

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

Wrocław, 29.04.2019

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Zawadzkiego nt. „Analiza
i modelowanie energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleτών”**

wykonanej pod kierunkiem
dr. hab. inż. Zbigniewa Żebrowskiego, prof. PW

Podstawa wykonania opinii: pismo SIMR-29/5/2019 z dnia 01.03.2019
Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki
Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Stanisława Radkowskiego

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Permanentnie realizowane prace badawcze, zmierzające do wykreowania metod odciążania człowieka, przede wszystkim w celu zwiększenia jego wydajności oraz wyeliminowania urazów spowodowanych nadmiernym obciążeniem mięśni i stawów, doprowadziły do opracowania tzw. egzoszkieleτών. Tego rodzaju innowacyjne rozwiązania opracowano pierwotnie z myślą o pracownikach stoczni lecz głównym zainteresowanym i odbiorcą, dynamicznie rozwijanych w tym zakresie aplikacji, jest przede wszystkim armia, w której żołnierz wyposażony w najnowocześniejsze technologie jest/będzie niczym robot na współczesnym polu walki. Przykładowo amerykański koncern Lockheed Martin opracował innowacyjny system Fortis – lekki o masie ok. 12 kg egzoszkieleć odwzorowujący ruchy ludzkiego ciała. Rozwiązanie to, testowane głównie wśród pracowników fizycznych marynarki USA, nie wymaga zasilania a umożliwia przenoszenie przedmiotów o masie dochodzącej do 16 kg bez najmniejszego wysiłku dla człowieka wyposażonego w ten sprzęt. Natomiast wersja militarna Onyx jest egzoszkieletem dolnej partii ciała, wyposażonym już w zasilanie zewnętrzne, który ma pomagać żołnierzowi dźwigać ekwipunek.

O skali zainteresowania rynku tą innowacyjną technologią mówią na przykład opracowania Winter Green Research, która szacuje, że globalny rynek egzoszkieleτών – o ile w 2014 roku był wart 43,3 milionów dolarów, o tyle do 2020 sięgnie 1,8 miliardów dolarów.

W stanie wiedzy i techniki istnieje jednak szereg luk poznawczych w zakresie optymalnego kształtowania energooszczędnych egzoszkieleatów a przede wszystkim brak jest obiektywnej metody weryfikacji opracowanego nowego rozwiązania konstrukcyjnego.

Pan mgr inż. Adam Zawadzki wychodząc naprzeciw pilnym potrzebom rynku a przede wszystkim potrzebom polskiej armii, podjął się próby opracowania metody kształtowania innowacyjnych energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleatów dolnych partii człowieka, wraz z autorską procedurą ilościowej weryfikacji tych rozwiązań. Autorską procedurę weryfikacji ergonomii konstrukcji energooszczędnych egzoszkieleatów Doktorant przeprowadził za pomocą modelowania i wirtualnego nakładania modeli człowieka i egzoszkieleatu.

Należy podkreślić, że przedłożona praca doktorska powstała z inspiracji zrealizowanego projektu badawczo-rozwojowego nr DOBR/0037/R/ID1/2012/03 NCB RiR „Egzoszkieleat kompatybilny z systemem przenoszenia Indywidualnych Systemów Walki TYTAN”.

Uważam, że tematyka rozprawy jest bardzo aktualna, oryginalna a przede wszystkim posiada, ze względu na swoją interdyscyplinarność, istotne walory poznawcze i uytylitarne uzupełniające dotychczasowy znany dorobek w tym zakresie.

2. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY I UWAGI Dyskusyjne

Rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Zawadzkiego zajmuje 181 stron i składa się z 13 rozdziałów, w tym zawarte są: streszczenie, spis treści, bibliografia oraz załączniki.

Rozdział 1 stanowi streszczenie pracy doktorskiej.

W **rozdziale 2**, stanowiącym wprowadzenie do rozprawy doktorskiej, Doktorant przedstawia historię rozwoju egzoszkieleatów i ich klasyfikację, wyróżniając przy tym między innymi *egzoszkieleaty równoległe* – działające równoległe do wspomaganych kończyn i mające zarazem z użytkownikiem tylko dwa punkty wspólne: początkowy i końcowy oraz *egzoszkieleaty przyległe*, w których każdy element mechanizmu porusza się po trajektorii jak najbardziej zbliżonej do tej wykonywanej przez człowieka. Ponadto wyróżniono *egzoszkieleaty pasywne*, które mogą posiadać elementy wykonawcze ale nie mają źródła energii i układu sterowania oraz *egzoszkieleaty aktywne*, które posiadają elementy wykonawcze, źródło energii oraz układy sterowania. Autor wskazuje, że wspomaganie ruchów zdrowego człowieka za pomocą egzoszkieleatu jest zadaniem zdecydowanie trudniejszym od egzoszkieleatów rehabilitacyjnych. W związku z tym, że problematyka egzoszkieleatów jest synergią mechaniki, robotyki i medycyny Doktorant definiuje podstawowe pojęcia, głównie biomechaniczne. W dalszej części, na podstawie publikowanych prac z ostatnich 10 lat, został zaprezentowany przegląd stanu wiedzy i techniki na świecie w aspekcie rozwiązań konstrukcyjnych, stosowanych napędów i interakcji człowiek - egzoszkieleat.

*Zdaniem recenzenta przegląd stanu wiedzy i techniki jest jednak rozproszony i nie usystematyzowany. Końcowe zestawienie wszystkich wariantów konstrukcyjnych egzoszkieleatów z przyporządkowaniem im wad i zalet, w aspekcie ich optymalnej interakcji z człowiekiem, stanowiłoby znakomitą bazę wyjściową do opracowania własnej koncepcji egzoszkieleatu. Ponadto w analizie biomechaniki kroczenia nie uwzględniono wpływu na przykład długości kończyny i długości kroku na energochłonność tego rodzaju lokomocji. Takie rozważania można znaleźć przykładowo: A. Gładysiewicz, P. Dudziński: „Wczoraj, dziś i jutro lokomocji lądowej. Właściwości lokomocyjne istot żywych i mobilnych środków transportowych” *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, Nr 2/2005.*

W końcowej części **rozdziału 2** Doktorant opisuje początkowe badania własne w zakresie rozwiązania problemu ergonomii egzoszkieleatu za pomocą druku 3D. Takie podejście zdefiniowano jako metodę najslabszych elementów, gdyż zakładała ona pęknięcie ustroju nośnego w przekrojach przeciążonych. Przeciążenie było generowane przede wszystkim złym odwzorowaniem ruchu. Metoda ta w dalszych pracach została odrzucona, gdyż okazała się nieskuteczna dla rozpatrywanej klasy obiektów.

W rozdziale 3 mgr inż. Adam Zawadzki zmierzając do celu jakim jest analiza i modelowanie energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleatów **postawił tezę**, że cel ten można osiągnąć za pomocą specjalnej metody nakładania wirtualnych modeli człowieka i egzoszkieleatu, co umożliwi parametryczną weryfikację ergonomii wariantów konstrukcyjnych energooszczędnych egzoszkieleatów.

W rozdziale 4 zaprezentowano opis metodyki bazujący na algorytmie postępowania składającym się z następujących głównych zadań:

1. Rejestracja trajektorii przemieszczeń punktów referencyjnych usytuowanych na ciele człowieka dla przewidzianych scenariuszy działań operacyjnych (swobodny chód, trucht, wejście i zejście ze schodów).
2. Przetworzenie danych i stworzenie wirtualnego modelu człowieka w postaci 64 punktów poruszających się w czasie w układzie kartezjańskim, do których to punktów zamocowany jest ustrój egzoszkieleatu.
3. Sformułowanie wymagań w stosunku do konstrukcji egzoszkieleatu w formie głównych parametrów oceny ilościowej.
4. Wykonanie modeli 3D ustroju nośnego egzoszkieleatu.
5. Wirtualne nałożenie modeli człowieka i egzoszkieleatu. Posiadając wzorzec ruchu człowieka w postaci trajektorii przemieszczeń jego punktów referencyjnych należy je importować do programu CAD 3D.
6. Wykonanie symulacji.
7. Ocena czy wymagania sformułowane w zadaniu 3 są spełnione oraz dla której iteracji otrzymano najlepsze rezultaty.
8. Wykonanie egzoszkieleatu jako demonstratora technologii.
9. Badania polowe.

Badania były wykonywane za pomocą komercyjnie dostępnego nowoczesnego sprzętu i oprogramowania, znajdujących się w ciągłej sprzedaży, co pozwala na wykorzystanie metodyki przez innych badaczy. Również dokładność opisu technik

tworzenia modeli wirtualnych i ich nakładania pozwala na dość łatwe powtórzenie tej metody w innych projektach.

W rozdziale 5 zostały opisane dwa opracowywane rozwiązania konstrukcyjne egzoszkieleatów a mianowicie: z napędem bezpośrednim i pośrednim jak również zawarto opisy wybranych konfiguracji par kinematycznych egzoszkieleatu oraz przedstawiono inne autorskie rozwiązania wspomagające ruch człowieka. Do takich autorskich rozwiązań należy na przykład przegub stawu kolanowego, który został zgłoszony, przez Doktoranta wraz ze współtwórcami, jako wynalazek do Urzędu Patentowego RP.

Mimo przyjęcia przez Autora dysertacji racjonalnej metodyki w zakresie kształtowania egzoszkieleatów wspomagających możliwości wysiłkowe człowieka zabrakło recenzentowi w fazie projektowania konstrukcji mechanicznej zastosowania metody syntezy strukturalnej. Metoda ta, przy założeniu ilości członów, ilości par kinematycznych i ich klas umożliwia, w przeciwieństwie do metod intuicyjnych czy też metod prób i błędów, uzyskanie wszystkich możliwych rozwiązań oczekiwanych mechanizmów. Na potwierdzenie tej uwagi można dodać, że recenzent w swojej pracy badawczej stosował tą metodę uzyskując nowatorskie strukturalne konfiguracje poszukiwanych mechanizmów.

Rozdział 6 stanowi zwięzłą ocenę kluczowych własności różnorodnych rodzajów napędów. Ocenę tą, w sposób opisowy, zaprezentowano w postaci tabeli 6.1. Doktorant, po analizie wad i zalet poszczególnych napędów, zdecydował się na zastosowanie napędu hydraulicznego.

Zdaniem recenzenta w pracy doktorskiej powinna być obiektywna ocena ilościowa, na przykład dane dotyczące sprawności układów elektrycznych, hydraulicznych, pneumatycznych czy mechanicznych można znaleźć w literaturze.

W rozdziale 7 Doktorant opisuje podstawowe problemy sterowania napędem egzoszkieleatu. Autor omawia szerzej dwa rodzaje sterowania, z których jedno nazywa predykcyjnym a drugie nadążnym.

W algorytmie przedstawionym na rys. 7.4 na str. 78 Doktorant zastosował, zdaniem recenzenta, tradycyjny regulator ze sprzężeniem zwrotnym, którego sygnały pobierane są przetwornika siły w cylindrze hydraulicznym, przetwornika siły w stopie oraz przetwornika kąta obrotu biodra. Autor sterowanie to nazwał omyłkowo sterowaniem predykcyjnym. Zgodnie z fachową literaturą w sterowaniu predykcyjnym regulator dostosowuje swoje działanie z wyprzedzeniem, zanim nastąpią zmiany wielkości wyjściowych układu. Jest to metoda sterowania systemami dynamicznymi, polegająca na cyklicznym rozwiązywaniu zadania sterowania optymalnego, z warunkiem początkowym równym aktualnej estymacji stanu obiektu. Początkowa część znalezionej funkcji sterującej) podawana jest na wejście obiektu, po czym całą procedurę powtarza się dla nowego, aktualnie wyznaczonego stanu obiektu.

W zaprezentowanym w punkcie 7.2 sterowaniu nadążnym Doktorant przedstawił jeden algorytm wykorzystujący pomiar kątów ciała człowieka i egzoszkieleatu natomiast w drugim algorytmie wykorzystano pomiar przemieszczeń względnych

członów egzoszkieletu i człowieka. Ponadto zaprezentowano program sterujący ruchami egzoszkieletu oraz schemat układu hydraulicznego.

Zdaniem recenzenta interesująca jest informacja jakie zastosowano rozdzielacze proporcjonalne, na przykład firm Rexroth, Parker czy innej, w kontekście inercyjności sterowania układu.

W rozdziale 8 Doktorant zaprezentował w sposób bardziej szczegółowy założenia i budowę modeli symulacyjnych układów ze wspomaganiami i bez wspomaganiami. Modele te posiadają szereg założeń upraszczających, jak na przykład pary kinematyczne są więzami holonomicznymi (bez tarcia), cylindry hydrauliczne mają pomijalną masę i bezwładność oraz funkcjonują też bez tarcia czyli ze sprawnością 100%, itd.

W rozdziale tym autor przeprowadził ocenę wpływu badanego rozwiązania na globalną ergonomię użytkownika. Zrealizowano to za pomocą punktów referencyjnych, w których mierzono odległość pomiędzy egzoszkieletem a ciałem człowieka. Przyjęto założenie, że jeśli te odległości się nie zmieniają podczas ruchu to oznacza, że egzoszkielec idealnie kopiuje ruch człowieka.

Biorąc pod uwagę szereg założeń upraszczających w modelu symulacyjnym takie oczekiwania z reguły nie były spełnione.

W rozdziale 9 przedstawiono badania polowe opracowanego i wykonanego, w postaci demonstratora, egzoszkieletu. Wyniki tych badań porównano z wynikami badań innego rozwiązania, opracowanego wcześniej na podstawie innej koncepcji projektowej, w ramach projektu NCBiR. W badaniach oprócz oceny funkcjonalności rozwiązań mierzono przede wszystkim parametry fizjologiczne w aspekcie wydatku energetycznego człowieka posiłkując się wiedzą Wojskowego Instytutu Medycyny Lotniczej.

Rozdział 10 to wnioski i uwagi końcowe w zakresie zaprezentowanej metodyki, wykonanej części mechanicznej, układów napędowych i sterowania egzoszkieletem oraz jego interakcji z człowiekiem.

W rozdziale 11 Doktorant, wykorzystując zdobyte doświadczenie oraz znając tkwiące jeszcze w rozwiązaniu egzoszkieletu rezerwy, przedstawia perspektywy dalszego rozwoju tej ważnej klasy obiektów, w szczególności w aspekcie optymalizacji energetycznej oraz sterowania układem napędowym.

3. OCENA POZIOMU EDYTORSKIEGO

Praca, zdaniem recenzenta, jest zredagowana w sposób, który nie ułatwia recenzentowi śledzenia wkładu własnego Doktoranta. Jak wiadomo jest ona efektem projektu badawczo-rozwojowego nr DOBR/0037/R/ID1/2012/03 NCBiR „Egzoszkielec kompatybilny z systemem przenoszenia Indywidualnych Systemów Walki TYTAN”, który był projektem zespołowym. Dopiero dyskusja z Autorem, wyjaśniła w sposób jednoznaczny obszary jego istotnego własnego wkładu w przedłożoną rozprawę doktorską. Doktorant przedstawił recenzentowi również autorskie lub współautorskie publikacje, których nie zamieścił

w bibliografii pracy doktorskiej. Niektóre części dysertacji robią jednak wrażenie, zdaniem recenzenta, fragmentów z raportów projektu.

W przedłożonej monografii doktorskiej występuje również szereg potknięć stylistycznych i redakcyjnych, które nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką ocenę nowatorskiej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Adama Zawadzkiego. Uwagi z zakresu redakcji pracy i jej stylistyki oraz interpunkcji zostały/zostaną przekazane bezpośrednio Doktorantowi.

4. KONKLUZJA

Reasumując stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Adam Zawadzki podjął istotny, a zarazem złożony, z punktu widzenia kreowania innowacyjnych rozwiązań dla polskiej armii, problem kształtowania energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleatów dolnych partii człowieka.

Doktorant wykazał, że potrafi poprawnie sformułować zadanie naukowe, zrealizować szeroki wachlarz pracochłonnych interdyscyplinarnych badań eksperymentalnych i symulacyjnych. Na podkreślenie zasługują bardzo dobre umiejętności Autora pracy w zakresie symulacji procesów dynamicznych.

Do najważniejszych osiągnięć, zdaniem recenzenta, Pana mgr. inż. Adama Zawadzkiego należy zaliczyć:

- opracowanie metody kształtowania innowacyjnych energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleatów dolnych partii człowieka wraz z autorską procedurą ilościowej weryfikacji ergonomii tych rozwiązań za pomocą nakładania wirtualnych modeli człowieka i egzoszkieleatu,
- zrealizowanie imponującego programu interdyscyplinarnych poznawczych badań eksperymentalnych i symulacyjnych z zakresu mechaniki, mechatroniki i medycyny.
Badania te pozwoliły na identyfikację zjawisk i w związku z tym zdefiniowanie istotnych czynników mających wpływ na racjonalne kształtowanie energooszczędnych egzoszkieleatów, co zaowocowało budową demonstratora technologii z elementami nowatorskich, opatentowanych rozwiązań szczegółowych.

Recenzowana rozprawa zawiera szereg nowych interdyscyplinarnych wyników poznawczych, uzupełniając w tym zakresie stan wiedzy na świecie oraz wnosi przede wszystkim praktyczne oryginalne wnioski do praktyki wdrożeniowej.

Przytoczone, do dyskusji, uwagi recenzenta świadczą o interesującej zawartości pracy oraz jej wielowątkowości i nie umniejszają, moim zdaniem, wartości rozprawy.

Recenzent jest pełen uznania dla Doktoranta za Jego wyniki naukowo-badawcze w przedłożonej rozprawie doktorskiej, która stanowi bardzo wartościowy wkład do dyscypliny **Budowa i Eksploatacja Maszyn/Inżynierii Mechanicznej**

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Zawadzkiego nt. „Analiza i modelowanie energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleatów” spełnia bez zastrzeżeń warunki dla rozpraw doktorskich określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595 ze zmianą w Dz. U. z 20005 r. nr 164 poz. 1365) i może być przedmiotem publicznej obrony.

 Piotr Dziński

- 000001614 -
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
KATEDRA INŻYNIERII MASZYN ROBOCZYCH
I POJAZDÓW PRZEMYSŁOWYCH
Wyb. Wyspiańskiego 27. 50-370 Wrocław
NIP 8960005851 (1)