Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie
24. 08. 2020
DZIAŁ NAUKI
WPŁYNĘŁO

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl
Katedra Robotyki i Mechatroniki
Akademia Górniczo – Hutnicza
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Kraków 08.08 .2020

Opinia o pracy doktorskiej pt. "Mechatronics Systems' control based on Bilateral Teleoperation system with disturbance observer" autorstwa mgr inż. Mateusz Saków.

1. Zagadnienie naukowe rozważone w rozprawie

W pracy doktorskiej Autor podjął bardzo ważny, z punktu widzenia praktycznego i teoretycznego, problem sterowania złożonymi układami mechatronicznymi w zastosowaniu do teleoperacji (system master – slave) z siłowym sprzężeniem zwrotnym oraz wbudowanym obserwatorem zakłóceń. W rozważanym przez Autora przypadku do estymacji siły zastosowano opracowany obserwator zakłóceń oraz model odwrotny (siła nie była mierzona bezpośrednio). Zagadnienia te są bardzo istotne we współczesnej robotyce, a ich rozwiązanie otworzy nowe horyzonty w zastosowaniach robotów. W pracy przedstawiono szereg zagadnień związanych z sterowaniem układów mechatronicznych w tym zagadnienia; estymacji stanu procesu w oparciu o FIR optymalizowane z zastosowaniem metody L-curve, zagadnienia predykcji w sterowaniu układów dedykowanych do teleoperacji, budowy modeli odwrotnych dla celów sterowania, doboru struktury obserwatora zakłóceń oraz wyznaczania jego parametrów. Autor badał również możliwość obserwacji zakłóceń wnoszonych do klasycznego układu sterowania prze silnik DC poprzez zastosowanie opracowanego obserwatora zakłóceń. W większości swoich analiz Autor rozważał systemy z opóźnieniem, które w praktyce są coraz częściej spotykane, w szczególności zagadnienie to jest ważne w robotyce kosmicznej lub podmorskiej, gdzie czas transmisji sygnału pomiędzy układami master and slave są duże sięgające nawet kilku sekund. Podjęte zagadnienie badawcze jest bardzo szerokie w swoim zakresie i zawiera problemy identyfikacji modeli odwrotnych, estymacji stanu procesów w czasie rzeczywistym, budowy modeli predykcyjnych dla celów kompensacji opóźnień oraz estymacji zakłóceń w układach sterowania i obejmuje problemy teoretyczne, analityczne jak i implementacji uzyskanych rozwiązań. Autor rozważał układy znane z literatury jak również zaproponował własne rozwiązania, które starał się uzasadnić drogą rozważań analitycznych, jak również testował je eksperymentalnie, na zbudowanym stanowisku badawczym.

Tak postawione zadanie badawcze Autor skutecznie rozwiązał w ramach prezentowanej pracy doktorskiej.

2. Cel pracy i teza naukowa

W rozdziale 1 zatytułowanym Introduction (praca napisana jest w języku angielskim) na stronie 76 Autor definiuje cel pracy jako „opracowanie struktury obserwatora wspomaganego przez zewnętrzne sub-procesy; optymalnej estymacji stanu w sensie metody najmniejszych kwadratów i kompensacji przesunięcia fazowego wynikającego z opóźnienia transportowego" Powyższy cel jest dobrze zdefiniowanym zagadnieniem badawczo (sformułowanie algorytmów) – projektowym (implementacja algorytmów) ponieważ definiuje obszar badań oraz szczegółowo wskazuje na założenia przy których ma być opracowany obserwator zakłóceń. Choć nie zawsze, według mnie, te założenia są dobrze uzasadnione. Na przykład w przeglądzie literatury Autor uwypukla problem opóźnień transportowych, pisząc że jest on bardzo istotny i stanowiący trudny element sterowania w układach teleoperacji (i tak jest), natomiast w pracy analizuje układy w których opóźnienie jest zaniedbywalne (brak opóźnienia) nie uzasadniając tak przyjętego założenia (rys. 1.2).
Autor sformułował w sposób jawny tezę pracy, która brzmi następująco; „Struktura obserwatora zakłóceń oparta na dedykowanych układach przesuwania fazy oraz optymalnej, w sensie metody najmniejszych kwadratów, estymacji stanu pozwala na efektywną estymacje zakłóceń w przypadku wystąpienia szybkich zmian w modelu procesu i jego parametrów". Teza pracy jest sformułowana poprawnie i polega na udowodnieniu, że zaproponowany przez Autora obserwator zakłóceń pozwala na efektywne wyznaczenie siły w układzie sterowania w systemach teleoperacji z siłowym sprzężeniem zwrotnym.
Cała treść pracy jest podporządkowana realizacji celu oraz udowodnienie postawionej tezy.
Praca została podzielona na siedem rozdziałów oraz zawiera dodatek opisujący rozwiązania uzyskane analizowanymi w pracy metodami dla rozważanych układów. Dodatek ten (rozdział 8) ma duża wartość poznawczą i według mnie lepiej byłoby, gdyby wszystkie pokazane w nim rozwiązania były bezpośrednio umieszczone w poszczególnych rozdziałach pracy.

3. Ważność i aktualność zagadnienia naukowego rozpatrywanego w pracy

Praca dotyczy istotnego problemu, z punktu widzenia szeroko pojętej problematyki projektowania układów sterowania w systemach zawierających układy teleoperacji. Jak wynika z literatury oraz praktyki w tym zakresie, jest to zagadnienie istotne dla rozwoju zastosowań manipulatorów, które ze względu na ograniczenia prawne (telemedycyna, robotyka medyczna) lub wymogi bezpieczeństwa (robotyka kosmiczna, systemy sterowania w samolotach typu flight by wire, systemy w samochodach typu drive by wire) wymaga zdalnej interwencji operatora (systemy master – slave).

Bardzo istotne, z punktu widzenia aktualności zagadnienia naukowego, są zagadnienia wyznaczania sygnału wejściowego na podstawie pośrednich pomiarów dostępnych wielkości wyjściowych oraz znajomości modelu rozważanego obiektu. Zagadnienie to należy zakwalifikować do zagadnień odwrotnych, których rozwiązanie jest trudne do uzyskania. Zagadnienie odwrotne w rozważanym przez Autora przypadku jest zagadnieniem typu ill-posed, a jego rozwiązanie wymaga zaawansowanych metod analitycznych, jak np. regularyzacja. Autor zupełnie nie analizuje w pracy jednoznaczności rozwiązania problemu odwrotnego.

Podsumowując ten aspekt oceny rozprawy należy stwierdzić, że praca dotyczy bardzo aktualnego problemu naukowego jakim jest doskonalenie algorytmów wyznaczania sił w układach sterowania systemami z teleoperacją z siłowym sprzężeniem poprzez syntezę uklądu identyfikacji siły (a nie bezpośredniego pomiaru) z zastosowaniem zaawansowanego obserwatora zakłóceń, zawierającego blok predykcji oraz blok estymacji stanu. Tak sformułowany problem jest bardzo złożony i trudny do rozwiązania.

4. Naukowość i oryginalność pracy

Zaproponowana przez Autora metodologia badawcza zawiera wszystkie elementy procesu badawczego. Jest w niej przegląd istniejących rozwiązań zdefiniowanego zadania badawczego, analiza narzędzi, które można zastosować do rozwiązania sformułowanego problemu badawczego, bardzo wnikliwa dyskusja scenariuszy analizowanych przypadków systemów sterowania oraz bardzo ciekawa i szczegółowa analiza uzyskanych rozwiązań oraz sformułowanie wniosków szczegółowych w postaci opracowania nowych lub modyfikacja istniejących algorytmów dedykowanych do realizacji identyfikacji sił w układach sterowania z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Praca przedstawia gotowe rozwiązanie problemu łącznie z implementacją sprzętową na układach do szybkiego prototypowania.

Z punktu widzenia naukowości prace można ocenić jako sformułowanie nowych lub znacząca modyfikacja istniejących algorytmów służących do rozwiązania zagadnienia odwrotnego wyznaczania siły w układach sterowania z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Jednym z aspektów naukowych pracy są badania porównawcze różnych algorytmów estymacji stanu oraz predykcji stanu obiektu, których ocena w ujęciu Autora realizowana jest z punktu widzenia przydatności do zastosowania w układach sterowania z siłowym sprzężeniem zwrotnym oraz opóźnieniem transportowym. Najlepsze, według Autora, algorytmy zostały zastosowane w syntezie obserwatora zakłóceń, którego ocena skuteczności jest głównym zagadnieniem analizowanym w pracy. Pomimo, że zagadnienie to zostało zdefiniowane stosunkowo dawno (w latach 80tych ubiegłego wieku) i wiele zespołów badawczych prowadziło prace w podobnym zakresie, to do dzisiaj stanowi ono wyzwanie naukowe ze względu na złożoność tych algorytmów i trudność ich implementacji w czasie rzeczywistym. Pokazane przez Autora w pracy wyniki są oryginalne. Spis literatury jest wyczerpujący (220 pozycji) i zwiera aktualne pozycje ściśle powiązane z tematyką pracy.

Podsumowując merytoryczną ocenę naukowości i aktualności tematyki rozprawy doktorskiej uważam, że;

- Zdefiniowanie zagadnienia identyfikacji siły w układach sterowania z siłowym sprzężeniem zwrotnym i opóźnieniem transportowym poprzez zastosowanie dedykowanego obserwatora zakłóceń (DOB),
- Synteza dedykowanego do wyznaczania siły w układach sterowania obserwatora zakłóceń opartego na algorytmach predykcji i estymacji stanu
- Badania porównawcze istniejących w literaturze estymatorów stanu dla zadania estymacji stanu układów o zmiennej strukturze (z uwzględnieniem sił tarcia i luzu) oraz wybór optymalnego rozwiązania do implementacji w obserwatorze zakłóceń
- Badania porównawcze różnych realizacji bloku predykcyjnego do zastosowania jako układu przesuwania fazy w układach sterowania z opóźnieniem transportowym
- Implementacja w układzie szybkiego prototypowania (dSpace 1104) wybranych algorytmów oraz ich testowanie na rzeczywistym układzie sterowania zawierającym ruchome elementy mechaniczne oraz układy napędowe,

stanowią oryginalne elementy zadania naukowego mogącego być podstawą do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dziedzinie Inżynieria Mechaniczna specjalność Mechatronika.

5. Mocne i słabe strony pracy

Mocne strony pracy:

- Opracowanie autorskiego obserwatora zakłóceń dedykowanego do identyfikacji siły w układach sterowania z siłowym sprzężeniem zwrotnym; jego synteza oraz dowód efektywności oszacowania siły,
- Testowanie różnych metod estymacji stanu oraz wybór najlepszej do zastosowania w implementacji obserwatora zakłóceń
- Przeprowadzenie optymalizacji filtra FIR, w szczególności rzędu filtru do zastosowania w estymacji stanu procesu poprzez optymalizacje wskaźnika jakości z zastosowanie metody L-curve,
- Przeprowadzenie doboru metody predykcji stanu w zastosowaniu jako kompensacja opóźnienia transportowego w systemach sterowania opartych na telooperacji, a przede wszystkim badania porównawcze różnych metod
- Zbadanie stabilności układu z blokiem predykcyjnym
- Badania symulacyjne na prostym modelu o zmiennej strukturze sformułowanych i wybranych metod

- Implementacja opracowanych i wybranych algorytmów na układzie do szybkiego prototypowania dSpace 1104,
- Przeprowadzenie testów opracowanych metod na stanowisku badawczym złożonym z napędów oraz członów mechanicznych (moim zdaniem najbardziej wartościowa część pracy).
- Uwzględnienie w rozważaniach silnych nieliniowości oraz pokazanie ich wpływu na sterowanie i wyznaczanie siły sterującej poprzez eksperyment przeprowadzony z różną intensywnością ruchu zadaną przez operatora
- Podjęcie się rozwiązania bardzo złożonego zadania syntezy obserwatora zakłóceń dla układu z modelem odwrotnym, opóźnieniem transportowym, zmienną strukturą i nieliniowościami. Jest zadanie, któremu można by poświęcić wiele trudnych prac doktorskich, Autor zdefiniował to zadanie i starał się je rozwiązać za pomocą zawansowanych i trudnych w implementacji metod.

Słabe strony pracy:

- Autor w bardzo rozbudowanym przeglądzie literatury pokazuje istotność wielkości opóźnienia transportowego w projektowaniu i implementacji układów sterowania w systemach z teleoperacją, natomiast w pracy ogranicza się do układów, w których opóźnienie jest pomijalne lub nie występuje (rys. 1.2). Autor nie wyjaśnił wystarczająco dobrze takiego założenia,
- Autor wybrał do realizacji algorytmy (DOB), które są efektywne dla układów o niezmiennej strukturze (str. 160), natomiast rozważany model (rys. 4.17) to układ o bardzo zmiennej strukturze, brak jest w pracy komentarza, dlaczego wybrane algorytmy są równie skuteczne (jak to podaje Autor) dla układów o zmiennej strukturze, a może tak jest tylko w szczególnych przypadkach ruchu,
- Autor pomija w wielu miejscach pracy podawania parametrów jakie były przyjęte do badań symulacyjnych, co uniemożliwia sprawdzenie poprawności wyników (np. paragraf 5.3),
- Autor nie uwzględnił, że zagadnienie odwrotne jest zagadnieniem typu źle zdefiniowanego (ill – posed), dla którego jedną z cech jest niejednoznaczność rozwiązania, a do uzyskania rozwiązania stosuje się metody regularyzacji, których Autor zupełnie nie przedstawia i nie dyskutuje możliwości ich zastosowania, choć w wynikach, w podpisie pod rysunkiem 8.23 wspomina o regularyzacji Tikhonowa. Również i w tych wynikach brakuje określenia jaki człon regularyzujący przyjęto w obliczeniach,
- Autor analizuje stabilność układu jedynie z blokiem predykcji, nie odnosi się do stabilności układu kompletnego realizującego sterowanie z siłowym sprzężeniem zwrotnym w systemie z teleoperacją,
- Wyniki oszacowania parametrów modelu odwrotnego są, dla wielu współczynników ujemne i obarczone dużym błędem (duża wartość STD), ich ujemna wartość świadczy

o nie-fizyczności uzyskanych parametrów. W związku z powyższym brakuje wyjaśnienia jak postępować w takim przypadku. Według mnie związane jest to z niejednoznacznością rozwiązania i zależnością tego rozwiązania od parametrów ruchu (co jest charakterystyczne dla zagadnienia typu ill – posed). O akceptacji dużych wartości STD powinna zadecydować analiza wrażliwości.

- W wielu miejscach Autor podaje wnioski, które nie wynikają z rozważań przeprowadzonych w pracy np. paragraf 5.4 – ostatnie zdanie, paragraf 5.5.
- Według mnie bez analizy asymptotycznej stabilności układu z DOB, Autor udowodnił, że system poprawnie działa jedynie dla warunków, w których był przeprowadzony eksperyment
- Praca jest napisana w sposób bardzo chaotyczny i odnosi się wrażenie, że Autor bardzo się spieszył redagując pracę, brakuje zupełnie przedstawienia ogólnego schematu blokowego całego układu sterowania z poszczególnymi blokami i określenia ich roli w rozwiązaniu problemu.

6. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Mateusz Saków, jej zawartość i forma wskazują na jego wysoką wiedzę merytoryczna w zakresie syntezy układów sterowania dla złożonych obiektów mechatronicznych w oparciu o modele odwrotne i z pośrednim odtwarzaniem siły sterującej. Ponadto, sposób realizacji pracy wskazuje na umiejętność posługiwania się narzędziami pracy współczesnego badacza oraz umiejętność formułowania zadań badawczych i ich skutecznego rozwiązywania. Wszystkie wymienione wyżej zagadnienia rozważane w pracy można zaliczyć do dyscypliny naukowej Inżyniera Mechaniczna specjalność Mechatronika.

Podsumowując, uważam, że Autor w przedłożonej rozprawie poprawnie sformułował, opisał i rozwiązał oryginalne zadanie naukowe, jakim jest syn~teza obserwatora zakłóceń identyfikowanej siły w układzie sterowania układem mechatronicznym.

Praca odpowiada warunkom stawianym, w Ustawie o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych, rozprawom doktorskim w zakresie nauk technicznych. Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie przedłożonej, przez Mateusz Saków, rozprawy do publicznej obrony.