

Bydgoszcz, 20 grudnia 2024 r.

dr hab. inż. Adam Mazurkiewicz  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Politechnika Bydgoska

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgra inż. Mariusza Sobiech

Pod tytułem:

„Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej”

### **1. Podstawa prawna opracowania**

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie uchwały nr 90/2024 z dnia 17 października 2024 r., w sprawie powołania komisji doktorskiej w postępowaniu doktorskim mgr. inż. Mariusza Sobiech w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna, podjętej przez Radę dyscypliny inżynieria biomedyczna Politechniki Śląskiej. Z mocy tej uchwały zostałem powołany na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Mariusza Sobiech pod tytułem „Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej”, wykonanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Wojciecha Wolańskiego pracownika Politechniki Śląskiej, która została dostarczona mi do recenzji dnia 2 listopada 2024 r.

### **2. Ocena celowości podjęcia tematu rozprawy**

W dzisiejszych czasach w wyniku wzrastającej średniej długości życia ludzkiego w społeczeństwie zwiększa się odsetek osób w podeszłym wieku. Osoby takie często dotknięte są niepełnosprawnością ruchową. W konsekwencji często wymagają zabiegów fizjoterapii i rehabilitacji w celu utrzymania sprawności ruchowej. Dlatego istnieje duże zapotrzebowanie na urządzenia mogące usprawnić i przyspieszyć te

procesy. Oprócz urządzeń do podstawowej rehabilitacji istnieje zapotrzebowanie na bardziej złożone urządzenia do rehabilitacji typu roboty rehabilitacyjne, które mogą w znacznym stopniu odciążyć personel medyczny, zwiększyć dostępność i efektywność zabiegów rehabilitacji. Możliwość programowania robota, a w konsekwencji dopasowanie ćwiczeń do indywidualnych potrzeb pacjenta jest dodatkową zaletą tego typu urządzeń. Ich zastosowanie pozwoli na szerszy dostęp pacjentów do rehabilitacji oraz na zapewnienie wysokiej jakości i powtarzalności zabiegów. Doprowadzi to do wysokiej efektywności prowadzonej terapii. Z uwagi na to istnieje zapotrzebowanie na tego rodzaju urządzenia.

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska dotyczy doboru optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej. W pracy opisano rozwiązanie konstrukcyjne tego typu urządzenia, zatem dobrze wpisuje się ona we wskazaną wyżej potrzebę.

#### Konkluzja:

Uważam, że podjęcie tematu rozprawy jest celowe i w pełni uzasadnione, a podjęta tematyka jest ważna i aktualna, zarówno w sensie badawczym jak i użytkowym.

### **3. Charakterystyka formalna rozprawy**

Rozprawa napisana jest w języku polskim, tekst właściwy liczy 128 stron (bez strony tytułowej, podziękowań, spisu treści, streszczeń w języku polskim i angielskim, bibliografii spisów rysunków i tabel). Rozprawa składa się z 12 rozdziałów, w tym 92 rysunków i 25 tabel. Spis literatury zawiera 63 pozycje.

Rozdział 1. Jest zatytułowany „Wstęp”. Rozdział liczy 1 stronę, zawiera wprowadzenie do tematu pracy i uzasadnienie jego podjęcia.

Rozdział 2. „Budowa anatomiczna i funkcje kończyny górnej” liczy 10 stron. W rozdziale tym opisano anatomię kończyny górnej, jej układ kostno-stawowy i mięśniowy oraz funkcje i cechy antropometryczne. Opisano też zakresy ruchów kończyny górnej w płaszczyźnie strzałkowej, czołowej i poprzecznej ciała.

Rozdział 3. „Przegląd aktualnej wiedzy i stanu techniki” liczy 14 stron. W rozdziale tym przedstawiono przegląd istniejących konstrukcji robotów i manipulatorów medycznych, zarówno będących na etapie studyjnym jak i skomercjalizowanych. Dokonano oceny wybranych konstrukcji robotów pod kątem możliwości ruchowych zastosowanych mechanizmów, elementów napędowych i bezpieczeństwa użytkowania. W podrozdziale 3.4 dokonano analizy potrzeb medycznych, w której to analizie wskazano celowość zapotrzebowania na roboty i manipulatory rehabilitacyjne do rehabilitacji kończyny górnej.

Rozdział 4. „Cel i zakres pracy” liczy 3 strony. W rozdziale tym zdefiniowano cel pracy oraz zakres prac niezbędnych do wykonania, żeby osiągnąć założony cel pracy.

Cel pracy: celem pracy było opracowanie koncepcji konstrukcji mechanicznej ramienia manipulatora, która może być zastosowana przede wszystkim w robotach używanych do celów rehabilitacyjnych kończyny górnej.

Aby zrealizować cel pracy przyjęto do realizacji następujące zadania naukowe i wdrożeniowe:

1. Wyznaczenie rzeczywistych trajektorii ruchów terapeutycznych kończyny górnej.
2. Analizę i opracowanie optymalnych trajektorii wybranych punktów na kończynie górnej w układzie przestrzenno-czasowym dla określonych niesprawności neurofizjologicznych.
3. Opracowanie założeń projektowych.
4. Opracowanie koncepcji łańcuchów kinematycznych i wybór optymalnej koncepcji do realizacji.
5. Dobór odpowiednich rozwiązań jednostek napędowych poszczególnych par kinematycznych.
6. Wykonanie symulacji komputerowych metodą elementów skończonych MES.
7. Opracowanie modelu cyfrowego (CAD) konstrukcji mechanicznej.
8. Zbudowanie fizycznego modelu egzoskieletu w celu zweryfikowania poprawności działania konstrukcji mechanicznej.
9. Przeprowadzenie badań i testów prototypu.

Rozdział 5. „Założenia projektowe” liczy 6 stron. W rozdziale tym opisano założenia projektowe, jakie ma spełniać projektowane urządzenie z uwzględnieniem obowiązujących przepisów, tj. normy dotyczącej wdrożenia systemu zarządzania jakością zgodnego z EN ISO 13485, dyrektywy 2006/42/WE (ang. Machinery Directive, MD), ISO/TS 15066: Robots and robotic devices — Collaborative robots oraz przepisów i norm zharmonizowanych.

Dokonano także analizy wymagań dotyczących bezpieczeństwa projektowanej konstrukcji obejmujących:

1. Ocenę ryzyka: identyfikację potencjalnych zagrożeń związanych z użytkowaniem maszyny.
2. Bezpieczeństwo konstrukcji: zapewnienie stabilności, wytrzymałości oraz odpowiednich zabezpieczeń przed urazami użytkownika i uszkodzeniem urządzenia.
3. Środki ochronne: stosowanie wyłączników bezpieczeństwa, osłon.
4. Ergonomię: odciążenie fizyczne użytkownika i zwiększenie jego komfortu.
5. Oznakowanie i instrukcję: zapewnienie instrukcji używania oraz odpowiedniego oznakowania urządzenia.

Rozdział 6. „Opracowanie trajektorii ruchów terapeutycznych” liczy 11 stron. W rozdziale tym opisano sposób pomiaru ruchu kończyny górnej. Do tego celu wykorzystano metodę fotogrametryczną. Kamery rejestrowały obrazy pacjenta w ruchu, na którego ciele umieszczono specjalne znaczniki, a następnie

z zarejestrowanych obrazów ruchu kończyny odtwarzano współrzędne przestrzenne położenia znaczników. Na tej podstawie wyznaczano trajektorie, kąty i zakresy ruchów poszczególnych segmentów kończyny. Rejestrowano zarówno ruchy proste jak i złożone. Zarejestrowano 12 ruchów złożonych wytypowanych przez specjalistów od rehabilitacji na podstawie ich znaczenia w rehabilitacji kończyny górnej.

Rozdział 7. „Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego” liczy 24 strony. Rozdział ten w mojej opinii jest najważniejszym rozdziałem w całej pracy. W rozdziale tym przedstawiono analizy, na podstawie których dokonano wyboru optymalnego łańcucha kinematycznego urządzenia. Dobór ten ma bezpośredni wpływ na efektywność i precyzję pracy urządzenia. To w konsekwencji ma doprowadzić do wyboru optymalnej koncepcji rozwiązania i jej realizacji. Autor na potrzeby analiz podzielił konstrukcję na dwie części: podstawę i ramię egzoszkieletu. Każdą z tych części analizował osobno. Oceniono trzy koncepcje konstrukcji podstawy oznaczone odpowiednio od P1 do P3 oraz trzy koncepcje konstrukcji ramienia egzoszkieletu oznaczone od K1 do K3. Dla każdej z koncepcji ramienia opracowano schemat kinematyczny z uwzględnieniem modelu kończyny górnej oraz model cyfrowy 3D. Model 3D pozwalał na wizualną weryfikację ruchomości egzoszkieletu – możliwość zrealizowania zakładanych zakresów ruchu. Na potrzeby analiz przyjęte zostały cechy antropometryczne kończyny górnej, takie jak długości i obwody ramienia, przedramienia, dłoni i masy poszczególnych segmentów kończyny. Oceniono możliwe do uzyskania zakresy ruchów ramienia, wyznaczając maksymalne położenia jakie może osiągnąć konstrukcja w trakcie wykonywania zadanego ruchu w danym stawie w danej płaszczyźnie. Badania przeprowadzono dla ruchów mających znaczenie z punktu widzenia rehabilitacji. Na tej podstawie wybrana została optymalna koncepcja egzoszkieletu przyjęta następnie do realizacji.

Rozdział 8. „Dobór jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej” liczy 16 stron. W rozdziale tym dokonano analizy potencjalnych możliwych rodzajów napędu egzoszkieletu, oraz przekładni zmieniających prędkość, rodzaj i kierunek ruchu. Na podstawie tego przeglądu dobrano wstępnie kilka wariantów doboru napędów. Następnie opracowano kryteria według których dobrane będą napędy dla tworzonej konstrukcji. Dla każdego kryterium przypisano odpowiednią wagę, w zależności od istotności danego kryterium. Przeprowadzono analizę wielokryterialną przyjętych wstępnie rozwiązań i na tej podstawie wybrano napędy najlepiej przystosowane do realizacji każdego z założonych ruchów.

Rozdział 9. „Analiza wytrzymałościowa konstrukcji egzoszkieletu” liczy 16 stron. W rozdziale tym dokonano oceny wytrzymałości elementów konstrukcji egzoszkieletu z wykorzystaniem metody elementów skończonych MES. Do obliczeń wytypowano trzy warianty materiałowe wstępnie przyjęte do wykonania konstrukcji: całość konstrukcji stali konstrukcyjnej, całość konstrukcji ze stopu aluminium oraz częściowo ze stali i aluminium (podstawa ze stali, część zasadnicza ze stopu aluminium). Po przeprowadzeniu obliczeń wstępnych ta ostatnia koncepcja została przyjęta do dalszych obliczeń. Z obliczeń MES uzyskano mapy

naprężeń zredukowanych oraz przemieszczeń uogólnionych. Na tej podstawie zlokalizowano miejsca w których występowały spiętrzenia naprężeń tzw. słabe punkty, co na dalszych etapach pozwoliło na ich eliminację przez przekonstruowanie elementu, np. zmianę grubości ścian elementów lub dodanie usztywnień.

Rozdział 10. „Budowa prototypu i jego weryfikacja” liczy 13 stron. W rozdziale tym opisano analizy i badania mające na celu dopracowanie ostatecznej postaci egzoszkieletu. Dotyczyły one między innymi: mechanizmu regulacji długości ramienia i przedramienia, konstrukcji punktów mocowań ciała pacjenta do egzoszkieletu, rozmieszczenie układów elektronicznych i okablowania na konstrukcji egzoszkieletu, sprawdzenie poprawności działania zastosowanych osłon, mających wpływ na bezpieczeństwo użytkownika egzoszkieletu.

Badania prototypu polegały na ocenie ruchliwość szkieletu, sprawdzono zakresy ruchów możliwych do uzyskania przez konstrukcję. Oceniono również działanie systemu czujników siły w które wyposażona została konstrukcja. Po tej ocenie wprowadzono niezbędne korekty w konstrukcji urządzenia.

Przeprowadzono także badania wytrzymałościowe wybranych elementów konstrukcji, polegające na obciążeniu konstrukcji siłami, wynikającymi z oddziaływania pacjenta na konstrukcję podczas rehabilitacji.

Przeprowadzono także badania pod kątem bezpieczeństwa i funkcjonalności użytkownika wyrobów medycznych zgodnie z odpowiednimi przepisami. Badania przeprowadzono w certyfikowanym laboratorium pod kątem bezpieczeństwa konstrukcji w przypadku zagrożeń elektrycznych, mechanicznych oraz kompatybilności elektromagnetycznej. Na podstawie wyników wyżej opisanych badań w razie potrzeby wprowadzono do konstrukcji niezbędne modyfikacje.

Rozdział 11. „Wdrożenie” liczy 4 strony. W rozdziale tym autor dokonuje opisu zastosowania wykonanej konstrukcji. Konstrukcja wykonana została w ramach projektu POIR.01.02.00-00-0014/17 pod tytułem „Egzoszkielec do wielopłaszczyznowej rehabilitacji kończyn górnych w środowisku wirtualnym z siłowym sprzężeniem zwrotnym”, realizowanego dla partnera zewnętrznego przez Krakowski Instytut Technologiczny. Urządzenie zostało zaakceptowane i odebrane przez partnera przemysłowego, co potwierdza poprawność wykonanych prac. W rozdziale tym doktorant wymienia również inne swoje osiągnięcia przy realizacji projektów aplikacyjnych.

Rozdział 12. „Podsumowanie i wnioski” liczy 4 strony. W ramach tego rozdziału autor dokonuje podsumowania wykonanych prac pod kątem osiągnięcia założonego celu pracy. W rozdziale tym autor wskazuje też kierunki przyszłych możliwych modyfikacji konstrukcji, w celu jej lepszego dostosowania do spełniania założonych funkcji.

## **4. Ocena rozprawy**

### *4.1. Ocena merytoryczna*

Celem pracy było opracowanie konstrukcji części mechanicznej egzoszkieletu do rehabilitacji kończyny górnej człowieka. Aby osiągnąć założony cel zrealizowano następujące zadania: opisano anatomie kończyny górnej, zdefiniowano jej rolę w zaspokajaniu codziennych potrzeb człowieka. Przeprowadzono przegląd stanu techniki w zakresie robotów do rehabilitacji kończyny górnej, z podziałem na urządzenia w fazie koncepcyjnej oraz komercyjne. Opisano rozwiązania techniczne jakie zastosowano w poszczególnych konstrukcjach. Na podstawie przeprowadzonej analizy potrzeb w zakresie rehabilitacji kończyny opracowano założenia do projektu egzoszkieletu rehabilitacyjnego z uwzględnieniem wymagań jakie musi spełniać urządzenie medyczne. Najważniejsze w mojej opinii elementy doktoratu wdrożeniowego to prace nad opracowaniem konstrukcji optymalnego łańcucha kinematycznego, doбором odpowiednich jednostek napędowych i przekładni a także badania wytrzymałościowe konstrukcji. Na podstawie opracowanych koncepcji łańcucha kinematycznego przygotowano modele cyfrowe, które poddano analizie w celu weryfikacji ich możliwości w zakresie realizacji wymaganych ruchów. W pracy opisano proces doboru jednostek napędowych do napędu szkieletu. Wykonano także analizy wytrzymałościowe w celu dobrania odpowiedniego materiału na elementy konstrukcji urządzenia. Zbudowany szkielet poddano następnie eksperymentalnej ocenie pod kątem wytrzymałości wybranych elementów konstrukcji oraz badaniem pod kątem bezpieczeństwa użytkowania wyrobów medycznych. Na podstawie przeprowadzonych prac wykonano dokumentację techniczną oraz dobrano technologie wykonania poszczególnych elementów urządzenia.

Po zrealizowaniu wymienionych wyżej zadań osiągnięto założony cel pracy, którym było opracowanie oryginalnej konstrukcji egzoszkieletu do rehabilitacji ręki.

Opracowana w ramach pracy doktorskiej konstrukcja została wdrożona i była podstawą do skonstruowania urządzenia, które umożliwia terapię kończyny górnej. W mojej ocenie opracowana konstrukcja ma duży potencjał w zakresie modyfikacji. Jej modyfikacja oraz zwiększenie zakresu funkcjonalności na podstawie uwag użytkowników nie powinna wymagać dużych zmian w konstrukcji urządzenia.

### *4.2. Ocena formalnej strony pracy*

Pod względem układu i podziału treści oraz kompletności materiału praca nie budzi zastrzeżeń. Jej mocną stroną jest bardzo zrozumiały i przystępny sposób opisanie zawartych w pracy zagadnień, których zrozumienie nie powinno być trudne nawet dla czytelnika mniej zorientowanego w tematyce pracy. Praca zawiera bardzo mało błędów technicznych. Ich obecność nie wpływa na stopień zrozumienia pracy ani na wysoką wartość merytoryczną pracy.

### 4.3. Uwagi krytyczne

W mojej ocenie praca nie zawiera poważniejszych błędów merytorycznych czy metodycznych. Poniżej przedstawiam kilka uwag, które w mojej ocenie poprawiłyby jakość pracy:

1. Uważam, że warto byłoby załączyć do pracy w formie załącznika rysunek przedstawiający zmontowane ramię bądź w formie rysunku złożeniowego, bądź rysunku w rzucie izometrycznym na większym formacie np. A2. Polepszyłyby to orientację czytającego w szczegółach konstrukcji egzozszkieletu. W niektórych miejscach pracy Autor omawia szczegóły konstrukcji, które są słabo albo w ogóle niewidoczne na rysunkach umieszczonych w pracy z uwagi na ich rozmiar.
2. Uważam że warto byłoby bardziej szczegółowo opisać czujniki siły i ich rozmieszczenie na konstrukcji z uwagi na ich znaczenie pod kątem zapewnienia odpowiednich parametrów ruchu egzozszkieletu i bezpieczeństwa pacjenta.
3. Autor nie podał czasu przekonfigurowania urządzenia do zmiennych wymiarów ręki pacjenta oraz na czym polega zmiana konfiguracji w przypadku zmiany rehabilitowanej ręki z prawej na lewą.
4. Nie podano danych na temat wymiarów gabarytowych i masy całego urządzenia razem z podstawą.
5. Chociaż nie było to celem pracy warto byłoby dodatkowo zawrzeć w pracy chociażby krótki opis oprogramowania urządzenia, z jakich modułów się składa i jakie funkcje ma realizować.
6. Warto byłoby także dodatkowo zawrzeć w pracy informację jak ma przebiegać i ile trwa programowanie sekwencji rehabilitacji dla nowego pacjenta.
7. Tabela nr 24 nie jest wspomniana w tekście.
8. Błędów redakcyjnych typu tzw. literówki i inne tego typu nie wskazywałem. Natomiast jak już wcześniej wspominałem jest ich bardzo mało i nie wpływają one ani na stopień zrozumienia pracy ani na jej wysoką wartość merytoryczną.

Powyższe uwagi mają charakter głównie porządkowy i nie umniejszają wartości dokonań autora pracy. Recenzent ma świadomość, że z uwagi na obszerność projektu egzozszkieletu nie było możliwości opisu wszystkich elementów projektu urządzenia w przedstawionej do recenzji pracy.

### 5. Podsumowanie

Przedstawiona mi do oceny praca obejmuje szeroki zakres zagadnień. Od prac typowo inżynierskich w zakresie konstrukcji i technologii po zagadnienia z zakresu medycyny dotyczące rehabilitacji kończyny oraz biomechaniki w zakresie pomiaru wielkości związanych z ruchem kończyny. Doktorant wykazał się dobrą znajomością tych zagadnień, prawidłowo zdefiniował cel pracy i dobrał metody aby zrealizować poszczególne etapy doktoratu wdrożeniowego. Wykazał się dobrą naukową wiedzą teoretyczną jak i inżynierską, prawidłowo projektując poszczególne koncepcje łańcucha kinematycznego, a także prawidłowo dobierając kryteria i ich wagi do oceny poszczególnych koncepcji rozwiązania. Zaprojektowanie

i wykonanie konstrukcji według wybranej koncepcji świadczy o dużej wiedzy i umiejętnościach Doktoranta w tym zakresie.

Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne. Wykonanie, walidacja oraz odebranie wykonanej konstrukcji przez partnera przemysłowego i prace nad jej komercjalizacją świadczą o prawidłowym zrealizowaniu celu doktoratu wdrożeniowego. Praca potwierdza, że mgr inż. Mariusz Sobiech posiada odpowiedni poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej do uzyskania stopnia naukowego doktora.

### **Wniosek końcowy**

Z uwagi na stwierdzenia zawarte w p. 5 recenzji uważam, że praca doktorska mgr inż. Mariusza Sobiech zawiera się w dyscyplinie inżynieria biomedyczna i spełnia w całości wymogi określone w Ustawie – art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed komisją doktorską Rady dyscypliny naukowej inżynieria biomedyczna, Politechniki Śląskiej.

Ponadto, z uwagi na bardzo wysoką wartość wyników naukowych i wdrożeniowych zawartych w pracy wnioskuję o nadanie wyróżnienia w przedmiotowym postępowaniu.

Z wyrazami szacunku,



dr hab. inż. Adam Mazurkiewicz