

prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 839 140
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, 22.04.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej

„Optymalizacja biomanipulatora typu ręka człowieka do zastosowania w celach protetycznych dla pacjentów z różnym stopniem amputacji”

autorstwa mgr. inż. WOJCIECHA JOPKI

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo od Pani Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Biomedycznej Politechniki Wrocławskiej, Pani prof. dr hab. inż. HALINY PODBIELSKIEJ, i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. WOJCIECHA JOPKI pt. „Optymalizacja biomanipulatora typu ręka człowieka do zastosowania w celach protetycznych dla pacjentów z różnym stopniem amputacji”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. MAGDALENA PRZYBYŁO.

2. Omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, łącznie na 122 stronach maszynopisu formatu A4. Składa się ona z: deklaracji autora, streszczenia w j. polskim i j. angielskim, podziękowania, spisu rysunków, spisu tablic, listy używanych skrótów, następujących rozdziałów: (1) Cel pracy; (2) Wstęp; (3) Analiza stanu techniki; (4) Zasady konstrukcji i optymalizacji; (5) Optymalizacja biomanipulatora typu proteza ręki; (6) Wyniki optymalizacji; (7) Zastosowanie kliniczne; (8) Podsumowanie; Dodatku A „Lista publikacji i osiągnięć”, bibliografii zawierającej wykaz pozycji książkowych i artykułów oraz 19 odwołań do stron internetowych.

W niniejszej rozprawie Autor skupił się na problematyce związanej z procesem konstruowania kompaktowej protezy ręki zapewniającej odtworzenie funkcjonalności zbliżonej do ludzkiej kończyny. Jest to zagadnienie, które z założenia wymaga bardzo interdyscyplinarnego ujęcia z implementacją modułowego systemu protezowego, w którym poszczególne moduły protezy komponowane są według spersonalizowanych cech potencjalnego pacjenta. W tym bardzo złożonym zagadnieniu niewątpliwie istnieje szereg problemów, które winny być rozwiązane na etapie projektowania. W trakcie konstruowania biomanipulatora, który jest najbardziej zaawansowanym typem protezy funkcjonalnej, celem jest zapewnienie pacjentom możliwości wykonywania wielu precyzyjnych ruchów. Autor rozprawy wykazał istotne znaczenie odtworzenia szeregu czynności, takich jak np. chwytanie, przesuwanie, podnoszenie lub trzymanie



przedmiotów. W tak zaawansowanych rozwiązaniach podstawą działania protezy jest odbieranie impulsów elektrycznych wytwarzanych przez mięśnie pacjenta. Stąd też, dzięki specjalnym sensorom umieszczonym w protezie, przekazuje się impulsy do silniczków, które wprawiają w ruch dłoń protezy. Aby jednak móc w maksymalnym stopniu wykorzystać możliwości protezy mioelektrycznej, niezbędnym warunkiem jest jej właściwe przygotowanie (wykonanie) oraz sam trening pacjenta. Doktorant wykazał, że zastosowanie opracowanego układu w postaci modułowej daje także możliwość serwisowania poszczególnych modułów przy uproszczonym procesie ich wytwarzania. W pracy przyjęto założenie, że dzięki optymalizacji rozwiązań możliwa jest również jednostkowa redukcja kosztów ponoszonych przez pacjenta, przy jednoczesnej poprawie technicznego wsparcia pacjenta w procesie eksploatacji protezy. Doktorant przedstawił opracowane w ramach rozprawy doktorskiej innowacyjne rozwiązania modułowe, które są wynikiem zidentyfikowania potrzeby medycznej. Jest to z pewnością jeden z pierwszych etapów, na bazie którego powstaje opracowanie docelowego rozwiązania nadającego się do zastosowania przez pacjentów z różnymi poziomami amputacji. Finalnie wykonane spersonalizowane rozwiązanie biomanipulatora podlega ocenie klinicznej stwierdzającej możliwość przywrócenia funkcjonalności działania kończyny górnej u pacjenta po amputacji. Cały ten proces obejmujący wieloetapowość konstruowania protezy kończyny górnej niewątpliwie nadaje się do wdrożenia i komercjalizacji w medycynie urazowej. Doktorant zaprezentował, że dane kliniczne służą wypracowaniu założeń projektowych dla konkretnej protezy, a dzięki zastosowaniu systemu modułowego można zaprojektować docelowe rozwiązanie spełniające wymagania wynikające ze sposobu użytkowania protezy. Autor wykazał także, że na etapie technicznym niezbędne jest wypracowanie założeń koncepcyjnych modułowego rozwiązania (w tym m.in. systemu sterowania, zasilania, układu napędów, konstrukcji struktury nośnej protezy) obejmujących kolejne rozwiązania konstrukcyjne połączone z odpowiednim doбором materiałów spełniających wymagania normowe, które mogą być użyte do wykonania poszczególnych modułów. Ważnym aspektem podniesionym w dysertacji jest także zastosowanie nowoczesnych technologii wytwarzania (np. technologia druku 3D) mając na względzie redukcję kosztów wytwarzania. Etapem końcowym zawartym w rozprawie jest procedura kliniczna, w skład której wpisuje się m.in. trening, a także i analiza uwzględniająca odczucia samego pacjenta wynikające z procesu eksploatacji protezy. Daje to możliwość wprowadzenia korekt, które przełożą się na jeszcze lepsze dopasowanie opracowanego systemu protezowego dedykowanego dla wybranego pacjenta.

Doktorant dla potrzeb realizacji rozprawy zdefiniował cel ogólny pracy, którym było „opracowanie modułowego biomanipulatora dla osób z dysfunkcjami kończyny górnej, opartego o układy biomechatroniczne z optymalizacją struktury kinematycznej oraz systemu sterowania.” Określony został także zakres zagadnień niezbędnych do jego realizacji, a który obejmował

(str. 1): „wyznaczenie i optymalizację kryteriów projektowych dla protezy, które spełnia wymagania stawiane przez medycynę zindywidualizowaną; przygotowanie projektu wykonawczego dla protezy ręki spełniającego wyznaczone kryteria techniczne i funkcjonalne; wykonanie i optymalizacja techniczna prototypu protezy ręki; przeprowadzenie analizy rynkowej dla opracowanej protezy; badania opracowanej konstrukcji z udziałem pacjentów.” Autor zdefiniował także zakres prac badawczych, które uznał za niezbędne do osiągnięcia założonego celu, a który zawierał się w następujących punktach: „analiza aktualnych rozwiązań biomanipulatorów, z uwzględnieniem układów mechatronicznych; analiza rozwiązań konstrukcyjnych oraz uwarunkowań stochastycznego procesu działania układu nerwowo-mięśniowego człowieka w kończynie górnej; sformułowanie celu badawczego oraz metodyki jego rozwiązania; analiza funkcjonalna możliwości sterowania manipulatora; opracowanie sposobu zdejmowania sygnałów i opracowanie układu sterowania sprzężonego z układem nerwowym człowieka; optymalizacja systemu sterowania z punktu widzenia analizy sygnałów stochastycznych i ich korelacja z funkcjami motorycznymi; zaprojektowanie konstrukcji wieloczołowego manipulatora wraz z optymalizacją układu napędowego w oparciu o dostępne komercyjnie napędy i elementy mechanizmów motorycznych; wykonanie przed-prototypu oraz badania opracowanego prototypu; przygotowanie do produkcji i wykonanie serii prototypowych urządzeń; testy funkcjonalne i użytkowe końcowej konstrukcji biomanipulatora.” Wszystkie wyszczególnione etapy należy uznać za w pełni uzasadnione, merytorycznie poprawne i nie budzące żadnych wątpliwości.

Dodatkowo Autor zawarł w dysertacji deklarację, w której istotne są dwa stwierdzenia, a mianowicie: „praca była realizowana na Politechnice Wrocławskiej we współpracy z firmą BioEngineering.pl Sp. z o.o.” oraz „praca była realizowana bezpośrednio przeze mnie z udziałem mojego zespołu w ramach mojej działalności gospodarczej przekształconej w BioEngineering.pl Sp. z o.o., której jestem nieustannie Prezesem Zarządu oraz większościami udziałowcem.”

Mgr inż. Wojciech Jopek jest autorem i współautorem 21 zarejestrowanych patentów oraz współautorem 22 referatów konferencyjnych i artykułów. Z zamieszczonej w wykazie bogatej listy publikacji tylko 2 pozycje są zarejestrowane w bazie Scopus i na dzień przygotowania recenzji były dwukrotnie cytowane. Zaprezentowana publikacyjność spełnia wymagania ustawowe przy składaniu rozprawy doktorskiej.

3. Pytania merytoryczne oraz uwagi dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy, Recenzent przedstawia następujące kluczowe kwestie i wątpliwości.

W zakresie formalnym Recenzent pragnie stwierdzić, iż:

- 1) Autor na wstępie swojej dysertacji w rozdziale pracy „cel pracy” zawarł jedynie cel ogólny rozprawy. W treści rozprawy brak jest więc spełnienia wymogu formalnego stawianego dysertacjom doktorskim, który nakazuje, by przedmiotem rozprawy doktorskiej było „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego” (art. 187 Ustawy). Brak jest jasno zdefiniowanego celu naukowego lub tezy oraz zakresu podzadań naukowych, które pozwalają wskazać cel naukowy osiągnąć lub postawioną tezę naukową udowodnić.
- 2) Autor dysertacji zawarł w swojej deklaracji autorskiej (strona oznaczona „iii”) stwierdzenie dotyczące autorstwa przedstawionych wyników zawartych w rozprawie zamieszczając m.in. następujące zapisy: „praca była realizowana na Politechnice Wrocławskiej we współpracy z firmą BioEngineering.pl Sp. z o.o.”, „praca była realizowana bezpośrednio przeze mnie z udziałem mojego zespołu w ramach mojej działalności gospodarczej przekształconej w BioEngineering.pl Sp. z o.o., której jestem nieustannie Prezesem Zarządu oraz większościowym udziałowcem” oraz zapis, który w pewnym sensie kłóci się z zapisami przytoczonymi powyżej, a mianowicie „cała praca poza cytowanymi fragmentami jest moją własnością”. Recenzent pragnie zauważyć, iż w otrzymanym egzemplarzu rozprawy brak jest podpisu Autora dysertacji pod załączoną „deklaracją autora”, jak też nie są załączone inne możliwe deklaracje, które wynikają z zapisów wskazanych powyżej („praca była realizowana na Politechnice Wrocławskiej we współpracy z firmą BioEngineering.pl Sp. z o.o.” oraz „praca była realizowana bezpośrednio przeze mnie z udziałem mojego zespołu w ramach mojej działalności gospodarczej przekształconej w BioEngineering.pl Sp. z o.o., której jestem nieustannie Prezesem Zarządu oraz większościowym udziałowcem”). W opinii Recenzenta, wskazane wątpliwości wymagają załączenia odrębnych podpisanych deklaracji.
- 3) W rozdziale 8 (Podsumowanie, 8.1 Podsumowanie i wnioski) Autor dysertacji nie zawarł wniosków końcowych o charakterze naukowym, a jedynie ogólne podsumowanie. W ten sposób widoczny jest brak zaprezentowania wniosków o charakterze naukowym i zaprezentowania na tym tle elementów oryginalnych.

Inne uwagi natury merytorycznej i edycyjnej:

- 1) Doktorant nagminnie używa sformułowania „optymalizacja”, które to słowo wynika z prowadzenia analiz matematycznych pozwalających wyznaczyć najlepsze (optymalne) rozwiązanie (poszukiwanie ekstremum funkcji) z punktu widzenia określonego kryterium i może ona mieć charakter jedno lub wielokryterialny. Autor dysertacji poza przedstawianiem założeń teoretycznych w rozdziale 4.1.1 jednej

- z metod służących procesowi optymalizacji (metody mnożników Lagrange'a), nie przedstawił jej praktycznej aplikacji bazującej na jej implementacji do rozwiązania poszczególnych licznych zagadnień przytoczonych w rozprawie (str. 41-46, „optymalizacja sterowania”, „optymalizacja zasilania”, „optymalizacja napędów”). Celowym byłoby więc przedstawienie dokładnego algorytmu badawczego prowadzonych analiz z matematycznie zdefiniowaną funkcją celu, przyjętymi warunkami początkowo-brzegowymi i zbiorem kryteriów, czy też dopuszczalnych rozwiązań dla każdego z poruszanych zagadnień.
- 2) Autor wiele uwagi poświęca słowu „optymalizacja” (cały rozdział 5), które to wyrażenie występuje w nazwach podrozdziałów: „5.2 Optymalizacja struktury mechanicznej biomanipulatora”, „5.3 Parametry optymalizacji układu sterowania biomanipulatora” oraz innych kluczowych zagadnieniach: „5.5 Charakterystyka układów sterowania”, „5.6 Charakterystyka architektury centralnej jednostki sterującej”, „5.7 Cyfrowe rozpoznanie sygnałów”, „5.8 Lokalizacja układu sterowania”. Każde tego typu podjęte zagadnienie i jego analiza ogranicza się jedynie do zestawień tabelarycznych w postaci opisu wagowego w podziale funkcjonalnym, w którym każdemu z analizowanych parametrów (kryteriów protetycznych) została przypisana jedynie waga w skali od 1 do 10. Z nazw nadanych poszczególnym podrozdziałom, w opinii Recenzenta, można byłoby wnioskować, iż będą one dotyczyć pełnych badań i analiz optymalizacyjnych (tj. sprzężenia cech funkcjonalnych z geometrycznymi i materiałowymi). Recenzent zauważa, iż każde z diskutowanych zagadnień nosi znamiona dysertabilności i mogłoby stanowić samodzielne zadanie badawcze (problem naukowy), który charakteryzowałby się licznymi elementami oryginalnymi.
 - 3) W rozdziale 6 („Wynik optymalizacji”) Autor przedstawia końcowe rozwiązanie konstrukcyjno-technologiczne (str. 77-78) z dokładnie określonymi parametrami. Recenzent nie znajduje jednak powiązania przedstawionych wyników z analizami prowadzonymi w rozdziale wcześniejszym.
 - 4) W rozdziale 6 przedstawione są podrozdziały dotyczące faz projektowych elementów konstrukcyjnych biomanipulatora. Przedstawione schematy i grafiki można jedynie traktować informacyjnie, tzn. że są, gdyż szczegółowe założenia, schematy, kryteria, warunki prowadzonych analiz (w tym np. warunki początkowo-brzegowe i przyjęta metodologia rozwijania modeli numerycznych, w tym schematów poszczególnych mechanizmów czy to dla nadgarstka, czy też stawu łokciowego) nie są szczegółowo opisane.

- 5) W rozdziale 7 (Zastosowanie kliniczne) zaprezentowano kilka opracowanych rozwiązań biomanipulatorów. Brakuje jednak ich usystematyzowania, określenia warunków badań dla każdego z rozwiązań (w tym jasno zdefiniowanego zakresu ruchów i oceny stopnia ich powtarzalności) wraz z dogłębną analizą wyników pomiarów skonfrontowanych z odczuciami pacjentów, którzy testowali poszczególne rozwiązania.

Zamieszczone powyżej uwagi mają charakter inspirujący Doktoranta do jeszcze głębszych przemyśleń w kierunku kolejnych etapów rozwijania i udoskonalania zaprezentowanej metodologii projektowania biomanipulatorów typu ręka człowieka do zastosowania w celach protetycznych dla pacjentów z różnym stopniem amputacji.

W tekście rozprawy od strony edycyjnej występuje szereg niedociągnięć w zakresie jakości załączonych grafik, szczególnie ich czytelności, które z pewnością przekładają się na ocenę merytoryczną i winny zostać poprawione. Inne uwagi natury interpunkcyjnej nie wpływają na końcową ocenę jakościową niniejszej dysertacji.

4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się przede wszystkim ważnym aspektem aplikacyjnym (wdrozeniowym), ale także poznawczym. W pracy zaprezentowano liczne zagadnienia badawcze, które jak pragnie podkreślić Recenzent, charakteryzują się olbrzymim potencjałem naukowym (szczególnie zagadnienia podjęte w rozdziałach 5 i 6). Mając na uwadze ich popularnonaukowy opis nie pozwalają na zidentyfikowanie wymaganej ustawowo oryginalności naukowej (art. 187 Ustawy).

Biorąc pod uwagę wskazane powyżej fakty, jak też uwagi zawarte w punkcie 3 recenzji (uwagi natury formalnej i uwagi natury merytorycznej), Recenzent nie jest w stanie podjąć na obecnym etapie jednoznacznej decyzji w zakresie dalszych etapów związanych z dopuszczeniem do obrony rozprawy przed komisją doktorską.

