

Kraków, 26. 09. 2023

Dr hab. inż. Marek Iwaniec, prof. uczelni
Katedra Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
email: iwaniec@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Jakuba Kopowskiego

pod tytułem:

**“Budowa i badania właściwości spersonalizowanego prototypu egzoszkieletu
wspomagania ruchu ręki”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została napisana pod opieką naukową dwóch promotorów. Pierwszym promotorem jest Pani dr hab. inż. Izabela Rojek, natomiast promotorem pomocniczym jest Pan dr inż. Dariusz Mikołajewski, prof. uczelni.

Podstawą do opracowania niniejszej recenzji jest pismo Pana dr hab. inż. Mieczysława Cieszko, prof. uczelni, Przewodniczącego Rady Dziedziny Nauk Inżynieryjno-Technicznych Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy z dnia 5 lipca 2023 r. W piśmie zawarto informację, iż przewód doktorski wszczęto w dyscyplinie wiodącej „*inżynieria mechaniczna*” i tą dyscyplinę reprezentuje przedłożona do recenzji praca doktorska. Podstawą prawną niniejszej recenzji jest **Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki** (tekst jedn. Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) oraz Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Art. 187. Dz.U.2022.574.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Kopowskiego dotyczy opracowania nowej metodyki badań, projektowania oraz wytwarzania zindywidualizowanych egzoszkieleatów wspomagania ruchu dłoni z wykorzystaniem technologii przyrostowej. Sztuczne kończyny to niezwykle aktualny temat badań, który wzbudza zainteresowanie wielu naukowców z różnych dziedzin nauki, takich jak mechanika, elektronika, robotyka czy neuronauka, ale również środowiska medycznego: lekarzy, fizjologów, rehabilitantów czy psychologów. Projektowanie egzoszkieleatów jest zagadnieniem interdyscyplinarnym, wymagającym spełnienia szeregu wymagań dotyczących m. in. aspektów funkcjonalnych, ekonomicznych i estetycznych. Najważniejszymi wymaganiami stawianymi współczesnym egzoszkieleatom są lekkość i zwartość budowy, łatwość dopasowania do indywidualnego użytkownika, wysoka estetyka

wykonania, wygląd zbliżony do wyglądu ludzkiej kończyny, wysokie osiągi porównywalne z osiągnięciami biologicznej kończyny lub wyższe i wreszcie możliwie niski koszt urządzenia, zapewniający dostępność szerokiemu gronu odbiorców.

W ostatnich latach prowadzone są intensywne badania dotyczące opracowania nowych rozwiązań egzozszkieletów m.in. dłoni. Technologia ta znajduje obecnie coraz więcej zastosowań w wielu dziedzinach aktywności człowieka, w szczególności w gospodarce i medycynie. Pomimo gwałtownego rozwoju i licznych wdrożeń, technologia ta jest jednakże wciąż na etapie badań i ustawicznego doskonalenia. Niemal codziennie pojawiają się doniesienia o nowych rozwiązaniach konstrukcyjnych, algorytmach sterowania oraz ich dedykowanych zastosowaniach. Zamierzeniem Autora było opracowanie uniwersalnej metodologii umożliwiającej syntezę egzozszkieletu dłoni w wielu przypadkach dysfunkcji ręki.

Z uwagi na liczne możliwe dysfunkcje ręki, sposób i zakres upośledzenia ruchu, a także zmiany indywidualnej budowy anatomicznej ręki, opracowanie spersonalizowanych konstrukcji egzozszkieletów dłoni jest zadaniem wymagającym opracowania metodyki uwzględniającej oprócz zasad ogólnych biomechaniki i konstrukcji egzozszkieletów, także bardzo indywidualne podejście skoncentrowane na potrzebach danego pacjenta.

Podjęta w rozprawie tematyka stanowi więc istotny i aktualny problem badawczy. Opracowane metody badań mogą zostać uogólnione poprzez wykorzystanie opracowanej i zweryfikowanej metodyki do projektowania konstrukcji spersonalizowanych egzozszkieletów oraz badania ruchu ręki wspomaganej egzozszkieletem.

Uważam, że problem badawczy podjęty przez Pana mgr inż. Jakuba Kopowskiego w rozprawie doktorskiej jest uzasadniony, a samo sformułowanie tematu rozprawy jest właściwe. Uzasadniając wybór tematu, Autor wskazał także na istotne znaczenie metodyki oraz opracowanych rozwiązań w projektowaniu spersonalizowanych egzozszkieletów dłoni oraz w procesie rehabilitacji szerokiej grupy osób z różnymi dysfunkcjami ręki.

2. Poprawność struktury pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Kopowskiego została napisana w języku polskim i liczy 196 stron. Składa się z siedmiu rozdziałów obejmujących 184 strony tekstu zasadniczego, bibliografii liczącej 115 pozycji oraz spisu rysunków i tabel. Do pracy dołączono wymagane ustawą streszczenia w języku polskim i angielskim. Dwustronicowy wykaz akronimów poprzedza zasadnicze rozdziały pracy.

Motywację podjęcia badań Autor przedstawił już w rozdziale 1. Wskazał, iż wybór tematu i zakresu pracy został uzasadniany i poparty odpowiednimi badaniami literaturowymi. Analizując konstrukcje egzozszkieletów dłoni Autor zauważył, że „brakuje rozwiązań prostych, efektywnie wykorzystujących podstawowe zasady mechaniki i biomechaniki do adaptacyjnego wspomagania ruchu”. W dalszej części rozdziału Autor przedstawił główne kierunki przeprowadzonych badań oraz zakres rozprawy.

W rozdziale II został przedstawiony przegląd literatury dotyczący krytycznej analizy istniejących, wybranych rozwiązań konstrukcyjnych, projektowania egzoszkieleatów oraz badań ich funkcjonalności i efektywności. Autor dokonał klasyfikacji konstrukcji egzoszkieleatów oraz zidentyfikował najważniejsze zalety i wady tych urządzeń. Uzasadnił także celowość podjęcia tematu rozprawy wskazując na „brak metodyki projektowania spersonalizowanych prototypów egzoszkieleátu wspomagania ruchu ręki z uwzględnieniem różnych dysfunkcji”.

W rozdziale III został przedstawiony problem badawczy oraz została sformułowana teza pracy. W celu jej udowodnienia Autor zdefiniował 17 zadań. Cenną wskazówką ułatwiającą poruszanie się po zakresie pracy jest zamieszczony schemat metodyki przeprowadzonych badań.

Rozdział IV poświęcono przedstawieniu metodyki tworzenia spersonalizowanych prototypów egzoszkieleatów ręki. Autor sformułował założenia oraz wyodrębnił zadania poszczególnych etapów projektowania, indywidualnego dopasowania oraz doboru materiałów i wytwarzania prototypów. Przedstawił także funkcje utworzonego oprogramowania do sterowania procesem akwizycji i transferu danych pomiarowych, a także programu do tworzenia modelu kinematycznego i wizualizacji ruchu ręki. Model kinematyczny został zintegrowany z geometrycznym modelem powierzchniowym uzyskanym metodą skanowania 3D. Kolejny podrozdział dotyczy iteracyjnej syntezy geometrii łańcucha kinematycznego oraz budowy jego prototypu. W dalszej części została przedstawiona konstrukcja układu napędowego wykorzystującego siłowniki Actonix PQ12-100-6-r oraz jego integracja z łańcuchem kinematycznym, a także sposób sterowania egzoszkieleatem za pomocą utworzonego oprogramowania modułu Romeo v2 ATmega32u4.

W rozdziale V zostały przedstawione wyniki badań parametrów kinematycznych oraz funkcjonalności opracowanych prototypów egzoszkieleatów wspomagania ruchu dłoni. W badaniach wykorzystano grupę 10 ochotników podzielonych na cztery grupy ze względu na dysfunkcje dłoni. Dla każdego użytkownika zindywidualizowano konstrukcję egzoszkieleátu, a następnie przeprowadzono testy funkcjonalności i badania parametrów kinematycznych.

Dyskusję otrzymanych wyników badań przedstawiono w rozdziale VI. Wnioski końcowe w sposób syntetyczny zostały przedstawione w kolejnym rozdziale (VII). Zostały one podzielone na cztery grupy: osiągnięcia naukowe i praktyczne oraz ograniczenia i kierunki dalszych badań.

Przyjęta struktura rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Kopowskiego jest poprawna pod względem formalnym i zgodna z przyjętą koncepcją badawczą.

3. Ocena przeprowadzonej analizy literaturowej

Spis literatury, do której odwołuje się Autor, liczy 115 pozycji. Są to głównie artykuły naukowe opublikowane w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym oraz

w mniejszym zakresie prace opublikowane w materiałach konferencyjnych, krajowych czasopismach recenzowanych, monografiach oraz materiały dostępne w sieci Internet.

Przeprowadzone badania literaturowe dotyczyły krytycznej analizy rozwiązań konstrukcyjnych egzoszkieleto, a także metod pomiaru i analizy ruchu ręki swobodnej lub wspomaganej egzoszkieletem. Wnioski z przeglądu literaturowego sformułowano w sposób jasny i rzeczowy. Na ich podstawie określono zakres i oczekiwania stawiane metodyce projektowania egzoszkieleto, a w dalszej kolejności pozwoliły one na analizę, porównanie i weryfikację uzyskanych efektów.

Na podkreślenie zasługuje poświęcanie dużej uwagi osiągnięciom zespołów badawczych pracujących w Polsce, co nie jest zbyt powszechne. Często osiągnięcia zagraniczne są lepiej znane i wyżej cenione niż krajowe. Autor jest także współautorem wielu publikacji, audycji popularnonaukowych mających na celu szeroką propagację wiedzy i stanu prowadzonych badań.

Krytyczna analiza literaturowa i wyciągnięte wnioski (np. w postaci zdefiniowania zadań koniecznych do realizacji celu pracy) świadczą o wiedzy Autora i dobrej orientacji w tematyce przedstawionych zagadnień.

4. Wartość merytoryczna rozprawy: analiza zagadnienia naukowego rozpatrzonego w rozprawie, ocena sformułowanych hipotez badawczych

Cel pracy został jasno sprecyzowany i jest zgodny z tytułem rozprawy.

Sformułowana teza pracy, tj.: *”Dostępna wiedza i narzędzia inżynierskie umożliwiają opracowanie metodyki, utworzenie narzędzi wspierających oraz zaprojektowanie, zbudowanie funkcjonalnego, spersonalizowanego egzoszkieletu wspomagającego ruch ręki i realizację badań eksperymentalnych dla różnych typów dysfunkcji ręki”*, wydaje się być z pozoru oczywista. Jednakże obecnie, pomimo ogromnego wręcz zalewu nowych, różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych egzoszkieleto, nie można wskazać rozwiązania jednoznacznie i w sposób pełny dowodzącego tezę. Udowodnienie tezy jest więc ciągle istotnym zagadnieniem badawczym. Biorąc pod uwagę, iż przedmiotem pracy jest metodyka syntezy spersonalizowanego egzoszkieletu dłoni człowieka, należy raczej założyć, iż praca zapoczątkuje kolejne rozwiązania, które będą się raczej zbliżać poziomem doskonałości do naturalnego/biologicznego rozwiązania. Stąd w ocenie tych rozwiązań należy się spodziewać jeszcze silniejszych kryteriów doskonałości. Po części Autor takie kryteria już uwzględnił badając np. zmianę zakresów kątów, efektywność wykonywania ćwiczeń, np. łapania piłeczki. Co istotne, kryteria zaproponowane przez Autora dotyczą także mniej sformalizowanych, ale jakże ważnych subiektywnych ocen pacjentów, wynikających z codziennej eksploatacji egzoszkieleto dłoni w warunkach domowych.

Określenie użyte w sformułowaniu tezy: „utworzenie narzędzi wspierających” nie jest określeniem o zakresie i znaczeniu powszechnie przyjętym/rozpoznawanym. Bardziej syntetyczne zestawienie tych narzędzi podkreśliłoby dokonania pracy. One oczywiście są

przedstawione, ale bardziej z punktu widzenia ich wykorzystania w procesie projektowania i oceny efektów badań eksperymentalnych.

Układ pracy jest poprawny i przejrzysty. W argumentacji daje się zauważyć dążenie do zachowania ścisłości pojęć i porządku wnioskowania. Zapewne Autor, podobnie jak wielu innych badaczy, dążył do samodzielnego przedstawienia pełnego toku wnioskowania poprzez wyprowadzanie wszelkich zależności począwszy od najbardziej podstawowych pojęć. Zapewne, z tej obawy przed brakiem oryginalności dowodu wynika odwoływanie się Autora do najbardziej podstawowych definicji (jak np. prędkości, przyspieszeń, tzw. twierdzenia cosinusów i przykładów obliczeń z zastosowaniem tego twierdzenia). Wydaje się, iż nie ma potrzeby tak skrupulatnego dowodu i w przypadku publikacji pracy można pominąć te fragmenty bez uszczerbku dla toku rozumowania (jedynie powołując się na źródła).

5. Ocena oryginalności rozprawy, jej wartość naukowa rozprawy, ocena dorobku Autora

Praca stanowi udaną próbę krytycznej analizy i syntezy wiedzy z często odległych dziedzin, jej uporządkowania oraz rozszerzenia w oparciu o własną wiedzę i przemyślenia Autora. Recenzowana praca to także wynik własnych rozważań, symulacji, szeregu prób i weryfikacji eksperymentalnych oraz poszukiwań kompleksowego i pełnego poznania szerokiego spektrum zagadnień związanych z opracowaniem metodyki projektowania, wytwarzania oraz badań eksperymentalnych funkcjonalności egzoszkieleatów dłoni.

Do oryginalnych osiągnięć Autora zaliczyć można:

- opracowanie dwumodalnej metody wyznaczania wielkości antropometrycznych i kinematycznych ręki swobodnej lub wspomaganej egzoszkieleatem rozpatrywanej jako układ o wielu stopniach swobody,
- opracowanie metodyki projektowania spersonalizowanego egzoszkieleatu dłoni,
- opracowanie metody badań oraz kryteriów oceny efektywności egzoszkieleatu w przypadku wielu różnorodnych dysfunkcji ręki, a także zmian jej budowy anatomicznej,
- analizę procesu tworzenia oraz weryfikację kompleksowego zastosowania opracowanej przez Autora metodyki syntezy rozwiązań konstrukcyjnych egzoszkieleatów dłoni dedykowanych pacjentom z tak różnorodnymi dysfunkcjami dłoni jak np.: wiotkość, paraliż, hipermobilność, niekontrolowane drżenie, guzki Heberdena i Boucharda, urazy mechaniczne.

Empirycznym potwierdzeniem oryginalnych osiągnięć Autora weryfikującym tezy pracy oraz praktyczną przydatność opracowanej metodyki jest zademonstrowanie i przeprowadzenie pełnego procesu badań antropometrycznych oraz badań kinematycznych

ruchu dłoni pacjentów, zaprojektowanie i wykonanie serii dziesięciu spersonalizowanych egzozszkieletów dłoni dedykowanych dla osób z różnymi dysfunkcjami dłoni oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych w postaci testów oraz badania funkcjonalności wytworzonych konstrukcji - zwłaszcza w czasie normalnej eksploatacji w warunkach domowych.

Praca stanowi kontynuację i rozszerzenia badań dotyczących wielu zagadnień związanych z tematyką egzozszkieletów ręki prowadzonych na Uniwersytecie Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy od wielu lat, a w których Autor aktywnie uczestniczył na wszystkich etapach.

Wyraźnie dostrzeganą ideą pracy i dążeniem Autora jest uzyskanie wyników, które mogą być w sposób praktyczny zaimplementowane w procesie rehabilitacji ręki. Opracowana metodyka oraz efekty pracy zostały wnikliwie przeanalizowane i zweryfikowane przez Autora zwłaszcza w odniesieniu do wybranych dwóch rozwiązań referencyjnych opracowanych na Politechnice Łódzkiej w zespole prof. J. Awrejcewicza oraz na Uniwersytecie w Tokio.

Dorobek naukowy Autora jest ponadprzeciętny i wg Bazy Dorobku Naukowego Pracowników UKW obejmuje 21 publikacji, w takich czasopismach naukowych jak np.: *Sensors, Materials, Applied Sciences, Bio-Algorithms and Med-Systems, Mechanik, Studia i Materiały Informatyki Stosowanej, Wyroby Medyczne, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Studia i Materiały Informatyki Stosowanej*. Wśród opublikowanych prac są także rozdziały w dwóch monografiach wydawnictwa Springer: „*Innovations in Mechanical Engineering*” oraz „*Advances in Manufacturing II*”. Na podkreślenie zasługuje także działalność dydaktyczna i popularnonaukowa Autora biorącego często udział w audycjach radiowych i telewizyjnych, targach branżowych oraz różnych wydarzeniach kulturalno-naukowych o lokalnym i międzynarodowym zasięgu oddziaływania.

Ocena sposobu rozwiązania postawionego zagadnienia, zasadności założeń i prawidłowości użytych metod

W celu rozwiązania problemu badawczego i udowodnienia tezy pracy Autor wyodrębnił i wykonał 17 szczegółowych zadań badawczych obejmujących m.in.:

- opracowanie założeń i koncepcji spersonifikowanego egzozszkieletu dłoni,
- opracowanie metody i kryterium oceny właściwości egzozszkieletu,
- opracowanie metody budowy modelu antropometrycznego ręki,
- wybór struktury, opracowanie modeli geometrycznych oraz opracowanie technologii wykonywania prototypów łańcuchów kinematycznych egzozszkieletów techniką druku 3D,
- dobór układów napędowych i ich integracja z łańcuchami kinematycznymi palców,

- zintegrowanie podukładów mechanicznych, układów kontrolno-pomiarowych oraz algorytmów sterowania,
- implementację praktyczną opracowanej metodologii budowy spersonalizowanych egzozszkieletów poprzez wytworzenie 10 indywidualnie dobieranych egzozszkieletów,
- badania eksperymentalne: analizę kinematyczną oraz oceną właściwości funkcjonalnych wytwarzanych egzozszkieletów wykorzystywanych przez pacjentów z różnymi dysfunkcjami.

W celu rozwiązania zadań badawczych Autor użył aktualnej wiedzy i metod, a także opracował własne nowe metody badań oraz narzędzia programistyczne. Umożliwiły one m.in. badania funkcjonalności ręki pacjentów przed procesem rehabilitacji opracowaną metodą łączącą badania wizyjne sprzężonymi kamerami oraz mikroprocesorowym układem pomiarowym z czujnikiem tensometrycznym wykorzystywanym w funkcji analogowego enkodera do pomiaru przemieszczeń kątowych.

W szczególności, w opracowanej metodyce syntezy spersonalizowanych egzozszkieletów dłoni zostały wykorzystane elementy inżynierii odwrotnej, które zostały zastosowane do wyznaczania indywidualnych modeli antropotechnicznych, tworzenia modeli bryłowych poprzez skanowanie trójwymiarowe, usuwania błędów i budowy modeli geometrycznych CAD, a następnie nowe techniki szybkiego prototypowania umożliwiające wytwarzanie komponentów mechanicznych techniką druku 3D. Oryginalnym efektem pracy jest także opracowanie autorskiego programu do sterowania egzozszkieletem z wykorzystaniem języka JAVA oraz graficznego interfejsu użytkownika ułatwiającego interakcję z urządzeniem.

Przeprowadzone badania parametrów kinematycznych i właściwości funkcjonalnych prototypów egzozszkieletów uwzględniały ocenę przygotowania i edukacji użytkownika, dopasowanie elementów do użytkownika, łatwość i rozdzielczość sterowania, ocenę efektywności wykonywania ćwiczeń i testów oraz rehabilitacji w warunkach domowych pod nadzorem personelu medycznego oraz badania parametrów kinematycznych ruchu ręki prawidłowej, dysfunkcyjnej i wspomaganej egzozszkieletem.

Założenia przyjęte do realizacji celu pracy zostały zasadnie sformułowane, a postawiony problem badawczy poprawnie rozwiązany.

Wyniki uzyskane w rozprawie potwierdziły tezę, że opracowana przez Autora metodyka i narzędzia wspomagania projektowania i wytwarzania spersonalizowanych egzozszkieletów dłoni umożliwiają powtarzalne projektowanie, wytwarzanie oraz badania funkcjonalności spersonalizowanych urządzeń do zastosowań przez użytkowników z bardzo zróżnicowanymi dysfunkcjami kończyny górnej.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Należy podkreślić interdyscyplinarną wiedzę oraz duży nakład pracy Autora niezbędny do samodzielnego przeprowadzenia badań zakrojonych na tak szeroką skalę, co umożliwiło kompleksowe ujęcie problematyki i realizację postawionego celu pracy. Przy tak rozległej tematyce, niektóre zagadnienia zostały bardziej szczegółowo przedstawione, a inne nieco mniej. Pewien niedosyt dotyczy edycji manuskryptu „Pracy doktorskiej” oraz sposobu jej zredagowania. Moim zdaniem przedstawiony manuskrypt pracy doktorskiej przed jej wydaniem drukiem powinien jeszcze raz przejść proces redagowania w celu wyeliminowania pewnych skrótów myślowych, czy też uzupełnienia i dodania bardziej precyzyjnych opisów prowadzonych prac. (Z uwagi na znaczą liczbę poprawek nie wszystkie znalazły się w recenzji, natomiast znajdują się w poprawionym manuskrypcie).

Szczegółowe uwagi:

1. W modelu kinematycznym i dynamicznym masa paliczków nie ma istotnego wpływu, ze względu na konieczność pokonywania nie tylko sił bezwładności ale, przede wszystkim, sił zewnętrznych, sił odkształcenia tkanek, sił zaciśniętych mięśni w różnych przypadkach dysfunkcji. Oczywiście nie jest błędem wyznaczenie masy paliczków, ale składowa siły bezwładności, ze względu na małą wartość masy i również relatywnie niewielkie przyspieszenia, nie jest siłą dominującą.
2. Wydaje się, iż metoda szacowania masy paliczków poprzez mnożenie procentowych udziałów masy człowieka, ręki i palców, wobec wcześniej zaproponowanych, znacznie dokładniejszych sposobów, w przypadku indywidualnego projektu urządzenia, nie powinna być stosowana.
3. Na zamieszczonych rysunkach czas próbkowania ok. 400 ms wydaje się wystarczający do analizy ruchu ręki osoby zdrowej, jednakże w przypadku np. skurczy spastycznych nie dokładnie odwzorowuje krótkie impulsy, chociaż z drugiej strony nie ma to przeważającego wpływu na działanie urządzenia lub ocenę jego efektywności.
4. Str. 79-82, podrozdział „Wyznaczanie pozostałych parametrów”: z uwagi, że zawarto w nim szereg odwołań do podstawowych zależności można ten podrozdział przeredagować, a nawet w całości lub znacznej części niektóre podstawowe definicje pominąć. Zwyczajowo, we wzorach (5) ÷ (10), podkreśla się zależności wektora położenia, drogi, prędkości, przyspieszenia od czasu t , np. $r(t)$. Ponadto, w 10 linijce str. 79, przez przypadek znalazło się stwierdzenie „...prędkość tego punktu w chwili t jest granicą ...” gdy zarówno Δr i Δt dążą do zera. Oczywiście dotyczy to tylko Δt (w drugim przypadku $\lim(0/0)$ jest symbolem nieoznaczonym).
5. Str. 83: nazwa „model komputerowy” używana jest zarówno do określenia modelu kinematycznego jak i np. modelu geometrycznego, (antropometrycznego), powierzchniowego. Takie zamienne użycie powoduje brak precyzji.
6. Str. 65: model komputerowy (kinematyczny).

7. Str. 66: „*stopni zgięcia (palców)*” – zakresu ruchu, jeżeli chodzi o wartości ekstremalne.
8. Str. 75: „... *pobrane z literatury*” – bardziej elegancko byłoby napisać „zaczepnięto z literatury”.
9. Str. 66: Stwierdzenie „*Obliczenie prędkości umożliwia wyznaczenie przyspieszeń*” jest nieprecyzyjne, gdyż tylko na podstawie przebiegu chwilowej prędkości w funkcji czasu można wyznaczyć przyspieszenie.
10. Str. 82, 3 linijka od dołu: „*Ręczne utworzenie układu kostnego*” – lepiej byłoby napisać „opracowanie modelu geometrycznego szkieletu /kości ręki”.
11. Str. 130: podpis pod rys. 82 nie zgadza się z zawartością (wykresem prędkości kątowej).
12. Str. 89, tab. 13: zamiast „*palec dla ręki*” powinno być „palec ręki”.
13. Str. 107, 17 linijka: sformułowanie „*wydajność ... silowników*” lepiej jest zastąpić przez „sprawność”.
14. Str. 166 Powszechnie nadużywa się sformułowania „poziomu” tutaj w odniesieniu do „ruchomości palców”. Wielkość ta nie jest wyrażana w skali logarytmicznej.
15. Str. 167:
 - „*Ilości zbudowanych palców do potrzeb użytkownika*” - nieprecyzyjne określenie,
 - „*Poziom ruchomości palców*” – nie wiadomo co Autor miał na myśli,
 - „*Stopni zgięcia*” – raczej zakresu.
16. Str. 173, 5 linijka: sformułowanie „*najwydajniejszą czasowo metodą poznawania własności ręki ...*” proponuję zastąpić „...najszybszą metodą tworzenia modelu powierzchniowego/ geometrycznego/ antropometrycznego ręki ...”.

Pozostałe uwagi zawarto w rękopisie i przekazano Autorowi.

7. Ocena końcowa

Opracowana metodyka projektowania i wytwarzania spersonalizowanych egzoszkieleto w ręki zweryfikowana poprzez opracowanie i badania eksperymentalne dziesięciu demonstratorów technologii w postaci indywidualnie dobranych egzoszkieleto w ma charakter uniwersalny: z powodzeniem może zostać zastosowana w badaniach związanych z projektowaniem, budową, wytwarzaniem i eksploatacją sprzętu rehabilitacyjnego i medycznego zwłaszcza o rozwiązaniach zbliżonych do struktury egzoszkieletu dłoni.

Uważam, że sposób realizacji badań naukowych, których rezultaty przedstawiono w recenzowanej rozprawie, a także dorobek naukowy liczący 21 publikacji naukowych świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia działalności naukowo-badawczej.

Przedstawiona do oceny praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna* oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Kopowskiego „*Budowa i badania właściwości spersonalizowanego prototypu egzoszkieletu wspomaganie ruchu ręki*” spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jedn. Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) oraz Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. i mieści się w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*. Wnoszę o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony.

M. Lwona