

dr hab. inż. Andrzej Typiak, prof. WAT
Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna
00-908 Warszawa

Warszawa 8.04.2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Zawadzkiego pt.: „Analiza i modelowanie energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleτών”

Promotor. dr. hab. inż. Zbigniew Żebrowski, prof. PW

Promotor pomocniczy dr inż. Tomasz Mirosław

Recenzja została wykonana dla Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechniki Warszawskiej, na podstawie pisma Dziekana Wydziału
Pana prof. dr. hab. inż. Stanisława Radkowskiego z dn. 6. 02. 2019 r.

1. Zagadnienia naukowe i naukowo-techniczne rozpatrywane w pracy, aktualność tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wynikiem prac naukowo-badawczych i jest mocno powiązana z nowoczesnymi technikami mechaniki elektroniki oraz hydrauliką i pneumatyką. Dotyczy ona ważnego z punktu poznawczego i aplikacyjnego zagadnienia związanego z opracowaniem metodyki projektowania egzoszkieleτών pod kątem mechanicznych rozwiązań członów kinematycznych, oraz doboru układu napędowego wraz z procedurą weryfikacji projektu na drodze modelowania i wirtualnego nakładania modeli człowieka i egzoszkieletu.

Cel pracy przedstawił Autor na stronach 40 – 41 rozprawy. Jest to cel w pełni uzasadniony ujmujący analizę i modelowanie energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleτών oraz wyłonienie rozwiązania, oraz przeprowadzenie badań.

Tematyka egzoszkieleτών jest zagadnieniem łączącym dziedziny mechaniki, robotyki i medycyny. Ze względu na niewątpliwą mnogość zastosowań i brak dotychczas opracowanego optymalnego rozwiązania, jest ona często podejmowana, jednak proponowane rozwiązania są jeszcze bardzo często na etapie prototypów.

Należy mieć na uwadze podstawowy podział konstrukcji definiowanych jako egzoszkielety na wymuszające ruch kończyn człowieka – stosowane w medycynie i rehabilitacji oraz wzmacniające siłę mięśni kończyn człowieka, będące obecnie głównie w obszarze zainteresowań wojskowych.

Wspomaganie ruchów zdrowego człowieka za pomocą egzoszkieletu jest zagadnieniem zdecydowanie trudniejszym od wymuszania czy korygowania ruchów osoby niepełnosprawnej. Należy bowiem z dużą dokładnością odwzorowywać trajektorie ruchów

kończyn. W przeciwnym przypadku użytkownik będzie zużywał część swojej energii na pokonanie oporów ruchu egzoszkieletu. Jest to jeden z największych problemów związanych z budową egzoszkieletu. Istniejące rozwiązania są rozwiązaniami kompromisowymi pomiędzy prostotą budowy układów napędowych członów mechanizmu, a ergonomią użytkownika egzoszkieletu,

Dlatego uważam, że podjęta tematyka badań możliwości rozwoju egzoszkieleatów zwielokrotniających siłę i prędkość poruszania się człowieka jest bardzo aktualna i potrzebna. Rozważane w pracy zagadnienia mogą przyczynić się do zwiększenia ludzkich możliwości.

2. Krytyczna analiza rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim. Treść pracy jest zgodna z jej tytułem. Rozprawa składa się z jedenastu numerowanych rozdziałów, bibliografii, oraz załączników, którymi są karty badań z wynikami i opracowanie założeń konstrukcyjnych. Podział treści rozprawy na następujące po sobie spójne rozdziały odpowiada naturalnemu tokowi przeprowadzonych badań. Każdy rozdział rozprawy poprzedzony jest krótkim, rzeczowym wprowadzeniem do jego zawartości.

Rozdział pierwszy to zawarte na jednej stronie streszczenie niniejszej pracy.

We wprowadzeniu (rozdział 2. pracy) Autor podjął się umotywowania zasadności podjęcia tematu. Omawia w nim problematykę projektowania egzoszkieleatów kończyn dolnych dla zdrowego człowieka i przedstawia zasadnicze różnice w porównaniu do konstrukcji rehabilitacyjnych. Ponadto zostały zdefiniowane podstawowe pojęcia używane w pracy. W dalszej części został zaprezentowany przegląd stanu wiedzy wraz wynikami analiz i badań czołowych ośrodków zajmujących się tą tematyką.

Zawarty w rozprawie spis literatury obejmuje 49 pozycji, z czego 39 w wydaniu papierowym. Cała analizowana literatura została wydana i opublikowana po roku 2005. Wśród literatury 7 pozycji to raporty z realizacji projektów badawczych w tym w czterech z nich Doktorant był Wykonawcą. Wśród cytowanej literatury nie ma podanych tytułów referatów i artykułów autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, będących efektem realizowanych projektów. Uniemożliwia to określenie zakresu prac realizowanych przez Doktoranta w tych projektach.

W zawartych w punkcie 2.3.6 wnioskach z analizy publikowanych wyników badań stanowiskowych przedstawiono problematykę poruszaną w rozpatrywanych pozycjach literaturowych, brak jest krytycznej analizy Autora odnośnie przytaczanych rozwiązań.

Punkt 2.4 zdaniem Autora zawiera Problemy konstrukcji egzoszkieleatów, lecz przedstawiono w nim opisy budowy anatomicznej głównych stawów kończyny dolnej człowieka. Na jej podstawie można określić istotne problemy niezbędne do rozwiązania przy konstrukcji egzoszkieleatu. Tego jednak w tym punkcie rozprawy nie umieszczono.

W punkcie 2.5 „Sformułowanie problemu naukowo - badawczego” Autor podaje, że „Problemem badawczym jest opracowanie metodyki postępowania minimalizującej ryzyko kontuzji przy jednoczesnym jednoznacznym – parametrycznym określeniu zgodności projektu z wymaganiami.” Zdaniem recenzenta opracowanie kryterium i metodyki pozwalającej na parametryczne zdefiniowanego kryterium zgodnego z fizycznymi

odczuciami człowieka posługującego się urządzeniem mechanicznym nie bazujące na odczuciach subiektywnych jest problemem naukowym. Ale należy szczególnie ważkim zagadnieniem staje się problematyka oceny odczuć subiektywnych.

W rozdziale 3. Autor podaje, że „Celem pracy jest analiza i modelowanie energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleatów. W wyniku przeprowadzonych analiz zostanie wyłonione najlepsze rozwiązanie, które będzie wykonane w rzeczywistości i przebadane fizycznie.”

W trakcie czytania rozprawy nasuwają się pewne nieścisłości, na str. 151 Autor podaje „Opracowane rozwiązania kinematyki i napędów skupione były głównie na spełnianiu powierzonych im funkcji i niewpływaniu negatywnie na inne elementy układu.”

Przestawiony w rozdziale 4 pt.: „Opis metodyki weryfikacji ergonomii” na rys. 4.1 schemat, prezentuje harmonogram realizacji pracy. Jest to raczej algorytm postępowania, będący częścią metodyki.

Punkt „4.3. Analiza wymagań na egzoszkieleat” - zawiera określenie wymaganych zakresów i prędkości ruchu w wybranych stawach egzoszkieleatu. Nie zamieszczono żadnych wymagań odnośnie całej konstrukcji.

Przedstawiony w rozdziale piątym opis **konstrukcji mechanicznej** ukierunkowany jest na opisy wybranych konfiguracji par kinematycznych egzoszkieleatu wspomagające ruch człowieka. Na wstępie Autor podaje, że „W niniejszym rozdziale zostały opisane dwie opracowywane konstrukcje egzoszkieleatów. Została omówiona kinematyka układów w odniesieniu do wzorcowej, jaką jest kinematyka człowieka. Przedstawiono kilka koncepcji, wraz z omówieniem ich wad i zalet oraz wskazaniem tych najbardziej odpowiednich. Wskazano i omówiono również miejsca mocowania napędów. Analizowane są dwie różne konstrukcje ze względu na sposób przekazywania napędu. W jednej jest on bezpośredni, natomiast w drugiej pośredni. Wymusza to zmiany w układzie mechanizmu, aby móc maksymalnie wykorzystać zalety obu rozwiązań.” W treści rozdziału zamieszczono jedynie opis jednego rozwiązania

W rozdziale 6. Analiza rozwiązań napędów Autor podaje, że : „Na podstawie wyników prac w ramach projektu NCBiR pt. „Egzoszkieleat kompatybilny z systemem przenoszenia indywidualnych systemów walki TYTAN” opisanych w raportach (Mirosław i in. 2016, Zboiński i in. 2016) stworzono bazę możliwości zastosowania różnych typów napędów. Zwięzłe podsumowanie zamieszczono w poniższej tabeli 7.1.”

W przytoczonym zestawieniu zawarte są wartości opisowe np. sprawność wysoka, dynamika układu przeciętna. Trudno na tej podstawie określić jak odnoszą się one do celu zawartego w pracy. W ramach realizacji pracy pożądane wydaje się przypisanie tym wartościom opisowym zakresów liczbowych.

W przedstawionych w rozdziale 7. Podstawowych problemach sterowania napędem egzozszkieletu, Autor skupił się na dwóch rodzajach sterowania predykcyjnym i nadążnym. Wątpliwości budzi stwierdzenie, że opisane w rozdziale 7.1 sterowanie, którego algorytm przedstawiono na rys. 7.4 jest sterowaniem predykcyjnym. W opisanym rozwiązaniu nie jest obliczane położenie na podstawie modelu dynamicznego. Autor zastosował regulator ze sprzężeniem zwrotnym, którego sygnał pobierany jest czujnika siły.

W opisanym w pkt. 7.2 sterowaniu nadążnym Dyplomant przedstawił dwa algorytmy sterowania jeden w oparciu o pomiar kątów drugi o pomiar przemieszczeń, program sterujący ruchami egzozszkieletu i schemat układu hydraulicznego napędu.

W streszczeniu (str. 11) Autor podaje, że w rozdziale 7. omówiono przebadane konfiguracje napędzania kończyn z podziałem na stawy biodrowy, kolanowy i skokowy. Z tego rozdziału wynikają założenia do kolejnego rozdziału. Jednak Recenzent nie odnalazł w rozprawie zamieszczonych wyników badań rozpatrywanych układu sterowania, ani też ich analizy w aspekcie budowy energooszczędnych rozwiązań egzozszkieletów.

W tym rozdziale opisano metodę zbierania danych odnośnie ruchu człowieka oraz program komputerowy, który steruje powstałą konstrukcją rzeczywistą.

W rozdziale 8 przedstawiono **budowę i strojenie modeli komputerowych**. Autor opisał szczegóły budowę modeli symulacyjnych ergonomii w różnych wersjach, oraz przedstawił porównanie wyników badań symulacyjnych układów ze wspomaganiami oraz bez wspomaganiami ruchu. Jest to kluczowy rozdział rozprawy, na jego podstawie przeprowadzono ocenę wpływu badanego rozwiązania na całkowitą ergonomię użytkownika. Zrealizowano to za pomocą zdefiniowanych w wybranych punktach parametrów związanych z pomiarem odległości między konstrukcją, a ciałem człowieka. Przyjęto założenie, że jeśli taka odległość się nie zmienia podczas ruchu, to znaczy, że konstrukcja idealnie kopiuje ruch znajdującego się w niej użytkownika.

Końcowym etapem prac były **badania polowe opracowanej i wykonanej konstrukcji przedstawione w rozdziale 9**. Autor dokonał porównania do wcześniejszego rozwiązania, opracowanego w ramach projektu NCBiR przy wykorzystaniu odmiennego podejścia projektowego. Zdaniem Recenzenta powinno być określenie w oparciu o jakie założenia był budowany egzozszkielet w projekcie.

Zwieńczeniem pracy są **wnioski i uwagi końcowe przedstawione w rozdziale 10** odnośnie prezentowanej metodyki projektowania oraz samej konstrukcji, która powstała w efekcie jej wykorzystania.

Na samym końcu przedstawiono **perspektywy dalszego rozwoju tematyki** związane z problemami, których nie udało się na tym etapie pracy jeszcze rozwiązać.

Wybór tak określonej tematyki badawczej, jako przedmiotu rozprawy doktorskiej, w kontekście także cytowanej przez Autora literatury, uważam za w pełni uzasadniony i stwierdzam, że Autor swoją rozprawą zrealizował ważne badania w opisanych wyżej aspektach.

3. Metoda badawcza i oryginalny dorobek Autora

Celem pracy była **analiza i modelowanie energooszczędnych rozwiązań egzoszkieleatów**. Podstawowym problemem w rozwijaniu konstrukcji egzoszkieleatów jest brak ilościowej (niesubiektywnej) metody weryfikacji ich konstrukcji, w związku z tym konieczne było opracowanie takiej metody. W pracy przedstawiono tezę, że **wykorzystanie metody nakładania wirtualnych modeli człowieka i egzoszkieleatu umożliwia parametryczną weryfikację ergonomii konstrukcji energooszczędnych egzoszkieleatów** uwzględniając indywidualne cechy (biomechanikę) człowieka, co było głównym założeniem opisywanej metodyki.

Badania realizowano na obiekcie rzeczywistym, na bazie którego na bieżąco była wykonywana weryfikacja słuszności proponowanej metodyki. Badania były wykonywane za pomocą komercyjnie dostępnego nowoczesnego sprzętu i oprogramowania, znajdujących się w ciągłej sprzedaży co pozwala wykorzystanie metodyki przez inne podmioty.

Najważniejszym efektem niniejszej pracy jest analiza najistotniejszych aspektów budowy egzoszkieleatów kończyn dolnych. Teza, że wykorzystanie metody nakładania wirtualnych modeli człowieka i egzoszkieleatu umożliwia parametryczną weryfikację ergonomii konstrukcji energooszczędnych egzoszkieleatów uwzględniając indywidualne cechy (biomechanikę) człowieka została potwierdzona, ponieważ w wyniku użycia zaproponowanej metodyki powstał demonstrator technologii z działającym układem napędu i sterowania o parametrach lepszych od wcześniej rozwijanych konstrukcji opisywanych przez autora, co zostało potwierdzone doświadczalnie.

Zastosowanie metodyki projektowania egzoszkieleatu kończyn dolnych opartej o symulacje komputerowe z wykorzystaniem danych pomiarowych czynności ruchowych człowieka pozwoliło na stworzenie urządzenia na poziomie demonstratora technologii. Wykonanie tak szerokiego zakresu prac z uwzględnieniem wielu czynników pozatechnicznych (ergonomia, anatomia) pozwoliło ono na uniknięcie błędów konstrukcyjnych oraz weryfikację algorytmów sterowania w dalszym ciągu prac.

Ponadto zaproponowana metodologia pozwalana testować różne rozwiązania konstrukcyjne dla różnych schematów obciążeń, oraz różne strategie sterowania z uwzględnieniem sytuacji ekstremalnych.

Wskazano również inne potencjalne zastosowania konstrukcji egzoszkieleatów m.in. w ratownictwie czy medycynie.

Rozprawa spełnia wszystkie kryteria formalne, stawiane pracom doktorskim, jednak zawiera także słabsze strony. Autor w kilku miejscach nie unikał niedopowiedzeń, powiązanych z nieustabilizowaną jeszcze terminologią oraz zawilgoci stylistycznych.

Uwagi odnoszące się do całości pracy:

1. Częste używanie sformułowania "przekazuje swoje błędy".
2. Nagminnie pozostawienie pojedynczych liter na końcu wiersza.
3. W monografii są zdjęcia bez opisu przedstawionych na nich obiektów, przez co trudno jest dociec jakie były intencje Autora przy ich zamieszczaniu.

Uwagi stylistyczne

Str. 25 Rys. 2.8 samowystarczalny aktywny egzozszkielet

Str. 31 przedstawiono mniej domyślne podejście

Str. 35 oba te podejścia i każde inne

Str. 52 Została omówiona kinematyka układów w odniesieniu do wzorcowej,

Str. 57 rzeczywista konstrukcja

Str. 70. Rys. 5.15 centralny pneumatyczny układ napędowy

Str. 73. Jaki jest sens umieszczania w pracy rozdziału mieszczącego się na 1 str. ?

Str. 75. Rysunek 0.1 Struktura układu sterowania egzozszkieletem nie przedstawia struktury systemu sterowania tylko rozmieszczenie elementów układu sterowania na egzozszkielecie

Str. 77 pozornie jest to bardzo prosty układ

Str. 80 pomiar rozbieżności

Str. 87 Sprężyny pionowe mają niską sztywność

Str. 87 Jest to słuszne podejście, zakładając dobrze dopasowany but.

Str. 149. W badaniach skupiono się na napędzie hydraulicznym i potwierdzono założenia, że jest to właściwy, choć nie jedyny właściwy, wybór.

Uwagi redakcyjne:

1. Na str. 57 podano „Na rysunku 5.3 pokazano rzeczywistą konstrukcję wykonaną po przeprowadzeniu procesu weryfikacji.” Natomiast podpis pod rysunkiem „Rysunek 0.2 Model przegubu stawu biodrowego egzozszkieletu przyległego wykonany w metalu”
2. We wstępie do rozdziału 5 podano „W niniejszym rozdziale zostały opisane dwie opracowywane konstrukcje egzozszkieletów. Została omówiona kinematyka układów w odniesieniu do wzorcowej, jaką jest kinematyka człowieka. Przedstawiono kilka koncepcji, wraz z omówieniem ich wad i zalet oraz wskazaniem tych najbardziej odpowiednich. Wskazano i omówiono również miejsca mocowania napędów. Analizowane są dwie różne konstrukcje ze względu na sposób przekazywania napędu. W jednej jest on bezpośredni, natomiast w drugiej pośredni. Wymusza to zmiany w układzie mechanizmu, aby móc maksymalnie wykorzystać zalety obu rozwiązań.” Natomiast analiza treści rozdziału wykazuje, że została w nim przedstawione tylko jedno rozwiązanie

Znajdujące się w pracy błędy redakcyjne są mało istotne, szczególnie na tle przedstawianych w rozprawie interesujących i nowatorskich, możliwych do skomercjalizowania, wyników badań naukowo-technicznych jednak pogarszają odbiór pracy przez czytającego.

W czasie lektury Rozprawy nasunęły mi się pytania i niejasności do których proszę Doktoranta o ustosunkowanie się:

1. W pkt.3. rozprawy „sformułowanie celu pracy oraz metodyki” Autor podają, że „Na podstawie analizy istniejących w niektórych armiach egzozszkieletów stwierdzono, że w występujących zmiennych warunkach obciążeń egzozszkieletu istnieje możliwość budowy realnych systemów napędów i sterowania, według przyjętych wcześniej

kryteriów.” Jednak zdaniem recenzenta Autor nie podał w sposób syntetyczny zestawu tych kryteriów, proszę o ich podanie.

2. W pkt. 10.1 stwierdzono „Zastosowanie metodyki projektowania egzoszkieletu kończyn dolnych opartej o symulacje komputerowe z wykorzystaniem danych pomiarowych chodu, biegu i innych czynności ruchowych człowieka pozwoliło na stworzenie urządzenia na poziomie demonstratora technologii w okresie 4 lat, zaczynając proces projektowy od wstępnych założeń taktyczno-technicznych (WZTT). Zdaniem autora wykonanie tak szerokiego zakresu prac z uwzględnieniem bardzo wielu czynników pozatechnicznych (ergonomia, anatomia) wymaga takiego podejścia, ponieważ pozwala ono na uniknięcie grubych błędów konstrukcyjnych oraz szybką weryfikację algorytmów sterowania w dalszym ciągu prac. W związku z tym autor stwierdza, że postawiona na wstępie teza została potwierdzona. Wykorzystanie metody nakładania wirtualnych modeli człowieka i egzoszkieleatów umożliwia parametryczną weryfikację ergonomii konstrukcji energooszczędnych egzoszkieleatów.” Zdaniem recenzenta, uzyskane w pracy wyniki potwierdzają postawioną tezę, ale powyższe stwierdzenie nie w pełni ją potwierdza.
3. W pkt. 10.3 Autor stwierdza „W zakresie sterowania egzoszkieleatem przeprowadzone badania potwierdzają obecny stan wiedzy tj., że pozycyjne sterowanie proporcjonalne nadążne jest odpowiednie dla tego typu konstrukcji. W literaturze spotyka się również układy z pozycyjnym sterowaniem proporcjonalno całkującym lub proporcjonalno różniczkującym.” – Zdaniem recenzenta w tych zdaniach jest wiele sprzeczności. Proszę o przedstawienie wniosków z badań dotyczących układu napędu i sterowania.
4. W pkt. 10.3 Autor podaje, że „W przypadku zastosowań wojskowych tudzież ratowniczych, gdzie może występować duża losowość w trakcie użytkowania stosowanie algorytmów predykcyjnych może być bardzo ograniczone ze względu na bezpieczeństwo człowieka. Jednakże do zastosowań medycznych (rehabilitacja) jest jak najbardziej wskazane. Proszę o uzasadnienie tego wniosku

4. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych (które nie podważają zasadniczego dorobku Doktoranta) uważam, że przyjęta hipoteza rozprawy została pozytywnie zweryfikowana, a wyznaczony cel pracy ma charakter naukowy i został zrealizowany.

Rozprawa doktorska świadczy dobrze o ugruntowanej praktycznej wiedzy Autora i opanowaniu przez niego warsztatu naukowego, wspomagającego badania eksperymentalne. Autor pracy proponuje kompleksowe rozwiązania kinematyki stawów biodrowego i kolanowego oraz mocowań do ciała człowieka i mocowań układów wykonawczych.

Najważniejszym efektem niniejszej pracy jest analiza większości aspektów budowy egzoszkieleatów kończyn dolnych. Teza, że wykorzystanie metody nakładania wirtualnych modeli człowieka i egzoszkieleatów umożliwia parametryczną weryfikację ergonomii konstrukcji energooszczędnych egzoszkieleatów uwzględniając indywidualne cechy (biomechanikę) człowieka została potwierdzona, ponieważ w wyniku użycia zaproponowanej

metodyki powstał demonstrator technologii z działającym układem napędu i sterowania tej tematyce.

Przeprowadzone eksperymenty świadczą o trafności przyjętej koncepcji naukowej, wspierając postawioną tezę. Praca doktorska ma charakter zarówno teoretyczny (koncepcja) jak i doświadczalny.

Na uwagę zasługuje podjęcie ambitnego tematu, wyraźnie inspirowanego potrzebami praktycznymi w obszarach automatyki i robotyki oraz informatyki.

5. Podsumowanie

Opiniowana rozprawa doktorska oraz dorobek naukowy mgr. inż. Adama Zawadzkiego zawiera wiele wartościowych wyników badań. Świadczy to o tym, że Doktorant posiadał duży zakres wiadomości z dziedzin informatyki, hydrauliki, pneumatyki i robotyki i potrafił go wykorzystać dla potrzeb budowy egzoszkieleatów.

Recenzowana rozprawa spełnia 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). Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Zawadzkiego przez Radę Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej do publicznej obrony.

