

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Mariusza Sobiecha pod tytułem:

Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mariusza Sobiecha było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Biomechaniczna Politechniki Śląskiej w Gliwicach, prof. dr. hab. inż. Roberta Michnika, z dnia 25 października 2024 roku, o sygnaturze RDIB.002.83.2024.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Aktualność wybranego tematu to zawsze wspólny mianownik takich czynników jak, zapotrzebowanie, dostępność rozwiązań i postęp wprowadzający dynamiczne zmiany czy to w produkcji czy w procesie. Tematyka rozprawy dotyczy opracowania łańcucha kinematycznego i jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej, której funkcjonalnością jest rehabilitacja kończyny górnej zarówno w sposób czynny jak i bierny.

Wzrost zapotrzebowania na tego typu rozwiązania związany jest z powiększającą się liczbą osób z niepełnosprawnościami ruchowymi co jest też w pewnym stopniu skorelowane ze starzeniem się społeczeństwa. Udział osób starszych w populacji mieszkańców Polski wg. GUS systematycznie rośnie. Na koniec 2021 r. liczba osób w wieku 60 lat i więcej wyniosła 9,7 mln i w stosunku do roku poprzedniego zwiększyła się o 0,2%.

Zgodnie z raportem NIK opublikowanym w 2023 roku dotyczącym rehabilitacji leczniczej obserwujemy spadek liczby świadczeniodawców tego typu usług, przy wzroście osób wymagających różnego typu zabiegów. Co ciekawe w analizowanym okresie wzrosła liczba pracujących w zawodzie lekarzy specjalistów, którzy spełniali wymagania do udzielania świadczeń rehabilitacji leczniczej. Według danych Naczelnej Izby Lekarskiej, na koniec 2018 r. w zawodzie pracowało 2568 lekarzy, a na koniec 2020 r. było to już 2750 lekarzy (wzrost o 3,5%). W tym samym okresie wzrosła również o prawie 16% liczba fizjoterapeutów. Analizując te dane dotykamy czynników ekonomicznych, głównie wzrostu kosztów pracy ludzkiej. Naturalną odpowiedzią na tego typu problemy są procesy automatyzacji i robotyzacji najbardziej typowych powtarzalnych zabiegów. Dlatego urządzenia służące do rehabilitacji stale są rozwijane. W Polsce działa ponad 100 firm, które produkują różnego rodzaju roboty służące do celów medycznych. Dodatkowo motorem tych działań jest ciągły rozwój możliwości obliczeniowych systemów informatycznych, sensorów i aktuatorów oraz algorytmów sterowania wspomaganych systemami teleinformatycznymi oraz wizją maszynową. Wszystko to sprawia, że w ośrodkach naukowych podejmowane są próby opracowania nowych ulepszonych rozwiązań w obszarze automatycznej czy też zrobotyzowanej rehabilitacji

Przegląd głównych baz bibliograficznych, zawierających prace z dziedziny fizjoterapii i rehabilitacji (Pub-Med, PEDro, CINAHL, Health Source: Nursing/Academic Edition) z użyciem słów kluczowych „rehabilitation robot”, „rehabilitation” + „robot”, za ostatnie 10 lat pozwala na zauważenie, że prace dotyczące robotyki i rehabilitacji stanowią niespełna 1%. Niemniej dynamika ich wzrostu rok 2014 do 2024 to ponad 12 razy. Świadczy to o tym, że podjęta przez Doktoranta tematyka nie jest podejmowana przez duży odsetek badaczy oraz że bardzo szybko się rozwija.

Konkludując podjęta przez Doktoranta w dysertacji problematyka doboru łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej jest w mojej ocenie aktualna.

2. Przegląd treści pracy

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mariusza Sobiecha pt. „Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej” zawiera 149 stron, podzielonych na 12 rozdziałów, spis rysunków, spis tabel oraz bibliografię obejmującą 63 pozycje literaturowe wykorzystane podczas przygotowania dysertacji. Praca zawiera 92 rysunki oraz 25 tabel.

Pracę rozpoczyna streszczenie w języku polskim i angielskim. We wstępie Autor podaje dane o liczbie osób z niepełnosprawnościami i przewidywany jej wzrost na podstawie danych Światowej Organizacji Zdrowia (WHO). Ponadto umiejscawia swoje rozwiązanie jako osiągnięcie w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy. W ramach projektu nr POIR.01.02.00-00-0014/17 pod tytułem „Egzoszkielec do wielopłaszczyznowej rehabilitacji kończyn górnych w środowisku wirtualnym z siłowym sprzężeniem zwrotnym”, realizowanym

w kooperacji z Krakowskim Instytutem Technologicznym, wcześniej Instytut Techniki i Aparatury Medycznej w Zabrze, wchodzącym w skład Sieci Badawczej Łukasiewicz oraz partnerem przemysłowym, zaplanowano wdrożenie wyników otrzymanych w dysertacji jako część komercyjnego produktu finalnego.

Rozdział 2 dotyczy omówienia anatomii kończyny górnej, jej biomechaniki z podziałem na obręcz kończyny górnej oraz części wolnej. Dalej znajdujemy informacje o biologicznych aktuatorach odpowiedzialnych za poruszanie kończyną czyli o układzie mięśniowym. Kolejny podrozdział to informacje o funkcjach kończyny górnej w życiu codziennym. Rozdział kończy opracowany na podstawie danych literaturowych obszerny podrozdział dotyczący cechy antropometrycznych, w którym zawarto: podział na trzy główne osie i związane z nimi płaszczyzny ciała człowieka, tabelaryczne zestawienie cech kończyny, zakresy ruchu w stawie ramiennym w płaszczyznach czołowej, strzałkowej i poprzecznej, zakresy ruchów w stawie łokciowym w płaszczyźnie strzałkowej i poprzecznej oraz zakresy ruchu w obrębie nadgarstka w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej. Podane wartości zakresów ruchu dla stawu ramiennego, łokciowego i nadgarstka tabelaryzowano i porównano z normą ISOM.

Przegląd aktualnego stanu wiedzy i kilku rozwiązań technicznych Autor zawarł w rozdziale 3. Przedstawił metody rehabilitacji kończyny górnej, podał dane o historii powstawania robotów i urządzeń do jej rehabilitacji oraz systematykę klasyfikowania egzoszkieleatów. Następnie opisał szczegółowo takie rozwiązania laboratoryjne, czy też koncepcyjne jak urządzenie ARMin (Zurych, Szwajcaria), RENU (PIAP, Polska), IntelliArm (Instytut Technologii Boston, USA), ARM-100 (Instytut Techniki i Aparatury Medycznej w Zabrze, Górnośląskie Centrum Rehabilitacji „Repty”, Politechniką Śląską, Polska), HARMONY (Uniwersytet w Teksasie, USA). Skrótoowo też przytoczył informacje o urządzeniach L-EXOS, ARAMIS (Włochy), SUEFUL-7 (Japonia), ChARMin (Szwajcaria), 6-REXOS (Sri Lanka). Pan Mariusz Sobiech podał również dane i opisy dwóch rozwiązań komercyjnych tj. ARMEO®, ALEX®. Rozdział wieńczy ocena stanu techniki przeprowadzona jako zestawienie wybranych robotów służących do rehabilitacji kończyny górnej przeprowadzone dla takich danych jak rok produkcji, liczba aktywnych i pasywnych stopni swobody, rodzaj wykorzystanego napędu oraz analiza potrzeb medycznych.

Rozdział 4 to przedstawienie celu i zakresu pracy, w którym jako główny cel zdefiniowano znalezienie optymalnego łańcucha kinematycznego, dobór jednostek napędowych oraz zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości konstrukcji egzoszkieleatu rehabilitacyjnego kończyny górnej, natomiast zakres pracy przedstawiono zgodnie z harmonogram realizacji pracy doktorskiej zamieszczonym w Indywidualnym Planie Badawczym Autora dysertacji.

Prace projektowe Doktorant rozpoczyna od podania założeń i ograniczeń wynikających z normatywów prawnych. W zestawieniu wymagań znajdujemy informacje, że urządzenie będzie stacjonarne, zapewni rehabilitację całej kończyny górnej bez uwzględnienia ruchów palców, zapewni rehabilitację obu rąk, dla osoby dorosłej o wadze do 100 kg, będzie uniwersalne w zakresie długości części ramiennej i przedramiennej, będzie posiadało aktywne stopnie swobody napędzane silnikami elektrycznymi, umożliwi wykonywanie ćwiczeń biernych oraz czynnych, zapewni bezpieczeństwo użytkownika. Plan projektowania i budowy

założono jako: projektowanie, wstępny projekt, model fizyczny w pełnej skali, ocena i weryfikacja oraz udoskonalenie egzoszkieletu.

W odniesieniu do wymagań prawnych Doktorant założył, że projektowane urządzenia będzie klasy IIb oraz będzie zgodne z dziesięcioma normami zharmonizowanymi wynikającymi z rozporządzeniem Unii Europejskiej nr 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 w sprawie wyrobów medycznych (ang. *Medical Device Regulation*, MDR). Jako rozwiązanie dedykowane do wdrożenia będzie zgodne z Dyrektywą Maszynową 2006/42/WE.

Rozdział 6 dotyczy wyznaczenia trajektorii ruchów terapeutycznych przyjętych w dalszych pracach jako wzorcowe. Realizacja tego rozdziału jest zbieżna z osiągnięciami projektu nr R13 027 02 pt. „Zrobotyzowane urządzenie rehabilitacyjne do prowadzenia wielopłaszczyznowego ruchu biernego i czynnego kończyn górnych z wykorzystaniem metod neurofizjologicznych” realizowanego przez Instytut Techniki i Aparatury Medycznej, obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny, Politechnikę Śląską w Gliwicach oraz Górnośląskie Centrum Rehabilitacji w Reptach. Badania realizowano metodą fotogrametryczną ze znacznikami, z wykorzystaniem stanowiska przedstawionego w dysertacji. Ruchy realizowane przez doświadczonych rehabilitantów podzielono na ruchy proste oraz ruchy złożone polegające na ich wykonywaniu jednocześnie w kilku stawach w różnych płaszczyznach. Otrzymane wyniki uśredniono, przefiltrowano oraz wyznaczono zakresy kątów. Wyznaczenie wzorców ruchowych pozwoliło określić i ocenić ruchliwość w poszczególnych stawach, oszacować czas wykonywania poszczególnych ruchów, co umożliwiło określenie prędkości jaką muszą zapewnić elementy wykonawcze urządzenia podczas rehabilitacji.

W dalszej części pracy w rozdziale 7, Doktorant realizuje dobór łańcucha kinematycznego. Łańcuch kinematyczny egzoszkieletu określa w jaki sposób poszczególne człony są połączone ze sobą i jak poruszają się względem siebie. W pracy w pierwszym kroku Autor zaproponował trzy koncepcje rozwiązań podstawy, które umożliwiają ustawienie urządzenia w dogodnej dla pacjenta pozycji. Analogicznie proponuje trzy konstrukcje egzoszkieletu. Przedstawia ich schematy kinematyczne i uproszczone modele opracowane w oprogramowaniu Autodesk Inventor 2013. Modele cyfrowe 3D opracowanych koncepcji posłużyły do określenia zakresów ruchów poszczególnych członów. Ponadto zamodelowano kończynę górną z ograniczeniami antropometrycznymi. Analizę możliwych do realizacji ruchów dla zaproponowanych koncepcji przeprowadzono dla odwodzenia i przywodzenia w stawie ramiennym, poziomego odwodzenia i przywodzenia w stawie ramiennym, zginania i prostowania w stawie ramiennym, rotacji wewnętrznej i zewnętrznej w stawie ramiennym, zginania i prostowania w stawie łokciowym, rotacji przedramienia oraz kilku rodzajów zgięć w obrębie nadgarstka. Wykonane prace pozwoliły wyznaczyć graniczne pozycje osiąmane przez poszczególne koncepcyjne konstrukcje egzoszkieletu przy wykonywaniu zdefiniowanego ruchu. Uwidocznily jak to nazwał Autor „problematyczne ruchy”, dla których wprowadzono modyfikacje konstrukcyjne, które dotyczyły: w rozwiązaniu o nr 2 przesunięcia mocowania prowadnicy oraz tzw. zamknięcia prowadnicy łukowej, natomiast w rozwiązaniu nr 1 zwiększenia zakresu ruchu odwodzenia.

Wybór najlepszego rozwiązania łańcucha kinematycznego dokonano na podstawie analizy porównawczej, uwzględniając takie kryteria jak: zakres wykonywanych ruchów, ciągłość wykonywania ruchów w ich pełnym zakresie, prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji egzozszkieletu z pacjentem, możliwość modyfikacji konstrukcji oraz ocena ekspercka przez terapeutę. W badaniach wykorzystano zakresy ruchów zgodne z normą ISOM i ostatecznie jako najlepsze rozwiązanie wskazano propozycję egzozszkieletu o nr 1 zamontowanego na podstawie o nr 3.

Rozdział 8 poświęcony jest doborowi napędów dla zaproponowanej konstrukcji. Na wstępie Autor dokonuje porównania napędów zasilanych różnym medium podaje ich wady i zalety. Szerzej traktuje o silnikach BLDC oraz mięśniach pneumatycznych. Swoje rozważania odnosi do rozwiązań najczęściej stosowanych w biomechanice. Dalej mamy informacje o przekładniach min. walcowych, stożkowych, ślimakowych, planetarnych, falowych oraz cykloidalnych.

Jako wybór rodzaju zastosowanego napędu przyjęto silniki bezszczotkowe BLDC, zasilane napięciem bezpiecznym poniżej 48 [V].

Jednym z najważniejszych parametrów przy doborze napędów jest zdefiniowanie jego momentu napędowego w odniesieniu do realizowanej konstrukcji. Tutaj ten trudny etap pracy projektowej pominięto przyjmując dostępne w literaturze wyniki badań. Dla tak zdefiniowanych wymogów momentowych przeprowadzono ocenę wielokryterialną oraz analizy porównawcze. Zdefiniowano siedem kryteriów oceny jak: minimalna masa, małe gabaryty, możliwość bezpośredniego montażu, dostępność rynkową, cenę zakupu, możliwość integracji z globalnym układem sterowania urządzenia, możliwość stosowania gotowych układów zabezpieczeń. Dla tych kryteriów przyjęto pięciostopniową skalę istotności definiując ją a priori. Finałem prowadzonych analiz była propozycja napędów zaimplementowanych w egzozszkielecie.

W rozdziale 9 przedstawiono analizę wytrzymałościową konstrukcji egzozszkieletu. W badaniach numerycznych wykorzystano model geometryczny egzozszkieletu opracowany w oprogramowaniu Autodesk Inventor zaimportowany do środowiska Ansys. Początkowy model, zbudowany z ponad 1000 komponentów, następnie znacznie go redukując. Zakres przeprowadzonych analiz numerycznych obejmował dobór cech materiałowych oraz przeprowadzenie analiz wytrzymałościowych. Do wyznaczenia naprężeń zredukowanych zastosowano hipotezę wyężeniową Hubera-von Misesa. Analizowano różne ustawienia egzozszkieletu, przy budowie ich ze stali konstrukcyjnej 18G2A oraz ze stopu aluminium PA38. Przeprowadzona analiza wytrzymałościowa pozwoliła zlokalizować „słabe punkty” konstrukcji, które zostały poprawione np. poprzez zmianę grubości ścianek elementów czy dodanie wzmocnień w postaci żeber czy zastrzałów.

W dalszej części pracy w rozdziale 10 na podstawie dotychczasowych wyników zaprojektowano model egzozszkieletu w oprogramowaniu CAD Autodesk Inventor. Dodatkowo uwzględniono elementy elektroniki, których modele pozyskano od projektantów płytek obwodów drukowanych, opracowanych w oprogramowaniu Altium Designer. Bazując na zaprojektowanym modelu 3D opracowano dokumentację konstrukcyjną urządzenia

obejmującą rysunki złożeniowe oraz wykonawcze. W procesie produkcyjnym wykorzystano obróbkę ubytkową, laserowe cięcie blach, spawania TIG , druk 3D w technologii FFF. Wytworzone detale oraz zakupione elementy, zostały złożone przez Doktoranta w podzespoły, które następnie pozwoliły zbudować kompletny prototyp urządzenia.

Kompletny prototyp urządzenia został poddany licznym badaniom inżynierskim, obejmującym zarówno aspekty mechaniczne jak i elektroniczne oraz sprawdzono poprawność działania układu sterowania. Przetestowano ruchliwość urządzenia i możliwości rehabilitacji całej kończyny górnej w stawie ramiennym, łokciowym oraz nadgarstkowym poprzez weryfikację realizacji możliwych zakresów ruchów. Opracowano i zwalidowano procedurę awaryjnego zatrzymania z wykorzystaniem wyłączników zatrzymania awaryjnego. Dalej przeprowadzono doświadczalną weryfikację wytrzymałości konstrukcji urządzenia

W związku z tym, że egzoszkielec traktowany jest jak wyrób medyczny, został on poddany badaniom funkcjonalnym i bezpieczeństwa, w akredytowanym Laboratorium Badawczym LAB-ITAM.

Finalnie, jak podaje Doktorant uznano, że urządzenie jest efektywne w działaniu oraz bezpieczne w użytkowaniu.

W rozdziale 11 pt. „Wdrożenie” znajdujemy informacje że, wyniki przeprowadzonych badań i analiz oraz opracowane rozwiązania w ramach pracy doktorskiej były elementem składowym projektu egzoszkieletu umożliwiającego terapię całej kończyny górnej Powstałe urządzenie jest potwierdzeniem realizacji celu pracy (doktoratu wdrożeniowego) oraz jego implementacji w ramach projektu realizowanego w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Krakowskim Instytucie Technologicznym.

Urządzenie zbudowane na podstawie opracowanego w ramach doktoratu schematu łańcucha kinematycznego z odpowiednio dobranymi jednostkami napędowymi, zostało zweryfikowane w trakcie badań inżynierskich oraz w laboratorium akredytowanym. Wyniki tych badań potwierdziły prawidłowe działanie oraz spełnienie założonej funkcjonalności i wymagań normatywnych dotyczących bezpieczeństwa w aspekcie mechanicznym i elektrycznym urządzenia.

Urządzenie zostało zaakceptowane przez partnera przemysłowego, co stanowi istotne osiągnięcie projektu realizowanego przez Instytut, jak i realizowanego doktoratu wdrożeniowego. Pełne wprowadzenie produktu na rynek będzie zwieńczeniem tych prac i kluczowym krokiem do jego komercjalizacji.

W podsumowaniu wykazano że zdefiniowany cel pracy doktorskiej został osiągnięty poprzez zamodelowanie, zaprojektowanie, wykonanie i przetestowanie części mechanicznej egzoszkieletu, który pozwala na terapię całej kończyny górnej.

Rezultaty pracy doktorskiej mają duży potencjał do wykorzystania w innych projektach.

3. Wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy doboru łańcucha kinematycznego egzoszkieletu. Tytuł rozprawy brzmi „Dobór optymalnego łańcucha kinematycznego oraz jednostek napędowych egzoszkieletu kończyny górnej”. W pracy nie znajdujemy klasycznego podejścia do syntezy mechanizmu. Autor na podstawie rozwiązań literaturowych proponuje trzy rozwiązania podstawy i trzy egzoszkielety. Analizując ruchliwość oraz zasięgi, wybiera na podstawie oceny parametrów najlepsze rozwiązanie w danej klasie. Nie ma tu zdefiniowanej wielokryterialnej funkcji celu, która podlega poszukiwaniu ekstremum znanymi metodami optymalizacyjnymi. W tytule słowo optymalnego należałoby pominąć.

Podjęta przez Autora dysertacji problematyka naukowa pozwoliła na zdefiniowanie celu pracy, który logicznie zrealizowano w kolejnych rozdziałach. Zdefiniowany przez Doktoranta zakres pracy tj. opracowanie części mechanicznej, dobór napędów, wykonanie dokumentacji, testy wytrzymałościowe oraz prace związane z wykonaniem niektórych elementów i ich montażem jest bardzo obszerny. Podjęcie jego realizacji zakończone sukcesem świadczy o szerokiej wiedzy oraz interdyscyplinarnych umiejętnościach.

Proces projektowania urządzenia redundantnego, a takim jest egzoszkielec, zaczynamy od rozwiązania zadań kinematyki, następnie przeprowadzamy analizy dynamiczne w wyniku, których otrzymujemy wartości wejściowe w postaci wymaganych momentów napędzających dla doboru napędów. Ponieważ jest to urządzenie jak wspomniano redundantne, gdzie parametry masowe modułów napędowych poszczególnych stopni swobody wpływają na siebie nawzajem, dlatego procedury te przeprowadza się bardzo często iteracyjnie. Analogicznie sytuacja wygląda jeśli zmieniamy parametry masowe związane z pracami dotyczącymi zagadnień wytrzymałościowych. W pracy nie znajdujemy analizy dynamicznej dla konstruowanego mechanizmu jest to niewątpliwie słaba strona pracy. Autor przyjął dane odnośnie wymaganych momentów jak to podaje z pracy E. Świtoński i A. Guzik-Kopyto prowadzonej wśród studentów Politechniki Śląskiej i omówionej w literaturze nr [55]. Co dziwi praca nr 55, jest innych autorów niż podał Doktorant, a mianowicie D. Tejszerska, E. Świtoński, M. Gzik, A. Głowacka. Wymaga to wyjaśnienia.

Zaprezentowana metodologia pracy oprócz wyżej wymienionego uproszczenia, opracowane rozwiązania, sposób wykorzystania narzędzi inżynierskich są poprawne.

Autor podczas pisania pracy wykazał się dobrym rozeznaniem w rozpatrywanej problematyce naukowej. Na podkreślenie zasługuje sprawność w organizacji warsztatu badawczego i umiejętność wyciągania właściwych wniosków z przeprowadzanych analiz.

Poszczególne etapy pracy świadczą o dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora oraz o jego umiejętności prowadzenia prac badawczych. Warto tu zwrócić uwagę na wielorakość stosowanych narzędzi i metod, których właściwe używanie wymaga solidnej podbudowy teoretycznej i doświadczenia. Rozdział dotyczący doboru napędów z wprowadzonymi parametrami istotności dał poszczególnych danych w odniesieniu do wymagań oceniam bardzo wysoko.

Główna część pracy dotyczy zagadnień mechaniki, dodatkowo Autor podczas konstruowania uwzględnia zagadnienia z obszaru automatyki, technologii wytwarzania, metrologii, czy sterowania. Przez to praca ma charakter mechatroniczny i jest to niewątpliwie jej mocna strona, umiejętność poruszania się w zagadnieniach z różnych dyscyplin takich jak: inżynieria mechaniczna, automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, informatyka techniczna. Jest to zaleta pracy, która pozycjonuje ją w charakterze rozwiązań wyróżniających się i może być podstawą do jej wyróżnienia

Słabą stroną pracy jest stosowanie przeskoków myślowych, brak szczegółowego wyjaśnienia i pokazania elementów, które poprawiłyby zrozumienie procesu projektowego. Autor tłumaczy taką sytuację już w tekście pracy jej implementacyjnym charakterem i niemożliwością zaprezentowania danych prawnie chronionych stanowiących własność np. partnera przemysłowego.

Strona edytorska rozprawy jest na dobrym poziomie, dużo do życzenia pozostawia jakość rysunków.

Są rzeczy które są dyskusyjne, wymagają komentarza albo wyjaśnień, wymieniam je poniżej dzieląc je na uwagi ogólne i szczególne.

Uwagi ogólne

Str. 23 – przegląd aktualnej wiedzy i stanu techniki nie jest klasycznym przytoczeniem rozwiązań w obrębie budowy egzoszkieleatów na podstawie materiałów źródłowych. Jest to porównanie parametrów czterech rozwiązań koncepcyjnych oraz dwóch komercyjnych. W wątpliwość poddaje ich aktualność są to rozwiązania z lat 2004 do 2013, co przy tak dużej dynamice zmian w tym obszarze prac badawczych pozostawia dużo do życzenia.

Str. 60, rys. 35, ale też w innych miejscach, Autor myli pojęcie toru i trajektorii. Trajektorja związana jest z czasem natomiast tor ruchu punktu to wykres w przestrzeni xyz, bez uwzględnienia czasu jego realizacji.

W wielu miejscach w tekście znajdujemy dla modułów napędowych jedynie informacje o producencie, dla czytelnika pracy o charakterze naukowym jest to informacja drugorzędna, powinien Autor podać rodzaj napędu, prędkość obrotową, moment, stopień redukcji, poruszać się w opisach zawierających dane techniczne istotne w procesie konstruowania.

Str. 7 „optymalne trajektorie”, błędne sformułowanie to nie są w żadnym przypadku optymalne trajektorie,

Str. 14 podrozdział 2.1.1 ma tylko 5 zdań. Podrozdział powinien mieć wstęp, część zasadniczą i podsumowanie. Niewłaściwe jest dzielenie pracy na tak dużą liczbę bardzo małych podrozdziałów.

Praca zawiera dużą liczbę rysunków i tabel wiszących oraz spotykamy kończenie podrozdziałów wypunktowaniem.

Często autor myli pojęcia liczba i ilość.

Wiele rysunków ma opisy w języku angielskim, cała praca jest w języku polskim.

W podrozdziale 7.2 wymieniono ruchy proste dla których opisy zawarto w podrozdziale 7.2.2. dlaczego podzielono logicznie spinający się podrozdział dodatkowym rozdziałem 7.2.1.

Str. 78 co oznacza sformułowanie „wygórowane wymagania wytrzymałościowe”

Str. 92 zawarto sformułowanie „Wartości momentów zostały zawyżone”, jeśli wprowadzono współczynniki bezpieczeństwa należało podać ich wartości i uzasadnić ich przyjęcie.

Uwagi szczegółowe

Występujące w pracy błędy edytorskie, stylistyczne czy językowe nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych informacji. Poniżej wymienię błędy, na które należy zwrócić szczególną uwagę w przyszłości.

- Str. 17 jest „Miesnie” powinno być Mięśnie,
- Str. 17 jest „higienie osobista” powinno być higiena osobista,
- Str. 22 tabela wisząca,
- Str. 24 podając podział zabiegów fizjoterapeutycznych powinna być podana literatura,
- Str. 25 jest „ilość powinno być liczby,
- Str. 25 jest „wielu dzień medycyny” błąd stylistyczny,
- Str. 25 trzeci akapit błąd stylistyczny,
- Str. 28 rysunek podpisy w języku angielskim,
- Str. 28 jest „kończy górnej” powinno być kończyny górnej,
- Str. 29 rysunek wiszący,
- Str. 30 rys 15 opis rysunku w języku angielskim,
- Str. 30 rys 16 opis rysunku w języku angielskim,
- Str. 32 rys 18 wiszący,
- Str. 35 rys.20 wiszący,
- Str 36 podrozdział kończy wymienienie,
- Str. 39 zdanie błędne stylistycznie „Stanowi kluczowy elementem opieki”,
- Str. 39 zdanie błędne stylistycznie „rehabilitację, która wymagania wykonywania”,
- Str. 47 w tytule mamy „Wymagania prawne i normatywny” powinno być normatywy,
- Str. 51 jest „est” powinno być jest,
- Str. 53 rys. 24 wiszący,
- Str. 54 „jest marker 10, kolor niebieski” na rys 25, który jest monochromatyczny,
- Str. 55 rys. 27 nieczytelny
- Str. 56 rys. 29 wiszący,
- Str. 76 rys. 48 wiszący,
- Str. 80 rys. 54 wiszący,
- Str. 98 jest „ilość” powinno być liczba,
- Str. 113 rys. 75 wiszący,
- Str. 124 rys. 86 wiszący.

Konkludując wskazane błędy językowe, edytorskie, zapożyczenia czy zwroty o charakterze slangowym nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych treści. Są wskazówką dla Autora na przyszłość, pozwalającą na unikanie takich samych czy analogicznych nieprawidłowości. Szczególną uwagę powinien Autor zwrócić na jakość rysunków, które pozostawiają bardzo dużo do życzenia.

4. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa dotyczy doboru łańcucha kinematycznego oraz napędów egzoszkieletu kończyny górnej. Jej realizacja spełnia założenia stawiane projektom Doktorat Wdrożeniowy oraz stanowiła część opracowania rzeczywistej konstrukcji wspólnie z partnerem przemysłowym oraz Krakowskim Instytutem Technologicznym wchodzącym w skład Sieci Badawczej Łukasiewicz.

Zdefiniowany cel pracy został zrealizowany, a sposób prowadzenia prac badawczych jest zgodny z obowiązującymi zasadami i świadczy o dobrym przygotowaniu Kandydata do pracy naukowej.

Wartym podkreślenia jest fakt aktywności Doktoranta w innych projektach takich jak: NeuroPlay, Amulet, Ventil, TeleKaTeG, EnviroPulmoGuard, CardioGuard, ponadto jest autorem patentu P.243473 pt. „Uchwyt zaciskowy tabletu z funkcją GSR” oraz posiada w dorobku zgłoszenie patentowe W.130297 pt. „Opaska neurologiczna”.

Uważam, że opiniowana praca Pana mgr. inż. Mariusza Sobiecha spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 20.04.2023 r., poz. 742) i może być dopuszczona do dalszego procedowania.

Andrzej Burghardt