



Bydgoszcz, dnia 20.11.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Gabriela Brachy zatytułowanej
**Badania równoległego manipulatora z serwonapędami pneumatycznymi
sterowanymi z wykorzystaniem metod inteligentnych**

Promotor: dr hab. Jakub Takosoglu, prof. PŚk

Recenzja opracowana na zlecenie Dyrektora Naukowego dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z dnia 20.09.2023, pismo MSS-519/118/2023 dr hab. inż. Sławomira Basiaka, prof. PŚk działającego w imieniu Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Mimo ogólnoświatowej tendencji do stosowania do napędów siłowników energii elektrycznej serwonapędy pneumatyczne znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach. Typowe są tu urządzenia, które muszą być odporne na przeciążenia i muszą charakteryzować się małą masą przypadającą na jednostkę mocy, być odporne na uszkodzenia i łatwe do naprawy. Sterowanie napędów pneumatycznych jest bardzo trudne ze względu na ściśliwość powietrza, która prowadzi do silnie nieliniowego opisu ruchu układów. Opis nieliniowy wymaga zazwyczaj intensywnych badań doświadczalnych, które są podstawą do opracowywania modeli empirycznych wykorzystywanych później w sterowaniu.

Powyższe uwagi dotyczą również manipulatorów o strukturze równoległej. Ze względu na problemy ze ścisłym opisem matematycznym, uzasadniona jest próba wykorzystania do sterowania metod inteligentnych (sztucznej inteligencji). Recenzowana praca dobrze wpisuje się w tendencję licznych prac naukowych oraz projektowych związanych z projektowaniem i sterowaniem manipulatorów o strukturze równoległej.

Przedstawiona do recenzji na 162 stronach rozprawa doktorska mgr inż. Gabriela Brachy pt. „Badania równoległego manipulatora z serwonapędami pneumatycznymi sterowanymi z wykorzystaniem metod inteligentnych” składa się z 8 rozdziałów uzupełnionych o nieponumerowane rozdziały dotyczące wykazu oznaczeń, celu i struktury pracy oraz spisu rysunków, spisu tablic oraz bibliografii. Rozprawa zakończona jest streszczeniami w języku polskim i angielskim, każde streszczenie obejmuje jedną stronę. Bibliografia obejmuje 59 pozycji, w tym 6 z udziałem Doktoranta.

Rozdział 1. Analiza dostępnych rozwiązań dotyczących tematu pracy

W rozdziale tym autor przedstawia na podstawie analizy 6 pozycji bibliografii modele matematyczne siłownikowego napędu pneumatycznego związane z bilansem energetycznym, sposobem otrzymania liniowego modelu na podstawie identyfikacji rzeczywistego obiektu, praktyczne zalecenia dotyczące pozycjonowania napędów łącznie z analizą modeli matematycznych sił tarcia uwzględniających specyfikę napędu pneumatycznego, modele matematyczne przepływu powietrza przez opór pneumatyczny. Ten rozdział kończy się szerokim przeglądem manipulatorów o równoległej strukturze kinematycznej.

Rozdział 2. Badania eksperymentalne elementów siłownikowego napędu pneumatycznego

W nieponumerowanym podrozdziale „Wstęp” przedstawiono uwagi ogólne dotyczące siłowników beztłoczkowych oraz siłownik beztłoczkowy będący głównym przedmiotem badań. Zrealizowano badania statyczne sił tarcia siłownika beztłoczkowego, pomiar siły tarcia napędu pneumatycznego przy stałej prędkości tłoka oraz pomiar siły tarcia zerwania względem długości czasu zatrzymania. W dalszej części tego rozdziału wykonano badania zaworu proporcjonalnego przepływu polegające na wyznaczeniu jego charakterystyki przepływowej na stanowisku badawczym zgodnym z normą ISO 6358-1989. Wyznaczono również charakterystykę ciśnieniową oraz charakterystykę dynamiczną.

Rozdział 3. Modelowanie siłownikowego napędu pneumatycznego

W ramach tego rozdziału opracowano model zaworu rozdzielającego proporcjonalnego przepływu na podstawie jego identyfikacji przy zastosowaniu wymuszenia skokowego z wykorzystaniem środowiska obliczeniowego Matlab, konkretnie dodatku *Identification Toolbox*. Następnie dokonano identyfikacji modelu

na podstawie zmierzonych parametrów zaworu z wykorzystaniem klasycznego modelu w postaci układu masy, sprężyny i tłumienia. W modelu zaworu wykorzystano również model sygnału wymuszającego dla układu suwaka, którym jest przesunięcie punktu równowagi pola magnetycznego przez dwie cewki elektromagnetyczne. Podsumowaniem tego fragmentu pracy jest schemat modelu zaworu zrealizowany w środowisku Matlab/Simulink z wykorzystaniem zoptymalizowanych uprzednio transmitancji układu elektrycznego i mechanicznego. Przedstawiono również model przepływu zaworu MPYE-5-1-1/8 HF firmy Festo w oparciu o funkcje przepływu Matliuka-Awtuszki. W dalszej części tego rozdziału przedstawiono model matematyczny siłownika bezłoczyskowego zrealizowany w oparciu o zależności teoretyczne, również w środowisku Matlab/Simulink. Rozdział kończy się modelem matematycznym sił tarcia z przedstawionymi wynikami badań symulacyjnych.

Rozdział 4. Analiza porównawcza badań symulacyjnych z badaniami eksperymentalnymi napędu pneumatycznego

W tej części rozprawy przedstawiono model napędu pneumatycznego manipulatora otrzymany z połączenia modelu przepływu zaworu proporcjonalnego, modelu dynamicznego siłownika oraz modelu sił tarcia. Wyniki symulacji odniesiono do badań eksperymentalnych dla różnych sygnałów sterujących i zakresów wzmocnienia regulatora. W odniesieniu do badań eksperymentalnych w tej części pracy nie przedstawiono żadnego planu badań dotyczących ich zakresu ani celu. Można założyć, że ich celem było ogólne udokumentowanie zgodności wyników symulacji i badań eksperymentalnych. Zamieszczono w tym rozdziale 11 interesujących wykresów, jednakże wbrew tytułowi rozdziału ich analiza jest bardzo skąpa, w niektórych przypadkach ogranicza się do podpisu pod rysunkami.

Rozdział 5. Badania układu sterowania napędem pneumatycznym

Rozdział 5 rozpoczyna część rozprawy ściśle związaną z jej tytułem. We wstępie przedstawiono rozwiązanie programowe i sprzętowe umożliwiające zmiany parametrów symulacji oraz automatyczną akwizycję danych pomiarowych. Następnie przedstawiono, zdaniem recenzenta, interesujący i najlepszy fragment rozprawy z punktu widzenia jej osiągnięcia naukowego nazwany „Model odwrotny siłownika pneumatycznego”. Przedstawiono założenia upraszczające tego modelu opartego na równaniu ruchu oraz jego ograniczenia. Niektóre stwierdzenia w tym rozdziale np. być może wymagają dodatkowych wyjaśnień, np. zdanie dotyczące warunków stosowania przyjętego modelu: „Głównym z nich jest możliwość pomiaru w obu kierunkach napędu, jak również masy obciążającej napęd.” – str. 76, pod wzorem (5.7). Czytanie tego rozdziału znacznie utrudnia system przyjętych oznaczeń, których znaczenie jest ukryte w poszczególnych akapitach, typu MO-CTP, MO-T, MO-E, itp. Wystarczyło we wstępie (lub w podsumowaniu) do tego rozdziału napisać: analizie poddano następujące modele z jednozdaniowym wyjaśnieniem ich struktury. Do oznaczeń użytych w tym rozdziale odwołuje się podrozdział kolejny o tytule „Analiza regulatorów”, polegający na przeprowadzeniu symulacji w środowisku Matlab - Simulink. Zamieszczono w nim 7 interesujących rysunków i wykresów. Rozdział ten jest zakończony poprawnym podsumowaniem, dowodzącym, że doktorant potrafi analizować otrzymane wyniki badań.

Rozdział 6. Budowa i modelowanie manipulatora

Wstęp do tego rozdziału budzi wątpliwości. Z punktu widzenia naukowego stwierdzenia „Jednym z głównych celów pracy była budowa manipulatora równoległego ...” i w tym samym akapicie ”Wybrana struktura kinematyczna została przedstawiona na rys. ...” Strukturę wybrano bez jakiegokolwiek analizy, mimo, że jest to jeden z głównych „celów pracy”. Częściowo ten brak rekompensuje dalsza część wstępu, w której przedstawiono zalety przyjętej struktury, czytelnik musi się sam domyślić, że struktura powinna mieć właśnie takie zalety. Rysunki przedstawiające wpływ długości i nachylenia ramion na kształt przestrzeni manipulatora (Rys. 6.2) oraz wpływ nachylenia napędów na kształt przestrzeni manipulatora (Rys. 6.3) bez odwołania do modelu kinematycznego uwzględniającego jako parametr wpływ długości ramion i ich kąta nachylenia lub wpływ kąta nachylenia napędów są mało wiarygodne.

Ponownie częściowo te braki rekompensuje kolejny podrozdział zatytułowany „Konstrukcja mechaniczna”. Pojawiają się tu pierwsze dane liczbowe dotyczące długości ramion opisano układ pomiarowy pozycji tłka z danymi dotyczącymi magnetycznego enkodera absolutnego, co stanowi jeden z nielicznych fragmentów pracy ilustrujących jakość realizowanych pomiarów. Podrozdział „Model kinematyczny” zawiera powszechnie znane wzory matematyczne dotyczące translacji i obrotu wzdłuż osi konstrukcji, umożliwiające określenie pozycji poszczególnych elementów konstrukcji, w zależności od pozycji napędu. Ostatecznie uzyskano równanie kwadratowe które połączeniu z warunkiem długości napędu pozwala na określenie pozycji napęd dla określonej pozycji efektora. Weryfikację poprawności uzyskanych równań kinematyki wykonano na podstawie kilku obliczeń zadanych pozycji i orientacji platformy, które porównano z pozycjami napędów uzyskanymi z

KR

2

pomiarów modelu bryłowego wykonanego w poprogramowaniu SolidWorks. Treść tej weryfikacji przedstawiono w podrozdziale „Badania symulacyjne kinematyki manipulatora”, zawierającym prawie wyłącznie wykresy pozycji efektora. Łącznie tym podrozdziale znajduje się dwanaście wykresów na ośmiu stronach uzupełnionych wyjątkowo krótkim opisem – 9 wierszy tekstu. Brak jest jakichkolwiek wniosków wynikających z tych wykresów, gdyby rozprawa była zbyt krótka, można by odnieść wrażenie, że celem tego podrozdziału jest jedynie rozszerzenie objętości. Brak jest jakiegokolwiek uzasadnienia wyboru parametrów służących do sporządzenia tych wykresów. Jest to zdecydowanie najsłabsza część rozprawy, mimo że wizualnie niektóre rysunki prezentują się bardzo dobrze. Niektóre wykresy trudno zrozumieć, mam tu na myśli np. Rys. 6.12(a) Pozycja efektora, z tego wykresu nie można odczytać liczbowo jaka jest to pozycja. Podanie chociażby współrzędnych jednego końca tego efektora umożliwiłoby zrozumienie tego wykresu. Rozdział 6 zakończony jest podrozdziałem „6.4. Aproksymacja kinematyki prostej sztuczną siecią neuronową” składającym się z wstępu bez tytułu, opisu sztucznych sieci neuronowych, prezentacji zbioru danych uczących, testowania metod uczących oraz doboru cech sieci neuronowej wraz interesującym porównaniem wyników co pozwoliło na wybór struktury dla aproksymacji wielkości pozycji w kinematyce prostej oraz struktury dla orientacji. Podrozdział dotyczący sztucznych sieci neuronowych zakończony jest podrozdziałem „6.4.5. Sieć neuronowa aproksymująca działanie kinematyki prostej” w którym przedstawiono gotowy aproksymator neuronowy kinematyki prostej manipulatora o bardzo zadowalającej dokładności (trenowany na zbiorze 53 435 punktów).

Rozdział 7. Badania eksperymentalne manipulatora.

Zaprezentowane w tym rozdziale badania eksperymentalne jakości pozycjonowania manipulatora mające na celu weryfikację dokładności pozycjonowania urządzenia przy sterowaniu nadążnym, które były prawdopodobnie bardzo pracochłonne, wykonane zostały właściwie. Przedstawione zostały one na siedmiu całostronicowych rysunkach składających się z sześciu wykresów każdy, podano formułę dotyczącą jakości dla tych badań w postaci średniej arytmetycznej błędów bezwzględnych poszczególnych współrzędnych w układzie kartezjańskim. Zdefiniowano również wartość średnią wektora błędu. Tabela 7.1. Wskaźniki liczbowe badanych trajektorii manipulatora” może być traktowana jako podsumowanie tych badań. Na podstawie zebranych danych obliczono średnią długość wektora błędu pozycjonowania (MAE). Bardzo ciekawe stwierdzenie, że średnia długość wektora błędu pozycjonowania dla manipulatora z obciążeniem okazała się mniejsza od tej bez obciążenia, powinno wywołać u doktoranta chęć wyjaśnienia tego zjawiska.

Rozdział 8. Podsumowanie

W rozdziale dotyczącym podsumowania rozprawy stwierdzono, że wszystkie zadania przedstawione w rozdziale „Cel i zakres pracy” zostały zrealizowane. Dotyczy to zakresu pracy i w tym można się z doktorantem zgodzić, jednakże wątpliwości budzi fakt że dotyczy to wyników badań a nie wniosków naukowych wynikających z tych badań. Potwierdza to wstępne zdanie tego rozdziału „Rozprawa przedstawia analizę równoległego manipulatora pneumatycznego, wprowadzając innowacyjne metody oraz prezentując wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych”

W zakończeniu tego rozdziału przedstawiono kierunki dalszych badań. Można je uznać za słuszne. Można jedynie stwierdzić, że już w prezentowanej pracy można było oczekiwać ilościowej oceny jakości sterowania w postaci powtarzalności pozycjonowania.

Uzupełniające elementy rozprawy

Bibliografia – obejmuje 59 pozycji uszeregowanych według nazwiska autora z dwoma wyjątkami dotyczącymi pozycji [3] i [59], 33 pozycje są w języku angielskim. Ten typ uszeregowania jest trudny do oceny sprawia wrażenie chaotycznego w przypadku, gdy na początku występują imiona lub inicjały imion autora (autorów) publikacji. Niestety bibliografia jest nieuporządkowana, imiona niektórych autorów oznaczone są jedynie inicjałami, większość autorów, szczególnie pozycje w języku polskim posiadają pełne imiona. Osobiście jestem zwolennikiem podziału bibliografii na książki, artykuły naukowe i inne do których można zaliczyć publikacje elektroniczne, instrukcje i materiały pomocnicze środowisk obliczeniowych, karty katalogowe, itp. Pozycje określonych wyżej jako inne w zamieszczonej przez autora rozprawy bibliografii brakuje.

Streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim zamieszczone na dwóch ostatnich stronach rozprawy dobrze ilustrują jej treść. Spis treści pracy jest logiczny i czytelny. Niestety praca jest napisana w taki sposób, jakby jej poszczególne rozdziały stanowiły odrębne publikacje. Brakuje w niej stwierdzeń typu: na podstawie wniosków wynikający z treści poprzedniego rozdziału przystąpiono do ...

Spisy rysunków i tablic nie budzą zastrzeżeń.

2. UWAGI OGÓLNE

Poważne zastrzeżenia budzi przedstawiony w rozdziale „Cel i zakres pracy” główny cel rozprawy polegający na opracowaniu i wykonaniu badań manipulatora z zamkniętym łańcuchem kinematycznym o sześciu stopniach swobody, zbudowanego w oparciu o beztłoczyskowe siłowniki pneumatyczne. Recenzowana rozprawa doktorska ma zgodnie z wymogami przede wszystkim charakter badawczy. Prezentuje ona ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Jednakże definicja przedmiotu rozprawy doktorskiej, którym powinno być jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jest bardzo rozmyta. Jednakże w poszczególnych rozdziałach można doszukać się rozwiązanych problemów naukowych, np. model matematyczny zaworu sterującego, model matematyczny siłownikowego beztłoczyskowego, dla wybranego manipulatora opracował warianty układu sterowania oraz przeanalizował ich zalety oraz określił kształt przestrzeni roboczej a przede wszystkim zbadal i ocenił dokładność pozycjonowania tego manipulatora.

Wyżej wymienione problemy naukowe potwierdzają fakt, że wybór problematyki rozprawy doktorskiej jest naukowo interesujący i ważny z technicznego punktu widzenia, co potwierdza trafność wyboru tematu rozprawy zgodnego z dyscypliną Inżynieria Mechaniczna.

Przedstawiona rozprawa, jest zbyt szeroka tematycznie. Moim zdaniem już dokładnie opracowany i potwierdzony badaniami eksperymentalnymi rozdział dotyczący modelowania siłownika, badań eksperymentalnych porównania danych eksperymentalnych z badaniami symulacyjnymi, zrealizowane na odpowiednim poziomie naukowym mogłyby być wystarczającą podstawą do przedstawienia rozprawy doktorskiej. Należy pamiętać, że ilość rzadko przekształca się w jakość. Biorąc pod uwagę temat rozprawy odpowiedni opracowane rozdziały 5, 6 i 7 mogłyby być wystarczającą tematyką tej rozprawy. Szeroki zakres spowodował, że je treść budzi zastrzeżenia, przede wszystkim w zakresie wnioskowania dotyczącego przeprowadzonych badań.

Autor wyraźnie nie wskazuje jaki podstawowy cel naukowy osiągnął. Przykładowo z pracy nie wynika, że dokładność pozycjonowania badanego manipulatora zależy od tego czy innego rodzaju sterowania w ujęciu ilościowym. Przedstawiono jedynie ogólne stwierdzenia typu „do dalszych prac został wybrany regulator UAR8 ze względu na najlepsze wyniki w badaniach symulacyjnych i stabilną pracę w całym zakresie dla badań na rzeczywistym napędzie” – str. 87. Taki ogólny charakter wnioskowania występuje w całej pracy.

Nadużywane są słowa optymalny, optymalizacja, zoptymalizowany. Przykładowo: „Jest to to spowodowane tym, że zoptymalizowane wartości mogą również kompensować zjawiska, których nie uwzględnił model odwrotny przy dokonanych uproszczeniach” - str. 87. Nasuwa się pytanie jaka matematycznie była funkcja celu podczas tej optymalizacji.

Podkreślić należy, że doktorant w swojej rozprawie przedstawił duży wkład pracy w badania eksperymentalne, stąd znaczna liczba wykresów ilustrujących te badania w odniesieniu do badań symulacyjnych. Najlepsze wrażenie sprawia Rozdział 3.1 traktujący o modelowaniu zaworu sterującego. Przedstawiono tam dokładną analizę budowy zaworu z uwzględnieniem jego części elektrycznej i mechanicznej. Na podstawie tej analizy uzyskano jego model o wysokim stopniu zgodności z rzeczywistym obiektem potwierdzony eksperymentalnie. Czytelnik rozprawy miałby jednak problem z odtworzeniem badań, ponieważ stanowisko badawcze nie zostało wystarczająco dokładnie opisane (użyte czujniki, ich parametry itp.). Doktorant ewidentnie zapomniał, że pomiar jest działaniem celowym, tzn. przed wykonaniem pomiaru trzeba dobrze znać cel pomiaru. Cel określa charakterystyka i definicja obiektu badań, warunki występowania badanego zjawiska, czas trwania zjawiska, inne specyficzne ograniczenia i – zdaniem recenzenta najważniejsza cecha – dopuszczalna niedokładność pomiaru. Brak określenia dokładności pomiaru znacznie obniża wiarygodność prezentowanych badań eksperymentalnych.

Jednym z warunków dopuszczenia rozprawy doktorskiej do publicznej obrony jest działalność publikacyjna doktoranta. W bibliografii zamieszczonej w rozprawie uwzględniono 6 pozycji z udziałem autora rozprawy. Dwie z nich [6], [7] są pracami samodzielnymi prezentowanymi na konferencjach międzynarodowych o zasięgu światowym w trzeciej pracy [8] autor rozprawy jest na pierwszym miejscu. W pozostałych trzech pozycjach [39], [40] oraz [55] autor rozprawy jest współautorem publikacji. Ta działalność publikacyjna jest wystarczająca.

410

4

3. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Jakość językowa jest poprawna, chociaż zauważalne są pewne niedociągnięcia, niektóre z nich wymieniono poniżej (poniżej n w.g. oznacza n-ty wiersz od góry strony, w.d. oznacza n-ty wiersz od dołu strony):

	Jest	Powinno być
Str. 12 7. w.d.	Zbliżoną ... w tej konstrukcji jest pneumatyczny manipulator ... przez Pawła Łaskiego [?]	Zbliżoną ... w tej konstrukcji jest konstrukcja manipulatora opracowana przez Pawła Łaskiego [<i>odniesienie dopiero w podpisie</i> Rys. 12]
Str. 26 6. w.d.	ValÁšek[50]	Valášek i inni [50] (<i>patrz również uwaga dotycząca pozycji bibliografii</i> [50] (str. 159)
Str. 52	Rys. 3.4 ... wielosokowego ...	Rys. 3.4 ... wielosokowego ...
Str. 135 3 w.g.	... zgodnie z formułą (7.2)	... zgodnie z formułą (7.2)
Str. 159 4 w.d.	Huiping Shen, Ting Li Yang, Lv zhong Ma, Michael ValÁšek, VÁclav Bauma, Zbyněk šika, Květoslav Belda, and Pavel Píša.	Michael Valášek, VÁclav Bauma, Zbyněk Šika, Květoslav Belda, and Pavel Píša. ... <i>chińskich autorzy nie występują, błędna pisownia czeskich imion i nazwisk</i>

Podczas zamierzonej publicznej obrony rozprawy doktorant powinien się ustosunkować do następujących zagadnień:

1. Jak można wytłumaczyć stwierdzenie, że średnia długość wektora błędu pozycjonowania dla manipulatora z obciążeniem okazała się mniejsza od tej bez obciążenia (str. 137).
2. Dokładnie wyjaśnić np. Rys.6.17., zarówno (a) jak i (b), oraz wzajemną korelację między nimi. Numer rysunku wybrałem przypadkowo, pytanie to może dotyczyć wielu rysunków co do których brakuje odniesień w tekście rozprawy.
3. Co doktorant rozumie przez pojęcie „jakość sterowania”, ewentualnie podać kryterium jakości.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawę, mimo przedstawionych wyżej uwag krytycznych i błędnej struktury, ze względu na wysoki stopień trudności podjętej w rozprawie problematyki, szczególnie w zakresie dość obszernych badań eksperymentalnych i badań symulacyjnych oceniam pozytywnie. Uważam, że rozprawa zawiera w dostatecznym stopniu elementy oryginalnego osiągnięcia naukowego.

W związku z powyższymi stwierdzeniami uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Gabriela Brachy „Badania równoległego manipulatora z serwonapędami pneumatycznymi sterowanymi z wykorzystaniem metod inteligentnych” w stopniu dostatecznym spełnia kryteria wynikające z obowiązującej Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm. Dz. U. z 2005 r. nr 164, poz. 1365 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego a w szczególności do publicznej obrony.

Z wyrazami szacunku.


Kazimierz Peszyński

KB

5