeli platform do środowiska Adams oraz badania symulacje przeprowadził pod nadzorem autora zespół pracowników Instytutu w składzie: mgr inż. Mirosław Jaskółowski, mgr inż. Piotr Krogul, mgr inż. Mirosław Przybysz, mgr inż. Arkadiusz Rubiec, mgr inż. Kacper Spadło. W symulacjach wykorzystano opracowane na potrzeby pracy, zwalidowane i zmodyfikowane przez autora model jak wieloelementowy model koła opracowany we współpracy z mgr inż. Mirosławem Przybyszem oraz wieloelementowy model gąsienicy opracowany we współpracy z mgr inż. Piotrem Krogulem.

Na podstawie badań eksperymentalnych i symulacyjnych stwierdzono, że gąsienicowe układy jezdne lekkich i średnich robotów, wykorzystujące rozwiązania o krótkim styku gąsienicy

z gruntem cechują się niskimi zdolnościami pokonywania przeszkód oraz wysokimi oporami toczenia, wynikającymi głównie z oporów własnych przewijania gąsienicy. Współczynnik oporów toczenia na zróżnicowanych podłożach kształtował się na poziomie 0,12-0,21 i był kilkukrotnie wyższy od wskaźników opisujących opory toczenia gąsienic metalowych ciężkich maszyn pojazdów gąsienicowych.

Pod tym względem znacznie korzystniejszym rozwiązaniem okazały się wieloosiowe systemy kołowe. Cechowały się znacznie mniejszymi oporami toczenia oraz dzięki lepszemu kopiowaniu nierówności terenowych, wymagały niższych współczynników przyczepności do pokonywania przeszkód.

Przeprowadzone badania wykazały, że w przypadku przemieszczania się w terenie stosunkowo lekkich platform, niezwykle istotnym aspektem mobilności jest występująca szata roślinna. Oprócz ograniczenia pola widzenia, występująca roślinność może istotnie zwiększać opory ruchu (opory deformacji roślinności mogą przekraczać 30% siły ciężkości platformy) oraz zmniejszać siły przyczepności ograniczając bezpośredni kontakt układu jezdnych z podłożem. Może to doprowadzić do zatrzymania platformy. W przypadku ruchu ciężkich pojazdów ten aspekt jest zwykle pomijany, ponieważ nie stanowi istotnego problemu. Zauważalny jest w tym zakresie brak badań oraz metodyk badawczych pozwalających ocenić przyczepność układów jezdnych lekkich pojazdów na powalonej roślinności, składającej się z długich i relatywnie gładkich pędów, które nie pozwalają na bezpośredni kontakt układów jezdnych z podłożem gruntowym. Zauważono, że klasyczne bieżniki terenowe o dużych klockach ostróg nie sprawdzają się w tych warunkach. Wskazane jest stosowanie bieżników o ostrogach drobno elementowych na przykład jak w oponach ATV.

Analiza zdolności pokonywania przeszkód wykazała, że w przypadku lekkich i średnich platform kołowych, największe wymagania układowi napędowemu stawia zdolność pokonywania schodów. Niezbędne siły napędowe są o ok. 50% wyższe od sił potrzebnych do pokonania standardowo wymaganych wzniesień o pochyleniu 60%. Przy indywidualnym napędzie kół, korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie niesymetrycznych wózków jezdnych, co pozwala na zmniejszenie dysproporcji obciążenia poszczególnych kół. Należy zauważyć, że zapewnienie tak dużej rozpiętości sił napędowych i prędkości w układach bez skrzyń biegów, wymaga zastosowania silników napędowych dużej mocy, co wpływa niekorzystnie na sprawność układu napędowego, zarówno elektrycznego jak i hydrostatycznego. Jest to szczególnie istotne w aplikacjach wymagających długotrwałego działania, gdzie sprawność przeniesienia napędu i wielkość niezbędnego zasobu energii odgrywa istotną rolę.

Badania wykazały ponadto, że znaczna długość platformy bazowej korzystnie wpływa na zdolności pokonywania przeszkód typu rowy przydrożne, które są przeszkodą powszechnie występującą w rejonie realizacji zadań inżynierskich. Duża długość platformy bazowej jest również korzystna z punktu widzenia stateczności wzdłużnej oraz możliwości pracy osprzętami i narzędziami roboczymi – może jednak ograniczyć zwrotność i manewrowość platformy oraz zwiększyć istotnie opory skrętu.

Z tych względów wskazane jest wykorzystanie przegubowych układów jezdnych.

Potwierdziły to eksperymentalne badania porównawcze zwrotności i manewrowości, gdzie systemy przegubowe wykazały się dużą efektywnością, zwłaszcza podczas jazdy z osprzętami roboczymi w położeniu roboczym. Badania zwrotności i manewrowości alternatywnych rozwiązań systemów jazdy, skrętu oraz systemów sterowania przeprowadzono na specjalnym, opracowanym przez autora torze testowym, reprezentatywnym dla manewrów

wykonywanych podczas realizacji zadań inżynierskich. Wykazały one, że dla mało doświadczonych operatorów najbardziej intuicyjny jest zwrotnicowy układ skrętu z kierowanymi przednimi kołami, sterowany za pomocą kierownicy. Nie zapewnia on jednak oczekiwanej zwrotności i manewrowości. Biorąc pod uwagę osiągane prędkości jazdy, pole widzenia, udźwig i prowadzenie osprzętu oraz zdolność do manewrowania, najkorzystniejszym rozwiązaniem okazał się przegubowy układ skrętu.

Ocenę alternatywnych rozwiązań umożliwił opracowany przez Habilitanta system wartościowania konstrukcji, oparty na ocenie zdolności krytycznych dla realizowanych zadań. Zaproponowana metoda zdolności krytycznych, to wielokryterialny system oceny, który dzięki mnożeniu ocen potencjału poszczególnych zdolności krytycznych składających się na potencjał użytkowy rozwiązania, nie pozwala zrekompensować istotnych braków rozwiązania (niska ocena) innymi zdolnościami. Na ocenę poszczególnych zdolności krytycznych mogą składać się zarówno oceny parametrów jak i oceny cech. Zapewnia ona duże zróżnicowanie ocen oraz cechuje się uniwersalnością. Pozwala w relatywnie prosty sposób, na selekcję najlepszych rozwiązań z punktu widzenia oczekiwanych zdolności realizacji przewidywanych zadań. Pozwala również na szybką ocenę efektywności możliwych modyfikacji i odpowiednie kształtowanie konstrukcji.

Przeprowadzone badania symulacyjne stateczności platform przegubowych wykazały, że dzięki odpowiedniej konfiguracji środków ciężkości możliwe jest zapewnienie zdolności jazdy i manewrowania na pochyleniach terenu dochodzących do 60%. Badania te wykazały ponadto, że w przypadku platform przegubowych niezbędne są badania stateczności w pełnym zakresie kąta ustawienia platformy w celu znalezienia krytycznego położenia. Największe problemy podczas kształtowania stateczności sprawiają największe zespoły ograniczające możliwości kształtowania konstrukcji jak zespół napędowy, zasobnik energii oraz osprzęt i narzędzia robocze.

Podczas badań stwierdzono jednak, że przegubowe układy skrętu w rękach niedoświadczonych operatorów mogą wywoływać problemy z percepcją systemu skrętu oraz niską stabilność kierunkową. Z tych względów wskazane jest przeprowadzenie badań nad możliwościami poprawy percepcji operatora i świadomości sytuacyjnej podczas kierowania robotami przegubowymi. Wskazane jest również doskonalenie systemu skrętu w celu poprawy stabilności kierunkowej.

W rozdziale 3 Habilitant 3 przedstawił badania dotyczące zwrotności i manewrowości, które zostały przeprowadzone na potrzeby pracy w ramach projektu PBS 23-893/2021/WAT – „Rozwój konstrukcji i technologii wykonania oraz efektywności systemów i urządzeń wsparcia działania BPL”, przez zespół techniczny pod nadzorem Autora, a mianowicie założenia, plan eksperymentu, metodyka badań, kryteria oceny oraz wyniki zostały opracowane przez Autora. Ponadto zaproponowany w rozdziale 3 sposób wartościowania rozwiązań technicznych robotów, który również został opracowany przez Autora.

Habilitant na początku rozdziału podkreśla, że roboty inżynierskie w stosunku do pojazdów samochodowych wykonują zadania z relatywnie niskimi prędkościami jazdy, a manewrowanie podczas jazdy nie wywołuje dużych przyspieszeń. Podobnie, mimo intensywności manewrowania, prędkość manewrów podczas pracy jest ograniczona głównie percepcją operatora a nie zbyt wysokimi przyspieszeniami. Z tych względów, biorąc pod uwagę specyfikę robotów inżynierskich, wymagającą szybkiego dojazdu do rejonu wykonywania zadania i sprawnego przemieszczania się oraz manewrowania podczas pracy

przyjęto, definicje zwrotności i manewrowości. Zwrotność została zdefiniowana za pomocą minimalnego promienia skrętu, natomiast manewrowość określa zdolność do szybkiej zmiany kierunku i łatwość wykonywania manewrów, która zależy od typu zastosowanego rozwiązania i kinematyki układu skrętu robota, ale również od zastosowanego samego systemu sterowania oraz pola widzenia operatora wpływającego na świadomość sytuacyjną. W celu wyselekcjonowania najkorzystniejszego rozwiązania systemu skrętu dla robotów inżynierskich, uwzględniającego percepcję i wysiłek operatora Habilitant opracował własny tor testowy do realizacji badań eksperymentalnych. Tor ten uwzględniał specyfikę zadań inżynierskich realizowanych przez roboty. Z uwagi na mało intensywne wykorzystanie robotów i ograniczone możliwości wypracowania właściwych nawyków i odruchów przez operatorów. Habilitant przyjął, że poszukiwany układ skrętu powinien być intuicyjny i nie wymagający długotrwałego szkolenia. Z tych względów, badania manewrowości przeprowadzono na stosunkowo dużej populacji 30 osób, nie posiadających doświadczenia w sterowaniu robotami. Jako poziom referencyjny dla uzyskanych rezultatów przyjęto wyniki uzyskane podczas realizacji tych samych zadań przez operatora o dużym doświadczeniu. Jako kryteria porównania i oceny systemów Habilitant wykorzystał wskaźniki parametryczne takie jak: czas przejazdu, maksymalne odchylenia od oczekiwanej trajektorii ruchu, niezbędna szerokość pasa ruchu, promień zawracania oraz wskaźniki subiektywne w postaci ocen operatorów łatwości sterowania, łatwości realizacji zadań, pola widzenia itp. W celu oceny odczuć subiektywnych Autor przeprowadził badania ankietowe. Mając na względzie wyeliminowanie zakłóceń i ograniczeń jakie niesie ze sobą system teleoperacji (opóźnienia, ograniczony kąt widzenia, zaburzenia oceny odległości itp.) Habilitant w badaniach zastosował trzy maszyny sterowane przez operatora w kabinie o odmiennym polu widzenia i pięciu alternatywnych rozwiązaniach konstrukcyjnych systemu skrętu:

- mini-ładowarkę gąsienicową o skręcie tzw. burtowym, z kabiną umieszczoną nisko z przodu maszyny, sterowaną jednym joystickiem (ruch wzdłużny do sterowania prędkością, ruch poprzeczny do kontroli kierunku jazdy oraz dwoma joystickami (niezależne sterowanie prędkościami kół napędowych burt);
- mini-ładowarkę teleskopową sterowaną za pomocą kierownicy, w pierwszym wariancie z przednią osią skrętną, a w drugim obydwoma osiami skrętnymi i kabiną umieszczoną nisko w połowie długości maszyny;
- ładowarkę przegubową sterowaną za pomocą kierownicy i kabiną umieszczoną centralnie na stosunkowo dużej wysokości.

Przeprowadzone przez Autora badania ankietowe wykazały, że widoczność jest jednym z najważniejszych kryteriów oceny systemu skrętu. Jako system zapewniający najlepsze pole widzenia i najlepszą świadomość sytuacyjną wskazano system ładowarki przegubowej. Operator siedzący centralnie, relatywnie wysoko, miał bardzo dobre rozeznanie położenia przeszkód, dostępnej przestrzeni oraz położenia osprzętu roboczego. Jednakże podczas precyzyjnej jazdy po wąskim torze, duża wysokość położenia punktu obserwacji utrudniała ocenę położenia platformy i jej kół względem przeszkód. W tym przypadku lepiej oceniane były platformy z niżej położoną kabiną, z dobrą widocznością na boki. Oznacza to, że w przypadku teleoperacji wskazane jest korzystanie z kilku kamer położonych na różnych wysokościach lub kamery o regulowanej wysokości.

Wybór racjonalnego rozwiązania spełniającego przyjęte kryteria jest zagadnieniem trudnym, gdyż często te wymagania się wzajemnie się wykluczają. Przykładowo, badania wykazały także, że najbardziej intuicyjnym (mniej obciążającym operatora) systemem dla operatorów okazał się system zwrotnicowy z jedną osią skrętną, sterowany kierownicą. Niestety okazał się również najmniej zwrotny. Operatorzy najwyżej ocenili zwrotność mini-ładowarki o skręcie burtowym, jednak jej niska stateczność wzdłużna i podatność na kołysania z powodu krótkiego kontaktu gąsienicy z gruntem, powodowała problemy z precyzyjnym sterowaniem i nie pozwalała na rozwinięcie wyższych prędkości jazdy. Najkorzystniejszymi układami okazały się układ z wszystkimi kołami skrętnymi oraz układ przegubowy, jednak z uwagi na mało intuicyjne zachowanie tych platform, ich subiektywne oceny były bardzo zróżnicowane. Uczestnicy o mniejszych zdolnościach adaptacyjnych oceniali te systemy nisko, natomiast operatorzy bardziej otwarci na nowe możliwości oraz doświadczony operator doceniali ich lepszą zwrotność i manewrowość. Ponadto testy wykazały, że układ przegubowy zapewnia najlepsze kopiowanie trajektorii przedniej części maszyny przez jej tył, co ma bardzo duże znaczenie w przypadku zagrożeń minowych i manewrowania na podłożach o niskiej nośności.

Habilitant w celu ograniczenia wpływu czynników subiektywnych oraz właściwej oceny zdolności realizacji zadań, zaproponował własną metodę oceniania konstrukcji, którą nazwał metodą zdolności krytycznych. W zaproponowanej metodzie zdolności krytycznych, ocena końcowa jest iloczynem ocen poszczególnych zdolności krytycznych. Jako zdolności krytyczne dla robotów inżynierskich Autor zaproponował:

- zdolność do szybkiego przemieszczania się robota i dotarcia do wyznaczonego rejonu;
- zdolność efektywnego manewrowania na ograniczonej przestrzeni w miejscu pracy;
- zdolności pracy osprzętami i manipulatorami.

Przykładowo, każda zdolność może być opisana kilkoma cechami lub parametrami, a ocena zdolności jest sumą ocen poszczególnych cech lub parametrów. Za wzorce przy ocenie poszczególnych cech lub parametrów służą najlepsze rozwiązania w analizowanej populacji. Habilitant przyjął, że na zdolność do szybkiego przemieszczania się i dotarcia do wyznaczonego rejonu wpływają:

- prędkość maksymalna rozwijana podczas przejazdów;
- ocena łatwości sterowania podczas przejazdów;
- opory toczenia wpływające na energochłonność ruchu i ograniczające możliwości długotrwałego patrolowania;
- stateczność wzdłużna ograniczająca możliwość pokonywania przeszkód, w tym podjazdów;
- naciski jednostkowe na podłoże ograniczające możliwości poruszania się w terenie.

Zaproponowana metoda ma charakter uniwersalny i pozwala na szybką ocenę bardzo zróżnicowanych rozwiązań konstrukcyjnych przez pryzmat oczekiwanych zdolności, zapewniając odpowiednie zróżnicowanie ocen oraz multiplikowanie pożądanych cech i stanowi efektywne narzędzie podczas opracowywania nowych konstrukcji robotów.

Habilitant w **rozdziale 4** kolejny raz podkreśla, że niezwykle istotnym problemem w dominującym stopniu wpływającym na mobilność robotów jest świadomość sytuacyjna. Powinna być ona kształtowana w sposób jak najbardziej naturalny i intuicyjny, nie wymagający od operatora długiego procesu przetwarzania, przyswajania i pojmowania dostarczanych danych.

Analiza literatury wskazywała, że niezbędna jest poprawa pola widzenia operatora

i zobrazowania otoczenia poprzez zastosowanie kilku kamer. Z uwagi na ograniczoną dostępność informacji w tym zakresie Habilitant zaplanował i zrealizował badania własne, których celem było określenie wpływu konfiguracji kamer na efektywność realizacji zadań w systemie teleoperacji.

Zadania polegały na przejechaniu trasy składającej się z prostych, ale wąskich odcinków, ciasnych łuków oraz obszarów na których występowały przeszkody i należało je ominąć. Do badań Autor wykorzystał specjalny układ transmisji obrazu o niskich opóźnieniach z 3 kamerami o kącie widzenia 60° . Badania zostały przeprowadzone na zrobotyzowanym pojeździe typu UTV ze zwrotnicowym układem skrętu. Testy przeprowadzono dla 3 konfiguracji:

- typowej dla małych robotów – jedna kamera z przodu i dwie z tyłu po bokach - zapewniające zobrazowanie otoczenia kół przednich;
- reprezentatywnej dla pojazdów – trzy kamery zamocowano panoramiczne w miejscu głowy kierowcy, w środku długości pojazdu, z widocznym zarysem maski;
- mieszanej – jedna kamera w miejscu głowy operatora oraz dwie z tyłu po bokach jak w pierwszym przypadku.

Badania potwierdziły, że zobrazowanie otoczenia ma bardzo duży wpływ na świadomość sytuacyjną operatora i efektywność realizacji zadań. Zmianie ulegał zarówno czas realizacji zadania jak i liczba popełnianych błędów w postaci najechań na niewykryte przeszkody i naruszeń pasa ruchu. Badania wykazały, że w przypadku pokonywania prostych odcinków bez omijania przeszkód, najkorzystniejszym rozwiązaniem było panoramiczne ustawienie kamer w miejscu głowy operatora. Zapewniało ono bardzo dobre zobrazowanie otoczenia i lokalizowanie przeszkód, umożliwiając rozwijanie relatywnie wysokich prędkości przejazdowych. Brak widoczności bezpośredniego otoczenia układu jezdnego utrudniał jednak omijanie blisko położonych przeszkód. W tym obszarze korzystniejsza była konfiguracja mieszana. Najmniej efektywna była konfiguracja typowa dla małych robotów. Badania wykazały ponadto, że wykorzystywane kamery z uwagi na szeroki kąt widzenia powodowały deformację perspektywy i utrudniały ocenę odległości, zaburzając percepcję otoczenia przez operatora i jego reakcje. W efekcie, dla najlepszych badanych konfiguracji czas realizacji prostych zadań, jak pokonywanie prostych odcinków drogi, w systemie teleoperacji był dłuższy o ok. 20% od czasu przejazdu z bezpośrednią obserwacją otoczenia. Czas realizacji zadań wymagających intensywnego manewrowania był dłuższy o ok. 100%. W oparciu o zdobyte doświadczenia Autor zaproponował procedurę doboru systemu zobrazowania otoczenia, w zależności od przeznaczenia, warunków realizacji zadań i oczekiwanych zdolności robota.

Reasumując badania wykazały, że dla zapewnienia wysokiej mobilności terenowej i efektywnej realizacji zadań, wskazane jest zapewnienie panoramicznego obrazu otoczenia, bez deformacji perspektywy, która generuje błędy w ocenie odległości. Takie rozwiązanie pozwala racjonalnie ocenić położenie własnego robota względem obiektów terenowych i przeszkód jak również ułatwia pozycjonowanie osprzętów i narzędzi.

Ponadto badania wykazały dobitnie, że największy wpływ na efektywność realizacji zadań w trybie teleoperacji ma świadomość sytuacyjna i akcyjna, budowana głównie na podstawie informacji dostarczanych przez system zobrazowania otoczenia. Słabe i nieintuicyjne zobrazowanie otoczenia prowadzi do popełniania wielu błędów przez operatorów i nawet kilkukrotnego wydłużenia czasu realizacji zadania.

Niezbędne są jednak dalsze badania nad zobrazowaniem otoczenia i budową świadomości sytuacyjnej, które zapewnią zwiększenie efektywności pracy robotów w systemie teleoperacji. Jak wykazały badania, rezerwy w tym obszarze są znaczne.

Rozdział 5 stanowi podsumowanie zaprezentowanej rozprawy habilitacyjnej

2.3 Uwagi dyskusyjne

1. Habilitant w kreowaniu rozwiązań układów jezdnych mobilnych robotów inżynierskich skupił się jedynie na podwoziach kołowych i gąsienicowych. Należy jednak dodać, że podwozia gąsienicowe w systematyce lokomocyjnej są podwoziami kołowymi, w których koła (rolki nośne) toczą się po układającej przed nimi bieżni (gąsienicy). Jak powszechnie wiadomo w stanie wiedzy i techniki znane są jeszcze inne rozwiązania.

Należy podkreślić, że człowiek od wielu tysięcy lat poszukiwał/poszukuje, przede wszystkim, na podstawie wzorców biologicznych, racjonalnych rozwiązań układów jezdnych środków transportowych eksploatowanych w różnorodnych warunkach terenowych.

W efekcie w ujęciu systemowym w lokomocji lądowej można wyróżnić następujące jej rodzaje, a mianowicie: ślizganie, pełzanie, kroczenie (chód), toczenie oraz rozwiązania hybrydowe (mieszane), na przykład kołowo-kroczące. Rozwiązania te mają różnorodne, czasem sprzeczne wskaźniki eksploatacyjne takie jak na przykład: mobilność czy energochłonność.

Habilitant w swojej pracy naukowej powinien uwzględnić wiedzę na temat różnych lokomocji i zestawić wady i zalety wszystkich rozwiązań. Na tej podstawie do dalszych rozważań powinien wybrać, uzasadnioną naukowo, klasę układów jezdnych. Takie szerokie ujęcie daje dodatkowo inspirację do poszukiwań nowych racjonalnych rozwiązań. Przykładowo wadą rozwiązania kołowego są problemy z pokonywaniem ukształtowań terenowych, których wysokość jest większa od promienia koła.. Wyjściem naprzeciw są na przykład podwozia kołowo- kroczące, stosowane w latach 60-tych w niektórych pojazdach armii USA. Ponadto źródłem inspiracji w tym zakresie mogą być znane interesujące innowacyjne rozwiązania zawieszonych adresowane do kołowych pojazdów księżycowych/marsjańskich a obecnie testowanych w laboratoriach instytutów badawczych na świecie, na przykład USA czy też Chin.

Niestety w recenzowanej pracy wiedza na temat wpływu zawieszonych układów jezdnych mobilnych robotów inżynierskich na ich właściwości eksploatacyjne jest bardzo skromna.

Należy dodać, że literatura w zakresie szeroko pojętej lokomocji pojazdów lądowych jest rozproszona. Autor recenzji w swoim zespole podjął próbę systematyki tego zagadnienia. Wyniki tych badań zostały opublikowane w czasopiśmie pt. Transport Przemysłowy nr 2/2005 pt.: „*Wczoraj, dziś i jutro lokomocji lądowej. Część I. Właściwości lokomocyjne istot żywych i mobilnych środków transportowych*”.

2. Autor na stronie 201 monografii formułuje następujące wnioski: „Pod względem zwrotności najlepsze oceny wśród platform bazowych uzyskały rozwiązania o skręcie burtowym – G1 i G2 – jednak ich prędkości jazdy i czas wykonywania zadań w większości wypadków był dłuższy o ponad 20% w stosunku do rozwiązań kołowych. Niższe prędkości jazdy nie wynikały z ograniczeń układu napędowego, lecz niższej stateczności wzdłużnej, wyższych drgań i wibracji oraz większej podatności na kołysania i mniejszej precyzji sterowania podczas jazdy po nierównym podłożu. Większa podatność na kołysania wynikała głównie z małego rozstawu osi skrajnych kół jezdnych, niezbędnego dla zapewnienia niskich oporów skrętu oraz niskich zdolności kopiowania nierówności terenowych, które mimo elementów resorujących powodowały wysoki stopień drgań”.

Jak wiadomo ruch pojazdu gąsienicowego składa się zasadniczo z dwóch faz: jazdy na wprost i fazy skrętu. W obu przypadkach wymagany jest inny optymalny rozkład nacisków normalnych pod gąsienicą, a mianowicie w fazie jazdy na wprost najbardziej korzystny ze względu na generowaną maksymalną siłę uciągu pojazdu jest rozkład równomierny nacisków normalnych. Natomiast w czasie skrętu, ze względu na minimalizację oporów skrętu pojazdu, znacznie korzystniejsza jest koncentracja nacisków normalnych blisko środka geometrycznego gąsienicy (tzw. efekt szpilki).

W tym miejscu należy dodać, że istnieją już rozwiązania sterujące rozkładem nacisków normalnych, na przykład: Ito, N.: *Theoretical Approach to the Turnability of the Tracked Vehicle*. *Proc. of the 54th Asia-Pacific Regional Conf. of the ISTVS Okinawa, Japan, 1995*. Rozwiązanie to mimo potencjalnych zysków nie przyjęło się w praktyce ze względu na jego złożoność techniczną.

W zespole recenzenta opracowano bardzo proste rozwiązanie zmniejszające samoczynnie opory skrętu pojazdu gąsienicowego. Efekt ten uzyskano poprzez zmniejszenie rozstawu rolki zewnętrznej i wewnętrznej blisko środka styku gąsienicy z podłożem. W rezultacie uzyskano koncentrację nacisków normalnych w środku styku gąsienicy z podłożem w czasie skrętu i potwierdzone eksperymentalnie zmniejszenie oporów skrętu o ponad 20 %. Rozwiązanie to opatentowano i opublikowano w czasopiśmie: Piotr Dudziński, Adam Gładysiewicz „Wpływ rozkładu nacisków normalnych pod gąsienicą na właściwości trakcyjne pojazdu”. *Transport Przemysłowy*, nr 4/2007.

3. W stanie wiedzy i techniki znane są też niekonwencjonalne rozwiązania podwozi gąsienicowych o zmiennej konfiguracji; układ płaski, układ typu delta czy też konfiguracje skośne, które są adaptacyjnie zmieniane w celu racjonalizacji wskaźników eksploatacyjnych w zmiennych warunkach pracy mobilnych robotów, na przykład:

<http://www.inuktun.com/micro-vgtv.htm>

Podobna sytuacja istnieje w stanie wiedzy i techniki podwozi kołowych, na przykład: Gustaw Sierzputowski, Piotr Dudziński, Adam Konieczny „Pojazd o zmiennej strukturze i właściwościach układu podwoziowego”. *Patent PL 231051*.

Wspomniane niekonwencjonalne podwozia gąsienicowe/kołowe z reguły należą do

względnie złożonych i w związku z tym potencjalnie bardziej zawodnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Mimo wszystko, zdaniem recenzenta, powinny być uwzględnione w przeglądzie stanu wiedzy i techniki mobilnych robotów omawianej rozprawy habilitacyjnej.

4. Habilitant testując kołowe układy podwoziowe na specjalnym torze testowym stwierdził, że przegubowe układy jezdne robotów inżynierskich, w stosunku do innych rozwiązań, wykazują się bardzo dobrą zwrotnością i manewrowością zwłaszcza podczas jazdy z osprzętami roboczymi w położeniu roboczym. Mimo znanych tych zalet pojazdy przegubowe posiadają też istotne wady a mianowicie; charakteryzują się istotnie mniejszą statecznością wywrotną, szczególnie dynamiczną oraz podczas jazdy niestabilnością kierunkową. Problemy te, ze względu na produkcję przegubowych ładowarek łyżkowych w fabryce FADROMA we Wrocławiu były przedmiotem wieloletnich badań wirtualnych i eksperymentalnych w Katedrze Inżynierii Maszyn Roboczych i Pojazdów Przemysłowych na Politechnice Wrocławskiej. W efekcie tych prac opracowano odpowiednie algorytmy obliczeniowe do identyfikacji stateczności wywrotnej i kierunkowej dowolnych maszyn/pojazdów przegubowych oraz opracowano rozwiązania mechatroniczne do istotnej poprawy tych szkodliwych zjawisk. Rozwiązania te zostały opatentowane, przykładowo: *Gustaw Sierżputowski, Piotr Dudziński "Układ jezdny o adaptacyjnie regulowanym przegubie skrętu i przegubie wahń członów pojazdu przegubowego"*. Ustalono między innymi, że odpowiednie pochylenie przegubu wychyłu poprawia istotnie stateczność wywrotną. Dla testowanych maszyn uzyskano poprawę o ponad 20%. Natomiast odpowiednie pochylenie przegubu skrętu poprawia istotnie stabilność kierunkową pojazdu przegubowego. W efekcie tych badań zaproponowano, adresowany do mobilnych robotów, mechatroniczny przegub skrętu i wychyłu z regulowanymi adaptacyjnie kątami skrętu i wychyłu - co pozwala na eksperymentalną adaptacyjną optymalizację stateczności wywrotnej i kierunkowej w dowolnych warunkach eksploatacyjnych. Przegub ten jako wynalazek został opublikowany, uzyskując nagrody na międzynarodowych targach innowacji w Brukseli i Niemczech.
- Szkoda, że Habilitant nie umieścił tego oryginalnego rozwiązania w stanie wiedzy i techniki przedstawionej do oceny rozprawy habilitacyjnej.

5. Praca w swojej treści jest interesująca ale jej prezentacja w formie monografii jest zbyt rozbudowana i zawiera szereg, powtarzanych czasem szczegółów, formułowane zbyt długie zdania są często nieprecyzyjne, co nie ułatwia recenzentowi/czytelnikowi śledzenia istoty głównego nurtu problemów.

2.4 Oryginalne elementy rozprawy stanowiące wkład w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna

1. Habilitant, na podstawie analizy stanu wiedzy i techniki na świecie oraz własnych badań symulacyjnych a przede wszystkim złożonych i pracochłonnych badań eksperymentalnych, głównie w warunkach eksploatacyjnych, opracował metodę racjonalnego - kształtowania relatywnie lekkich mobilnych robotów inżynierskich, o masie nie przekraczającej 300 – 1500 kg, na podwoziu kołowym i gąsienicowym.

Jako główne kryteria przyjęto zapewnienie wysokiej mobilności robotów oraz ich zdolności do realizacji zadań inżynierskich z wysoką efektywnością.

2. Zaprezentowana praca habilitacyjna stanowi znakomity materiał źródłowy do klasycznej optymalizacji nie tylko mobilnych robotów inżynierskich i ich podzespołów ale również innych obiektów ruchomych podobnej klasy.
3. Do szczegółowych osiągnięć Habilitanta należy zaliczyć:
 - 3.1 Eksperymentalną identyfikację bardzo wysokich oporów toczenia systemów gaśnicowych lekkich i średnich robotów z elastomerowymi pasami gaśnicowymi, które okazały się być od 2 do 4 razy większe od oporów toczenia systemów kołowych wyposażonych w ogumienie typu ATV - co istotnie wpływa na energochłonność ruchu. Z tego powodu oraz niskich zdolności kopiowania nierówności terenowych stosowanie gaśnicowych elastomerowych układów jezdnych w rozpatrywanej klasie robotów jest nieefektywne.
 - 3.2 Eksperymentalne wyznaczenie oporów toczenia na zróżnicowanych podłożach, w tym porośniętych bujną roślinnością, opon typu ATV, przeznaczonych do lekkich i średnich robotów. Wyniki badań wykazały, że kępy traw i ziół oraz pojedyncze korzenie drzew lub stosunkowo niewielkie ruchome kamienie mogą wywołać opory ruchu sięgające 70% siły ciężkości platformy, a co przy niskich prędkościach jazdy może spowodować zatrzymanie lekkiego, a nawet średniego robota.
 - 3.3 Opracowanie wymagań w zakresie zdolności pokonywania przeszkód przez lekkie roboty inżynierskie i symulacyjna weryfikacja tych zdolności eksploatacyjnych. Analizy wykazały, że najkorzystniejszymi rozwiązaniami są kołowe systemy wieloosiowe wykorzystujące wózki jezdne oraz przegubowe układy skrętu.
 - 3.4 Przeprowadzenie badań stateczności wywrotnej alternatywnych rozwiązań platform bazowych lekkich robotów inżynierskich oraz wytypowanie rozwiązań o wysokiej stateczności, spełniających dodatkowo założone wymagania w zakresie manewrowości oraz zmiennych obciążeń.
 - 3.5 Opracowanie metody do badań porównawczych manewrowości robotów inżynierskich pod kątem ich zdolności realizacji typowych zadań. Metoda ta wykorzystuje zarówno wskaźniki techniczne jak i oceny subiektywne. Badania wykazały różnice w zakresie percepcji systemów skrętu, systemów sterowania oraz pola widzenia. Rezultaty badań wykazały, że najwyższy potencjał użytkowy mają platformy przegubowe, wymagają jednak poprawy intuicyjności sterowania dla niedoświadczonych operatorów.
 - 3.6 Opracowanie własnej metody oceny układów konstrukcyjnych tej klasy obiektów, która ogranicza wpływ czynników subiektywnych i dokonuje właściwej oceny zdolności realizacji zadań mobilnych robotów inżynierskich.

Metoda ta została zdefiniowana przez Habilitanta jako metoda zdolności krytycznych.

- 3.7 Wykazanie na podstawie badań eksploatacyjnych, że największy wpływ na efektywność realizacji zadań w trybie teleoperacji ma świadomość sytuacyjna i akcyjna, budowana głównie na podstawie informacji dostarczanych przez system zobrazowania otoczenia. Bardzo duży wpływ na efektywność realizacji zadań, zwłaszcza przez operatorów o niskim doświadczeniu mają również systemy sterowania, które powinny być intuicyjne i umożliwiać precyzyjne sterowanie mimo zakłócających drgań.
- 3.8 Opracowanie wytycznych do projektowania systemów zobrazowania otoczenia robotów mobilnych i dowolnych platform bezzałogowych.

3. Ocena dorobku naukowego i dydaktycznego oraz działalności organizacyjnej Kandydata

3.1 Ocena dorobku naukowego

3.1.1 Osiągnięcia Habilitanta przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

Mgr inż. Marian Łopatka po studiach magisterskich, które ukończył na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej w specjalności „Maszyny Inżynieryjne”, został skierowany do służby w jednostkach inżynieryjnych. Pełnił tam obowiązki dowódcy plutonu mostów składanych, dowódcy plutonu maszyn inżynieryjnych oraz dowódcy kompanii technicznej maszyn do prac ziemnych, maszyn do budowy dróg, sprzętu do wiercenia studni oraz wydobywania i oczyszczania wody, elektrownie siłowe oraz oświetleniowe, maszyn do zmechanizowanej obróbki drewna oraz sprzętu mechanizującego prace ręczne. Podczas tej służby Kandydat zdobył praktyczne doświadczenie w zakresie organizacji prac inżynieryjnych, budowy, eksploatacji i napraw sprzętu oraz szkolenia operatorów. Dzięki temu łatwo włączył się w prace badawcze realizowane w Katedrze Maszyn Roboczych Wydziału Mechanicznego WAT po objęciu stanowiska starszego inżyniera a później asystenta naukowo – dydaktycznego.

W tamtym okresie wygłosił 1 referat samodzielny i 3 referaty współautorskie z zakresu nadążności hydrostatycznych układów napędowych.

3.1.2 Osiągnięcia Habilitanta po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Habilitant po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych został zatrudniony w Katedrze Maszyn Roboczych Wydziału Mechanicznego Wojskowej Akademii Technicznej na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego i wraz z zespołem, kontynuował badania nad dynamiką hydrostatycznych układów napędowych i obciążeniami układów napędu jazdy. Badania dotyczyły m.in. możliwości zastosowania napędów hydrostatycznych w układach napędowych spycharek gąsienicowych i szybkobieżnych pojazdów amfibijnych. Wyniki tych badań zaowocowały 1 referatem na konferencji międzynarodowej, 14 referatami na konferencjach krajowych oraz 3 współautorskimi artykułami w punktowanych czasopismach.

Za osiągnięcia badawcze w tej dziedzinie Kandydat został wyróżniony w 1997 r. zespołową Nagrodą Rektora WAT za „Opracowanie podstaw projektowania hydrostatycznych układów napędu jazdy maszyn urabiająco-transportujących”.

Od 1999 r. Habilitant rozpoczął kierowanie własnymi projektami badawczymi, głównie z obszaru obronności i bezpieczeństwa państwa. Niestety niektóre wyniki tych badań, z uwagi na ich wrażliwość i wpływ na bezpieczeństwo i obronność kraju, z mocy prawa są zastrzeżone i nie mogą być publikowane.

Pierwsze cztery kierowane przez Kandydata projekty dotyczyły możliwości ograniczenia zjawisk „galopowania” i „wężykowania” kołowych maszynach przegubowych. Nadrzędnym celem tych projektów było opracowanie podstaw kształtowania szybkobieżnych kołowych maszyn przegubowych.

Efektom podjętych prac było 17 publikacji w punktowanych czasopismach krajowych, 5 publikacji w punktowanych czasopismach międzynarodowych, 10 referatów na konferencjach międzynarodowych i 10 referatów na konferencjach krajowych.

Głównym osiągnięciem zrealizowanych przez Kandydata badań zjawiska „galopowania” było wykazanie, że możliwe jest 2-krotnie obniżenie przyspieszeń zredukowanych i 4-krotne obniżenie przyspieszeń poziomych (główny problem w zjawisku „galopowania”) działających na operatora. Wymaga to jednak zwiększenia rozstawu osi o przynajmniej 50%, obniżenia położenia kabiny operatora o min. 0,5 m oraz zastosowania ogumienia o niższej sztywności promieniowej. Jest to korzystne z punktu widzenia rozwijania wysokich sił uciągu na podłożach gruntowych. W efekcie z punktu widzenia stateczności wzdłużnej, możliwe jest na dobrej jakości drogach zwiększenie prędkości przejazdowych szybkobieżnych maszyn wojskowych do 50÷60 km/h.

Natomiast do osiągnięć Kandydata w zakresie badań nad zjawiskiem „wężykowania” maszyn przegubowych z hydrostatycznymi układami skrzętu należy zaliczyć wykazanie, że zastosowanie w szybkobieżnych maszynach inżynierskich nowoczesnych układów skrzętu pracujących w systemie „load-sensing” jest niekorzystne. Takie rozwiązanie niestety pogłębia zjawisko wężykowania w wyniku wzrostu opóźnień w działaniu układu skrzętu. Zastosowanie oddzielnego napędu w układzie skrzętu oraz zmniejszenie wzmocnienia w układzie skrzętu, ogranicza zjawisko wężykowania. Za osiągnięcie należy uznać również wykazanie, że największe znaczenie dla procesu wężykowania ma percepcja operatora i jego usytuowanie w maszynie. Usytuowanie operatora przed przednim mostem zasadniczo zmienia jego percepcję położenia maszyny – przyspiesza wyczuwanie przemieszczeń poprzecznych i kątowych pozwalając na likwidację nawet niewielkich odchyłeń. W efekcie można stwierdzić, że z punktu widzenia stabilności układu skrzętu, możliwe jest rozwijanie przez maszyny przegubowe prędkości przejazdowych powyżej 60 km/h.

Habilitant w roku 2008 rozpoczął intensywne prace badawczo-rozwojowe w dziedzinie rozwoju robotów inżynierskich i platform bezzałogowych. Wszystkie 7 prac, którymi kierował Kandydat dotyczyły obronności i bezpieczeństwa państwa. Habilitant wraz z zespołem realizował też inne projekty z dziedziny i obronności państwa finansowane przez KBN i NCBiR.

W efekcie zrealizowanych prac pod kierunkiem Kandydata powstały unikalne w skali międzynarodowej rozwiązania demonstratorów robotów, między innymi ciężkiego robota inżynierskiego „MAREK”, średniego robota inżynierskiego „DROMADER” oraz członu transportowego ciężkiego robota do realizacji zadań w strefach zagrożenia „BOGUŚ”.

Opracowane rozwiązania konstrukcyjne robotów uzyskały uznanie na krajowych i międzynarodowych wystawach innowacji i zostały uhonorowane medalami, w tym dwoma złotymi.

Ponadto Habilitant za opracowanie projektu robota inżynierskiego „Marek”, otrzymał wraz z zespołem Nagrodę Rektora WAT w 2011 roku, a za projekt „Bezzałogowa platforma lądowa DROMADER z systemem zapobiegania radiowej detonacji ładunków IED” w 2013 roku otrzymał wraz z zespołem Nagrodę Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Reasumując, realizowane prace badawcze i badawczo-rozwojowe dla potrzeb wojska obejmowały problematykę projektowania ustrojów nośnych odpornych na oddziaływanie min, projektowania układów napędowych i jezdnych platform wysokiej mobilności, projektowania manipulatorów dostosowanych do realizacji zadań IED/EOD, projektowania systemów detekcji i rozpoznania zagrożeń, systemów zdalnego sterowania i teleoperacji oraz budowy świadomości sytuacyjnej i akcyjnej.

Habilitant jako osoba wiodąca brał też udział, z instytucjami cywilnymi, w projektach dotyczących maszyn rolniczych, przeznaczonych do pracy na terenach podmokłych i bagiennych, cechujących się zdolnościami do autonomicznej realizacji wybranych zadań. W efekcie realizacji tych dwóch projektów Kandydat opracował koncepcję i był głównym konstruktorem systemu przeładunkowego transportera i systemu sprzęgania z kombajnem oraz konsultantem podczas projektowania układu jezdnego oraz układu napędu jazdy. Opracowany system przeładunkowy umożliwia przejęcie z kombajnu pełnego kontenera z biomasą oraz dostarczenie na kombajn pustego pojemnika, bez konieczności zatrzymywania kombajnu zbierającego biomasę. Rozwiązanie jest oryginalne i nie ma odpowiedników na świecie.

Nowatorskie rozwiązania Habilitanta zrealizowane z zespołem zdobyły ochronę patentową. Kandydat obecnie jest współautorem 6 patentów, a 2 kolejne zgłoszenia patentowe uzyskały wstępną pozytywną ocenę Urzędu Patentowego.

Habilitant ze względu na swoją wiedzę i utylitarne osiągnięcia brał udział w pracach badawczo-rozwojowych różnego sprzętu inżynierskiego, w tym też mostów wojskowych. Prace te w znakomitej większości mają charakter niejawnny i nie mogły zostać opublikowane. Kandydat ponadto, ze względu na swoją pozycję zawodową, wykonywał także zamawiane ekspertyzy oraz opracowania na potrzeby Sił Zbrojnych dotyczące między innymi możliwości robotyzacji prac inżynierskich, koncepcji użycia ugrupowań robotów, wymagań operacyjnych dla robotów i maszyn inżynierskich, możliwości modernizacji maszyn inżynierskich oraz sprzętu lotniskowego, możliwości wprowadzania nowego sprzętu oraz porównywania dostępnych konstrukcji mostów wojskowych, maszyn do prac ziemnych, maszyn do budowy i pokonywania zapór, maszyn do mechanizacji prac ręcznych oraz mobilności maszyn i pojazdów wojskowych. Habilitant brał ponadto udział jako ekspert w opracowywaniu kolejnych edycji Wymagań Operacyjnych na sprzęt wojskowy. Za powyższe prace został wyróżniony przez Szefa Zarządu Wojsk Inżynierskich Sztabu Generalnego.

Kandydat aktywnie uczestniczy w procesie recenzowania publikacji w czasopiśmie międzynarodowych i krajowych. W latach 2013 – 2022 zrecenzował łącznie 17 publikacji naukowych w takich czasopiśmie jak: Energy, Sustainability, Actuators, Applied Science Journal of Marine Science and Engineering (MDPI), Automation in Construction, Journal of Terramechanics, Defence Technology (Elsevier) itp.

Ponadto dr inż. Marian Łopatka, w czasopiśmie Energies MDPI (IF za rok 2022 = 3,252), pełni funkcję redaktora wydania specjalnego (Special Issue Editor) pt. “Energetic Challenges

and Perspectives in Advanced Technologies of Hydraulic Systems”. Przykładowo aktualnie w wydaniu specjalnym opublikowanych zostało 9 publikacji.

Habilitant brał czynny udział w 12 konferencjach międzynarodowych oraz 27 konferencjach krajowych, na których wygłosił 4 referaty zamawiane. Ogółem jestem autorem i współautorem 66 referatów prezentowanych na konferencjach krajowych, 52 referatów na konferencjach międzynarodowych, 16 publikacji w punktowanych czasopismach międzynarodowych, 80 artykułów w punktowanych czasopismach krajowych oraz 19 rozdziałów w monografiach. Ponadto Kandydat jest redaktorem naukowym dwóch monografii z obszaru rozwoju robotów i robotyzacji prac inżynierskich.

3.2 Ocena aktywności naukowej albo artystycznej realizowanej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Habilitant w ramach działalności naukowej rozwijał swoje umiejętności i kompetencje poprzez prowadzenie badań, zwłaszcza eksperymentalnych, w nowych obszarach, poza macierzystą uczelnią w kraju i za granicą.

W Polsce, przykładowo Kandydat wraz z zespołem realizował projekty badawcze i ekspertyzy dla następujących instytucji, a mianowicie:

1. Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych (PIMR) w Poznaniu.

Zrealizowane projekty i ekspertyzy to:

- „Zintegrowana technologia ochrony obszarów wodno-błotnych przed sukcesją roślinności powodującej degradację środowiska przyrodniczego”.
- „Technologia i nowej generacji urządzenie wielozadaniowe do regeneracyjnego kształtowania otwartych cieków wodnych”.
- „Wykonanie ekspertyzy w aspekcie cech konstrukcyjnych kombajnu – ocenę sposobu realizacji sterowania hydraulicznego w urządzeniu wielozadaniowym do renowacji cieków wodnych”.
- „Wykonanie ekspertyzy oceniającej wykonanie dokumentacji technicznej modeli 3D oraz budowy prototypu”.

W wyniku zrealizowanych projektów powstały 4 publikacje oraz jeden patent.

2. Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych, Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz firmy Hydromega.

Zrealizowany projekt to:

- „Autonomiczna technologia transportu biomasy pozyskiwanej na chronionych obszarach wodno-błotnych”

3. Przedsiębiorstwa wielobranżowego „Pertotex” S.J. w Płocku

Zrealizowany projekt finansowany przez NCBiR to:

- „Zwiększenie konkurencyjności Spółki Petrotex poprzez badania przemysłowe i rozwojowe”.

4. Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Urządzeń Mechanicznych OBRUM Gliwice

Zrealizowany projekt finansowany przez NCBiR to:

- „Platforma średnia (800 kg)”.

Habilitant w ramach współpracy międzynarodowej z firmami i ośrodkami badawczymi przygotował i zrealizował kilka projektów badawczych z obszaru bezpieczeństwa i obronności państwa, finansowanych przez Europejską Agencję Obrony (EDA), EDA (European Defence Agency) oraz przez EDF (European Defence Fund). Kandydat wraz z innymi zespołami koordynował również badania poligonowe w Austrii.

Ponadto dr inż. Marian Łopatka w ramach współpracy międzynarodowej aktywnie uczestniczy w programie The European Land Robot Trial ELROB i Military ELROB – polegającym na udziale w warsztatach, testach poligonowych robotów oraz w opracowywaniu metodyk badawczych i testów. Program organizowany jest przez: German Federal Armed Forces, Fraunhofer Institute for Communication, Information Processing and Ergonomics FKIE, The Austrian Armaments and Defence Technology Agency (ADTA), NATO IST-058 / RTG-024 i stowarzyszenie European Robotics.

Ponieważ metody testowania są bardzo istotnym elementem badań, w celu ich doskonalenia Kandydat nawiązał również współpracę z amerykańskim National Institute for Standardisation (NIST - USA). Celem współpracy jest rozwój międzynarodowych standardów testowania robotów w NATO ze szczególnym ukierunkowaniem na zwalczanie zagrożeń IED/EOD (*Improvised Explosive Device/Explosive Ordnance Disposal*).

Kandydat w ramach współpracy międzynarodowej odbył 2 zagraniczne staże szkoleniowe, w ramach Erasmus+ HE Staff Mobility Agreement for Training oraz staż o charakterze rozwojowo-innowacyjnym realizowany w ramach projektu „Zarządzanie własnością intelektualną – klucz do sukcesu w relacjach nauki z biznesem”. Podczas staży nawiązał współpracę z University of Maribor (Słowenia), University of Oulu (Finlandia) oraz z University of Ljubljana (Słowenia). Kontakty te są podtrzymywane z zespołem dr. inż. Mariana Łopatki i rozwijane m.in. w ramach warsztatów M-ELROB. Obecnie trwają przygotowania wspólnego projektu dotyczącego rozwoju autonomicznych koparek jednonaczyniowych.

3.3 Ocena osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

Habilitant w roku 1990 rozpoczął działalność dydaktyczną na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej - po zmianie stanowiska ze starszego inżyniera w Instytucie Maszyn Roboczych na stanowisko asystenta naukowo-dydaktycznego. W ramach działalności dydaktycznej prowadził i prowadzi wykłady, ćwiczenia i laboratoria z wielu przedmiotów związanych między innymi: z teorią ruchu platform lądowych i pływających, terramechaniką, dynamiką maszyn, układami i urządzeniami hydraulicznymi czy też pneumatycznymi, silnikami napędowymi, maszynami fortyfikacyjnymi, drogowymi i do budowy lotnisk, podstawami konstrukcji maszyn, geometrią wykreślną itp.

Dla studentów Szkoły Doktorskiej Kandydat prowadzi również wykłady i ćwiczenia.

Dr inż. Marian Łopatka jest współautorem podręcznika akademickiego pt. „Podstawy Konstrukcji Maszyn z CAD. Cz. 4. Modelowanie Ruchu Maszyn”. WAT, Warszawa 2005, którego współautorem jest prof. Stanisław Konopka.

Kandydat brał też czynny udział w opracowywaniu programów studiów na kierunku mechanika i budowa maszyn oraz był jednym z inicjatorów uruchomienia nowego kierunku studiów – Inżynieria Systemów Bezzałogowych – jako wspólnego przedsięwzięcia Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa WAT.

Habibant jest promotorem 111 prac dyplomowych, w tym 49 prac magisterskich i 62 prac inżynierskich. Jego dyplomaci dwukrotnie byli nagradzani Nagrodą Rektorską i zdobywali liczne wyróżnienia w ramach konferencji Kół Naukowych Studentów. Należy podkreślić duże zaangażowanie Kandydata w rozwój naukowy kadry. Był On promotorem pomocniczym 3 obronionych pomyślnie prac doktorskich.

Za osiągnięcia dydaktyczne został wyróżniony zespołową nagrodą Ministra Obrony Narodowej (2016) oraz zespołową Nagrodą Rektorską (2006) za „Opracowanie kompleksowej modernizacji procesu nauczania Podstaw Konstrukcji Maszyn z CAD”.

Habibant od 1999 do 2022 roku pełnił funkcję kierownika Zakładu Maszyn Inżynieryjnych, Zakładu Taktyki i Techniki Wojsk Inżynieryjnych oraz Zakładu Maszyn Inżynieryjnych i Robotów. Przeprowadził w tym czasie zaawansowaną modernizację wielu pracowni dydaktycznych inwestując w stanowiska badawcze i nowoczesny sprzęt pomiarowy. Ponadto roboty zbudowane w trakcie realizacji prac badawczych, jak: „Marek”, „Dromader”, „Rohatyniec”, „Mule” oraz „Kuna”, oraz stanowiska do teleoperacji manipulatorami i platformami bezzałogowymi również są wykorzystywane w procesie dydaktycznym. Obecnie Habibant jest kierownikiem, utworzonego w tym roku, międzywydziałowego Centrum Robotów Mobilnych i Platform Bezzałogowych WAT, które to Centrum koordynuje badania w uczelni w zakresie platform bezzałogowych oraz jest zapleczem dla nowego kierunku studiów Inżynieria Systemów Bezzałogowych.

W ramach działalności Centrum Kandydat był organizatorem pierwszej konferencji „Bezzałogowe Systemy Autonomiczne – Unmanned Autonomous Systems” (WAT, 25.11.2022 r.). Ponadto był organizatorem 9 sympozjów tematycznych i jednej konferencji, poświęconych rozwojowi maszyn inżynieryjnych, robotów inżynieryjnych oraz robotyzacji prac inżynieryjnych.

W ramach popularyzacji tematyki robotów mobilnych wielokrotnie wystawiał opracowane w swoim zespole roboty na Międzynarodowym Salonie Przemysłu Obronnego (MSPO - Kielce), Targach Pro Defence (TPD - Ostróda) oraz Warsaw Industry Week (WIW - Nadarzyn).

Dr inż. Marian Łopatka jestem również autorem i współautorem 29 artykułów popularno-naukowych (w tym 15 indywidualnych) tematycznie poświęconych między innymi: rozwojowi technologii robotycznych i możliwych zastosowań robotów mobilnych, poświęconym nowym rozwiązaniom konstrukcyjnym maszyn inżynieryjnych, doborowi maszyn inżynieryjnych do realizowanych zadań, zasadom eksploatacji maszyn, efektywności trałowania, metodom wykonywania przejść w polach minowych i możliwościom wykorzystania w tych pracach ugrupowań robotów oraz konstrukcji mostów wojskowych jak również możliwościom zwiększenia zdolności pokonywania przeszkód wodnych.

Kandydat jest ekspertem wspierającym dla przedstawiciela rządowego w Radzie ds. Nauki i Technologii NATO STO (panel Applied Vehicle Technology C.1.A) oraz ekspertem wspierającym dla przedstawiciela rządowego, w Europejskiej Agencji Obrony, w Panelu

Ground System CapTechLsnd (J.8.) oraz członkiem International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS) (od roku 1999). Pracuje również w Polskim Komitecie Normalizacyjnym (Komitet Techniczny KT-13, Maszyn do Robót Ziemnych i Drogowych oraz Żurawi Samojezdnych).

4. Wniosek końcowy

Oceniając całokształt dorobku dr. inż. Mariana Janusza ŁOPATKI a w szczególności Jego osiągnięcie naukowe zaprezentowane w monografii pt. „*Problemy mobilności robotów inżynierskich*”, opublikowany dorobek naukowy i oryginalny bogaty dorobek aplikacyjny, aktywność naukową w kraju i za granicą, dorobek dydaktyczny oraz działalność organizacyjną **stwierdzam, że Kandydat znacząco powiększył swój dorobek po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych, który stanowi znaczny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.**

Kandydat w pełni spełnia wymagania wynikające z warunków wymienionych w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz.U. Nr 65 poz. 595, zm. Dz.U. z 2005 r. Nr 164, poz. 1365) i Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 października 2015 r., w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora, a także przepisy określone w rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 r. (Dz.U. 196 poz. 1165) oraz zalecenia Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów.

Recenzent jest pełen uznania dla Kandydata za Jego oryginalny interdyscyplinarny dorobek naukowo - badawczy a przede wszystkim obszerny nowatorski, w skali międzynarodowej, dorobek aplikacyjny. Autor, kierując zespołem, na podstawie analizy stanu wiedzy i techniki na świecie oraz własnych badań symulacyjnych a przede wszystkim złożonych i pracochłonnych badań eksperymentalnych, głównie w warunkach eksploatacyjnych, opracował metodę racjonalnego - kształtowania mobilnych robotów inżynierskich. Przyjęte główne kryteria to zapewnienie wysokiej mobilności robotów inżynierskich oraz ich zdolności do realizacji zadań technicznych z wysoką efektywnością. Na podstawie tej wiedzy zbudowano z sukcesem innowacyjne, w skali międzynarodowej, roboty inżynierskie do różnorodnych zastosowań wojskowych. Należy podkreślić, że zgodnie aktualnymi trendami systemy tego rodzaju znajdą w najbliższym czasie szerokie zastosowanie w wielu obszarach techniki, nie tylko militarnej.

Uważam, że działalność naukowo- badawcza a przede wszystkim uzyskane wybitne wyniki aplikacyjne dr. inż. Mariana Janusza Łopatki, z dużą korzyścią dla naszego kraju, są znakomitą przykładem innowacyjnej strategii w nauce, który to przykład powinien być wskaźnikiem dla innych ośrodków naukowo-badawczych w Polsce.

Mając na względzie powyższe argumenty, rangę rozwiązywanych problemów z sukcesem aplikacyjnym w Siłach Zbrojnych RP i innych obszarach gospodarki, oryginalność prac oraz profesjonalizm i kreatywność Kandydata jak również Jego wysoką pozycję w kraju i za granicą, **wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej**

Akademii Technicznej o rozważenie wyróżnienia pracy.

Reasumując wnoszę o przyjęcie dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr. inż. Mariana Janusza ŁOPATKI jako podstawy do nadania Jemu przez Radę Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie stopnia naukowego *doktora habilitowanego* w dziedzinie nauk technicznych i w dyscyplinie „Inżynieria Mechaniczna”.

 Piotr Dudziński