

Szczecin, 19.06.2018 r.

Dr hab. inż. Mirosław Pajor prof. ZUT
Instytut Technologii Mechanicznej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Grzegorz Gembalczyka

pod tytułem:

„Dobór parametrów regulatorów w systemie sterowania urządzeniem do reedukacji chodu”

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia nr RMT0-1039/D/006/17/18 Pani Dziekan Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Anny Timofiejczuk prof. Pol. Śl. z dnia 18.04.2018, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

W rozprawie doktorskiej przedstawione zostało nowatorskie urządzenie przeznaczone do wspomagania procesu reedukacji chodu. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniu projektowania systemu sterowania urządzeniem. Poruszana tematyka dotyczy interdyscyplinarnych, ważnych i aktualnych problemów, istotnych zarówno dla rozwoju fizjoterapii jak i mechatroniki. Skalę problemu pokazują dane statystyczne, według których większość schorzeń występujących u osób niepełnosprawnych dotyczy problemów z narządami ruchu. W skutek samego tylko udaru mózgu, corocznie w Polsce ponad 12 tys. osób wymaga długoterminowego procesu rehabilitacji. Jedną z form prowadzenia rehabilitacji jest kinezyterapia, czyli leczenie ruchem. Jej efektywność zależy w dużej mierze od powtarzalności wykonywanych ćwiczeń. Z tego też względu uzasadnione jest projektowanie coraz nowocześniejszych urządzeń rehabilitacyjnych przeznaczonych do reedukacji chodu.

Niezwykle ważnym zagadnieniem, koniecznym do skutecznego działania mechatronicznych urządzeń rehabilitacyjnych, jest prawidłowe zaprojektowanie

systemu sterowania. Przeglądając literaturę dotyczącą sprzętu rehabilitacyjnego przeznaczonego do reedukacji chodu zauważyć można niedostateczny opis algorytmów sterowania wykorzystywanych w takich urządzeniach. W szczególności dotyczy to sterowania zaawansowanymi technologicznie systemami odciążania pacjentów.

Ze względu na innowacyjny charakter przedstawionego w pracy urządzenia do reedukacji chodu, Pan mgr inż. Grzegorz Gembalczyk podjął się trudnego zadania opracowania autorskiego systemu sterowania urządzeniem. Do realizacji tego zadania wykorzystane zostały opracowane modele numeryczne układów napędowych urządzenia oraz program komputerowy do prowadzenia optymalizacji parametrów regulatorów metodą hybrydową. Podczas realizacji pracy wykorzystana została metodologia projektowania Model-Based Design (MBD), która wykorzystuje symulacje prowadzone w czasie rzeczywistym. Metodologia ta znajduje coraz większe zastosowanie podczas projektowaniu złożonych systemów mechatronicznych.

Z uwagi na wymienione aspekty wybór tematu pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak też z uwagi na możliwość zastosowania jej wyników w praktyce. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Mechanika”.

2. Przegląd treści pracy

Opiniowana rozprawa doktorska składa się z dziewięciu rozdziałów i została zredagowana w języku polskim. Wraz ze spisem literatury zawierającym 144 pozycje oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim, rozprawa liczy 119 stron.

W pierwszym, dwustronicowym rozdziale pt. „Wstęp”, przybliżono metodologię projektowania Model Based-Design oraz zamieszczono krótką charakterystykę przeprowadzonych badań.

W rozdziale drugim, zawarto opis dotychczasowego stanu zagadnienia. W pierwszym podrozdziale przedstawiono dane statystyczne nakreślające skalę problemu, jakim są schorzenia dotyczące układu ruchu. Na tej podstawie uargumentowano zasadność projektowania zautomatyzowanych stanowisk rehabilitacyjnych. Dalej dokonano przeglądu aktualnie dostępnych urządzeń do reedukacji chodu wraz ze stosowanymi w nich systemami sterowania. Ostatni podrozdział zawiera ogólny przegląd metod optymalizacji, oraz bardziej

szczegółowy opis dwóch metod wykorzystanych przez Autora podczas realizacji pracy.

Rozdział trzeci zatytułowano „Cel i zakres pracy”. Autor rozpoczyna go od informacji, że w pracy przedstawione zostanie nowatorskie urządzenie przeznaczone dla osób ponownie uczących się chodzić. Następnie sformułowany jest cel pracy: „*opracowanie systemu sterowania układami napędowymi urządzenia i optymalizacja parametrów zastosowanych regulatorów*”. W nawiązaniu do celu pracy, przedstawiono układy napędowe wchodzące w skład urządzenia i krótko omówiono ideę samego urządzenia. Ponadto w rozdziale tym Autor przedstawił zakres pracy. Postawiony cel jest interesujący naukowo a zdefiniowany zakres pracy jednoznacznie określa obszar badawczy, w którym realizowana jest praca. Szkoda, że Autor nie sformułował hipotezy badawczej. Jawne postawienie hipotezy i jej udowodnienie na drodze zrealizowanych w pracy badań eksperymentalnych i symulacyjnych wyraźnie podkreśliłoby naukowy charakter rozprawy.

W rozdziale czwartym opisano szczegółowo opracowane, autorskie urządzenia do reedukacji chodu. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono budowę mechanizmu odciążającego, zaprojektowanych systemów pomiarowych, oraz zastosowany sposób komunikacji w czasie rzeczywistym pomiędzy urządzeniem a komputerem z oprogramowaniem sterującym.

Rozdział piąty dotyczy modelowania układów elektromechanicznych. W rozdziale tym przedstawiono zastosowane modele serwonapędu z silnikiem PMSM oraz modele matematyczne wyprowadzone dla układu odciążania pacjenta. Autor przedstawił przyjęte założenia upraszczające i wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych w celu wyznaczenia sztywności sprężyn oraz liny.

Rozdział szósty traktuje o układach sterowania. Zawarto w nim opis regulatorów PID oraz regulatorów rozmytych. W dalszej części Autor opisuje zaproponowane przez siebie algorytmy sterowania ruchem nadążnym wózka wciągarki, napędem mechanizmu odciążania oraz algorytm adaptacji prędkości bieżni treningowej.

W rozdziale siódmym przedstawiono rezultaty prac dotyczących optymalizacji nastaw regulatorów w systemie sterowania urządzeniem. W pierwszej kolejności przeprowadzono walidację opracowanych wcześniej modeli numerycznych. Ze względu na konieczność symulacji przemieszczania się pacjenta, opracowany został model kinematyczny odpowiadający uśrednionym przemieszczeniom środka ciężkości osoby po udarze z niedowładem strony

prawej. Wartości tych przemieszczeń uzyskano na podstawie pomiarów parametrów chodu osób niepełnosprawnych, które przeprowadzone zostały w Górnośląskim centrum rehabilitacyjnym "Repty". Model kinematyki chodu wykorzystano w procesie optymalizacji systemów sterowania napędem wózka wciągarki i napędami mechanizmu odciążającego.

Rozdział ósmym zawiera zestawienie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych z udziałem zdrowej osoby. Podczas testów zweryfikowano doświadczalnie funkcjonowanie opracowanego systemu sterowania urządzeniem. Analizę działania urządzenia wykonano podczas realizacji kilku ćwiczeń, przy różnych warunkach odciążenia.

Rozdział ostatni, dziewiąty, stanowi podsumowaniem zrealizowanych prac. Zawarto w nim wnioski końcowe i przedstawiono dalsze kierunki badań.

Podsumowując należy stwierdzić, że na podstawie analizy wyników badań numerycznych i doświadczalnych Autor rozwiązał postawiony problem naukowy i zrealizował założony cel pracy.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa doktorska pod względem merytorycznym prezentuje wysoki poziom naukowy. Kompozycja pracy jest prawidłowa a kolejne rozdziały tworzą spójną i logiczną całość. Prezentowane zagadnienia podzielone zostały w sposób przejrzysty. Pomijając przegląd aktualnego stanu zagadnienia, kolejne rozdziały opisują wyniki pracy naukowej Autora. Czytelnik wprowadzany jest systematycznie w kolejne przedstawiane zagadnienia - od opisu obiektu badań, przez metodologię modelowania systemów mechatronicznych, optymalizację numeryczną systemów sterowania, po badania eksperymentalne.

Efektem końcowym realizacji pracy jest powstałe urządzenie mechatroniczne do reedukacji chodu, w którym zaawansowany technologicznie system odciążający sprzężony został z bieżnią treningową. Sprzężenie to realizowane jest przy wykorzystaniu urządzeń pomiarowych zbudowanych przez Autora. W odróżnieniu od podobnych urządzeń dostępnych aktualnie na rynku, w przedstawionym rozwiązaniu układ odciążający realizuje ruch nadążny za przemieszczeniami bocznymi pacjenta, a prędkość bieżni dostosowywana jest do prędkości chodu pacjenta. Ponadto, doktorant podjął się trudnego zadania zaprojektowania systemu sterowania zaprezentowanym mechatronicznym

urządzeniem do reedukacji chodu. Główną wartością pracy stanowi fakt, że zaprezentowano w niej kilka autorskich rozwiązań dotyczących projektowania i optymalizacji systemów mechatronicznych, które mają duży potencjał aplikacyjny.

Autor w biegły sposób posługuje się nowoczesnymi narzędziami do prowadzenia symulacji numerycznych złożonych systemów mechatronicznych. W rozprawie przedstawiono oryginalny program komputerowy odpowiedni do prowadzenia optymalizacji metodą hybrydową, łączącą algorytm genetyczny z metodą punktu wewnętrznego. Program ten wykorzystano w proces optymalizacji nastaw regulatorów w systemie sterowania zaprezentowanym urządzeniem do reedukacji chodu. Do obliczeń wykorzystano odpowiednie modele numeryczne układów napędowych, systemów sterowania, oraz model kinematyki chodu człowieka, opracowane w środowisku Matlab na podstawie wyprowadzonych wcześniej modeli matematycznych. Warto podkreślić, że autor opracował i przeprowadził walidację modelu numerycznego serwonapędu z silnikiem PMSM, który bardzo dobrze koreluje z wynikami badań eksperymentalnych. Zaproponowane zostały również autorskie systemy sterowania poszczególnymi napędami urządzenia. Do sterowania mechanizmem układu odciążającego opracowano algorytm łączący regulator rozmyty z regulatorem PID, natomiast do sterowania zmianą prędkości bieżni opracowano dedykowany kontroler i generator sygnału prostokątnego okresowo zmiennego, który współpracuje z układem do pomiaru kąta wychylenia liny. Wykorzystana w pracy metodologia jest nowoczesna i adekwatna do podjętego zagadnienia.

W pracy zawarte zostały liczne wyniki badań eksperymentalnych, które wykorzystano do walidacji opracowanych modeli numerycznych oraz do weryfikacji poprawności działania opracowanych algorytmów sterowania. Autor wykazał się przy tym wysokimi umiejętnościami w zakresie planowania i realizacji badań doświadczalnych.

Rozprawa napisana jest jasnym, poprawnym językiem. Dobór rysunków i wykresów uważam za właściwy.

Opisane w rozprawie oryginalne badania naukowe, wskazują na dobrą znajomość przez Autora problematyki projektowania, modelowania i optymalizacji systemów mechatronicznych, jak również prowadzenia badań eksperymentalnych. Wszystkie wymienione tutaj elementy pracy stanowią o jej dużej wartości merytorycznej.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne.

1. W pracy zabrakło doświadczalnej weryfikacji wpływu zaprojektowanego urządzenia na parametry chodu osoby ćwiczącej. Autor opisuje na str. 27 zasadność budowania urządzeń do reedukacji chodu, w których system odciążający będzie wykonywał ruch nadążny za przemieszczeniami bocznymi pacjenta, jednak nie przeprowadza doświadczalnej weryfikacji działania opracowanego przez niego urządzenia pod tym właśnie kątem. Trudno stwierdzić, czy opracowany algorytm nadążny zapewni efektywną poprawę warunków ćwiczeń.
2. W podsumowaniu badań doświadczalnych nad weryfikacją systemu sterowania prędkością bieżni, autor stwierdza, że wartość kąta wychylenia liny wzdłuż osi strzałkowej pacjenta wyniosła maksymalnie 3 stopnie, co jest wartością zadowalającą. Później jednak pojawia się wniosek, że dalsze prace powinny być ukierunkowane na modyfikację układu napędowego bieżni treningowej, tak aby uzyskać efektywniejszą minimalizację tego kąta, co sugeruje, że uzyskane wyniki są jednak niezadowalające. Kwestia ta wymaga wyjaśnienia.
3. W pracy zabrakło mi dyskusji dotyczącej problemu filtrowania sygnałów pomiarowych. Zakłócenia powstające podczas pracy układów napędowych mają bowiem znaczący wpływ na działanie systemów mechatronicznych. Autor wspomina tylko krótko, które sygnały są filtrowane, ale nie podaje w jaki sposób.
4. W układzie sterowania bieżnią zastosowano jako wielkość sterującą kąt wychylenia liny. Autor jednak stwierdza, że układ ten ma spore opóźnienia. Nasuwa się zatem pytanie czy opóźnienia te, w pewnych warunkach, nie będą destabilizowały systemu sterowania ?

W pracy zauważono kilka błędów redakcyjnych, które zostały przekazane do wiadomości autora, m.in.:

- Str. 18, w wypunktowanych typach optymalizacji użyto zwrotu „zagadnienie optymalizowanie” a powinno być „zagadnienie optymalizowania”.
- Str. 18, ostatni akapit użyto zwrotu „wykorzystywana formą”, winno być „wykorzystywaną formą”.

- Str. 21, po równości (10) użyto zwrotu „w którym” a powinno być „w której” (odnosi się to do „równość”).
- Str. 26, czwarty wiersz, użyto zwrotu „ruchu linowego” a powinno być „ruchu liniowego”.
- Str. 31, napisano, że charakterystyka czujnika siły „jest funkcją liniową określoną współczynnikiem równym 17,65 N/V”. Z rys. 26 wynika, że współczynnik ten powinien wynosić raczej 176,5 N/V.
- Str. 36, ostatnie zdanie jest niefortunne ponieważ stwierdza, że „Każde zatrzymanie urządzenia skutkuje zatrzymaniem urządzenia”.
- Str. 66 Tabela 3 i 4 oraz str.68 Tabela 5, w drugim wierszu tabeli jest „ ΔUNL c-- ” a powinno raczej być „ ΔUNL -- ”.
- Str. 68, pierwszy akapit pod Tabelą 5 stwierdza, że połączenie regulatora PID z i rozmytego jest rozwiązaniem „optymalnym”. Moim zdaniem można jedynie stwierdzić, że jest to rozwiązanie o wysokiej efektywności.
- Str. 105, użyto niezrozumiałego sformułowania „jest to skutek opóźnień wynikających z opóźnień”.
- Str. 107, pierwszy podpunkt, użyto zwrotu „w procesie projektowana systemów” z powinno być „w procesie projektowania systemów”.

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania oceniam wysoko, ze względu na:

- Prawidłowe zdefiniowanie przedmiotu badań.
- Rzeczowy sposób prezentacji wyników.
- Sumienność wykonania poszczególnych etapów projektowania systemów mechatronicznych, od projektowania postaci konstrukcyjnej do doświadczalnej weryfikacji działania całego urządzenia.
- Interdyscyplinarne podejście do rozpatrywanego problemu. Autor wykazał się dobrą znajomością zagadnień związanych z modelowaniem chodu, modelowaniem matematycznym oraz prowadzeniem badań optymalizacyjnych.
- Wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków.
- Zastosowanie innowacyjnej metodologii MBD projektowania systemów mechatronicznych.

5. Ocena końcowa

Oceniając ogólnie przedstawioną rozprawę doktorską należy podkreślić aktualność jej tematyki wynikającą ze zwiększającego się zapotrzebowania na urządzenia wspomagające reedukację chodu. Zawiera ona elementy, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny Mechanika, a zwłaszcza wiedzy w zakresie projektowania i optymalizacji systemów sterowania.

Uważam, że opiniowana praca Pana mgr inż. Grzegorz Gembalczyka cechuje się interdyscyplinarnym podejściem do zagadnień modelowania układów o złożonej naturze fizycznej, zawiera oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego i ma duży potencjał aplikacyjny.

Opracowane pod czas realizacji pracy algorytmy i programy komputerowe do badań symulacyjnych a także sposób realizacji badań numerycznych i eksperymentalnych świadczą o odpowiednim przygotowaniu doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo-badawczej.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie przewodu doktorskiego, określone w **Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki**.

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

W razie pozytywnej oceny obrony rozprawy doktorskiej będę wnosił o jej wyróżnienie.

