

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Miller

pt. **Synteza elektronawigacyjnego układu sterowania automatycznego ruchem równoległym statków z wykorzystaniem metod predykcyjnych**

Recenzja wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Akademii Morskiej w Gdyni

1. Tematyka rozprawy

Rozprawa dotyczy syntezy układu sterowania ruchem statków przy wykorzystaniu metod sterowania predykcyjnego a dokładnie sterowania MPC. Przedmiotem badań jest zautomatyzowanie szczególnego ruchu dwóch statków jakim jest przeładunek w ruchu (UNREP), wymagający precyzyjnego podejścia, fazy ruchu równoległego i fazy odejścia statków.

Układy automatycznego sterowania ruchem statku i narzędzia wspomagające nawigację są badane i rozwijane od kilkadziesiąt lat. Duża złożoność modelu matematycznego obiektu sterowania (wielowymiarowy, nieliniowy, niestacjonarny i w obecności istotnych zakłóceń i ograniczeń) powoduje, że istnieje wiele wariantów układów regulacji różniących się ogólną koncepcją rozwiązania. Kolejnym etapem badań jest sterowanie ruchem grupy statków, w tym sterowanie przeładunkiem w ruchu.

Zakres rozprawy i zaproponowane rozwiązania znajdują się w aktualnym nurcie publikacji naukowych dotyczących sterowania ruchem statków. Zaprezentowane wyniki są wartościowe pod względem naukowym i interesujące dla przyszłych zastosowań w praktyce. Ze względu na złożoność obliczeniową i sprzętową zaproponowanych metod, konieczność identyfikacji obiektu sterowania i duży wpływ zakłóceń wprowadzenie przedstawionych rozwiązań do realnych układów jest jeszcze sprawą przyszłości. Nie ulega jednak

wątpliwości, że zbudowanie narzędzi wspomagających człowieka lub zastępujących człowieka w procesie zbliżania statków jest tylko kwestią czasu i recenzowana rozprawa dotyczy aktualnego tematu badawczego o potencjale aplikacyjnym.

2. Ogólna analiza merytoryczna rozprawy

We wprowadzeniu do rozprawy Autorka przedstawiła w skrócie problematykę przeładunku w ruchu, zwracając uwagę na oddziaływania hydrodynamiczne między statkami w ruchu i problemy oceny wzajemnego położenia dwóch statków. Zaproponowała zastosowanie regulatora MPC do zautomatyzowania tego procesu. Statek jest obiektem o dużej bezwładności, realnych wymiarach i poddawany jest nie tylko wymuszeniom ale także istotnym zakłóceniom. Utrzymanie wzajemnej bliskiej pozycji dwóch takich obiektów uzasadnia zastosowanie sterowania predykcyjnego. Autorka przedstawiła tezę, że możliwe jest opracowanie systemu sterowania, który wykorzystując dostępne urządzenia elektronawigacyjne i człony wykonawcze (tu: pędniki gondolowe z napędem elektrycznym) umożliwi utrzymanie dwóch jednostek morskich w ruchu w stałej pozycji względem siebie. Za cel główny pracy Autorka postawiła sobie opracowanie modelu symulacyjnego procesu sterowania ruchem równoległym dwóch statków i implementację sterowania na obiekcie rzeczywistym z wielowymiarowym regulatorem predykcyjnym. Do implementacji regulatora użyto algorytmu z pakietu Model Predictive Control Toolbox programu Matlab. Badania ruchu dwóch statków, zarówno symulacyjne jak eksperymentalne na jeziorze Silm, prowadzono przy założeniu wirtualnego statku prowadzącego. Autorka określiła także wartości podstawowych wskaźników jakości sterowania. Nie podano uzasadnienia dla przyjętych wartości.

Postawiona w pracy teza uzasadnia zaproponowany zakres badań a potwierdzenia jej prawdziwości można się spodziewać w rozdziałach dotyczącym badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Rozdział pierwszy pracy zawiera opis ogólny metod sterowania predykcyjnego. Autorka uzasadnia w nim zastosowanie algorytmu z przesuwным horyzontem i określa wymagania dla modelu obiektu (p.1.3). Istotnym ograniczeniem metody MPC są duże wymagania obliczeniowe tym niemniej uwaga (str. 13) o wymaganiu prostoty modelu ze względu na moc dysponowaną obliczeniową powinna być uzasadniona. Istotne jest stwierdzenie o zastosowaniu do predykcji modelu liniowego zlinearyzowanego wokół punktu pracy. Linearyzacji dokonano wykorzystując narzędzia z pakietu System Identification Toolbox. W punkcie 1.4.4 opisano ogólnie algorytmy sterowania predykcyjnego z konkluzją że w pracy zastosowany będzie algorytm GPC, także dostępny w pakiecie Model Predictive Control

Toolbox. W dalszej części opisano metodykę syntezy regulatora predykcyjnego i sposób jego strojenia. Rozdział jest zbyt obszerny.

W swojej pracy Autorka intensywnie korzysta z gotowych narzędzi programowych i jest to uzasadnione celem, zakresem i przedmiotem pracy. Celem pracy jest implementacja algorytmu MPC do sterowania przeładunkiem w ruchu i użycie gotowych narzędzi umożliwia przeniesienie ciężaru pracy w inne obszary, istotne dla osiągnięcia celu, czyli: ustalenie czynności do wykonania, wybór struktury modelu, identyfikacja modelu, obliczenia i pomiary sił ssących, wybór algorytmu, dobór parametrów regulatora, jego strojenie, badania symulacyjne i badania eksperymentalne na jeziorze Silm.

Przegląd literatury zwyczajowo umieszczany w pierwszym rozdziale jest rozproszony w całej pracy, co jest skutkiem wyboru dokonanego przez Autorkę. Chcąc uniknąć plagiatu i tzw. autoplagiatu Autorka starannie odwołuje się do swoich i obcych publikacji. Skutkiem tego jest brak w pracy istotnych informacji, np. parametrów modelu statku czy .

Drugi rozdział ma charakter informacyjny. Przedstawiono w nim system elektronawigacyjny statku i przegląd literaturowy zastosowań metod sterowania predykcyjnego. Dużo uwagi poświęcono opisowi propozycjom sterowania predykcyjnego w zastosowaniach morskich. Bliskie tematowi pracy jest sterowanie statkiem na trajektorii.

W rozdziale trzecim opisano operację przeładunku w ruchu, jej etapy (podejście, ruch równoległy, odejście statku SS do statku STBL), określono wielkości wyjściowe, sterowane (względne położenie wzdłużne i poprzeczne oraz różnica kursowa) i sterujące. Sygnałami sterującymi są (str. 56): wychylenie płetwy sterowej i nastawy silnika głównego lub prędkości obrotowe pędników gondolowych. Na dużych statkach przeważnie obroty silnika głównego (spalinowego) są stałe a steruje się śrubą nastawną lub w przypadku elektrycznego napędu głównego prędkością silników napędowych śrub. Należy zaznaczyć że członami wykonawczymi są pędniki gondolowe złożone przeważnie z silników synchronicznych PMSM zasilanych z cyklokonwerterów lub tzw. falowników prądu z układem regulacji prędkości. Wielkościami zadanymi dla układu regulacji pędników są wartość i kierunek prędkości obrotowej obu silników co można sprowadzić do prędkości silnika napędowego i wychylenia steru. Brakuje w pracy opisu konstrukcji i układu regulacji silników napędowych. Cały układ sterowania położeniem statku jest układem nadrzędnego sterowania dla układu sterowania silnikami napędowymi.

W rozdziale 3.2 przedstawiono zjawisko sił oddziałujących na statki poruszające się w małej odległości od siebie wraz z przeglądem literatury. Autorka w tym rozdziale (str. 57) postawiła sobie zadanie rozszerzenia znanych z literatury badań nad przeładunkiem w ruchu o uwzględnienie oddziaływań hydrodynamicznych między statkami, ich wyznaczenie i

badania na obiektach rzeczywistych na jeziorze Silm. Należy to uznać za istotny wkład Autorki do badań.

Badania sterowania przeładunkiem w ruchu prowadzono na modelach dwóch jednostek: gazowca „Dorchester Lady” jako statku podchodzącego SS i większego zbiornikowca „Blue Lady” jako statku prowadzącego STBL. W rozdziale czwartym zawarto opis obu jednostek. Ważnym punktem pracy jest obliczenie w oparciu o wzory 4.1 – 4.6 sił poprzecznych, wzdłużnych i momentów skręcających oddziałujących na kadłuby obu jednostek. Brakuje w pracy parametrów powyższych równań. Do oceny czy siły i momenty są istotne brakuje informacji o wartości momentów i sił napędowych statku, czy siły wzajemne są istotne z punktu widzenia sterowania statkiem i czy są porównywalne z innymi zakłóceniami np. wpływem wiatru. Przydatna byłaby informacja (wykres) o zmienności sił wzajemnych przy zmianie prędkości i odległości wzajemnej. Ważnym osiągnięciem Autorki jest weryfikacja sił wzajemnych poprzez ich pomiar na statkach treningowych na jeziorze Silm. Otrzymane przebiegi są trudne do interpretacji na skutek konieczności ingerencji obsługi (można oznaczyć na wykresach) oraz warunków na wodzie (stałość prędkości, momenty skręcające, wiatr...). Z wykresu 4.28 wynika że przyjęto dobrą metodę pomiaru i że model statku został dobrze zidentyfikowany. W rozdziale 4.5 pokazano rozszerzenie modelu statku SS o siły ssące pochodzące od statku STBL (rys.4.31). Model ten jest niekompletnie opisany, szczególnie sygnały wyjściowe x , y , ψ , które nie są wskazane w 4.12 - 4.14. Na potrzeby pracy statek SS jest sterowany tylko przez pędniki gondolowe i nie uwzględnia się zakłócenia od wiatru. Dobrze byłoby pokazać model stosowany w pracy.

W rozdziale piątym pokazano założenia projektowe dla regulatora predykcyjnego. Założono zarówno na potrzeby symulacji jak i badań eksperymentalnych, że statek SS będzie nadążał za wirtualnym statkiem STBL o dynamice statku rzeczywistego, który porusza się po predefiniowanej trajektorii. Jest to założenie uzasadnione na etapie badań wstępnych i bezpieczne przy próbach na jeziorze. Z opisu wynika, że wpływ sił wzajemnych został uwzględniony tylko dla statku SS. Wprawdzie wartość sił oddziałujących na statek STBL jest dużo mniejsza, to założenie powyższe pomija ewentualne dodatkowe zmniejszenie odległości między statkami. Czy Autorka analizowała ten wpływ?. W punkcie 5.5 przedstawiono procedurę linearyzacji obiektu wielowymiarowego w zdefiniowanym punkcie pracy. W jakim zakresie odchyłek od tego punktu model można uznać za wystarczająco dokładny, adekwatny? Wynikiem jest model w przestrzeni stanu opisany macierzami 5.19 – 5.21. Z opisu wiadomo jakie są wyjścia ale nie podano zmiennych stanu. Jest to istotny brak. W punkcie 5.6.1 pokazano parametry dobranego regulatora MPC: horyzont predykcji, sterowania, współczynniki skalujące, zakresy zmiennych wyjściowych i sterowań i

współczynniki skalujące. Nie zdefiniowano macierzy **Kust**. W rozdziale 5.6.2 oceniono wydajność zaprojektowanego regulatora.

Weryfikację działania pokazanego w rozdziale 5 regulatora predykcyjnego z predykcją w oparciu o zlinearyzowany model obiektu przedstawiono w rozdziale 6. Weryfikacje przeprowadzono dwuetapowo: metodą „hardware in the loop” i na obiekcie rzeczywistym. W obu przypadkach algorytm sterowania był realizowany przez komputer przemysłowy i z wirtualnym statkiem prowadzącym, poruszającym się po predefiniowanej trajektorii. Do oceny wyników zdefiniowano wskaźniki jakości 6.1 – 6.6. W 6.1, 6.4 i 6.5 nie zdefiniowano X a w 6.4 mianownik jest n (?), czyli że jest to raczej średnie odchylenie a nie procentowe. W pracy pokazano wyniki działania regulatora podczas ruchu równoległego, zmiany odległości wzdłużnej, poprzecznej i w czasie pełnego manewru przeładunku w ruchu. Wyniki poparto wartościami wskaźników jakości, odpowiednimi przebiegami i opisem. Do pełnej oceny bardzo brakuje pokazania przebiegów sygnałów sterujących i wartości sił ssących. Skąd w przebiegach zmiennych oscylacje o częstotliwości ok. 0.1Hz?. Nie występują one w przebiegach eksperymentalnych co sugeruje albo pochodzenie numeryczne albo jakąś nietłumioną częstotliwość własną modelu obiektu. Wyniki badań w tej części potwierdzają poprawne działanie regulatora MPC i występowanie sprzężeń skrośnych w obiekcie. Brakuje syntetycznej oceny działania układu regulacji w odniesieniu do parametrów regulatora. Pokazane wartości wskaźników jakości podano ze zbędną dokładnością. Jaka jest dynamika zmniejszania i zwiększania prędkości statku, co wiąże się z dynamiką napędu gondolowego i zapasem momentu? W modelu z rysunku 4.31 nie widać obciążenia, oporów ruchu, wobec tego jak można zmniejszyć prędkość statku? Czy tylko nawrotem silnika napędowego?

Dużym osiągnięciem Autorki jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych na jeziorze Silm. Podobnie jak poprzednio do pełnej oceny wyników brakuje sygnałów sterujących. Czy podczas prób sygnały sterujące, czyli zmiana prędkości kątowej i wychylenie steru osiągnęły ograniczenie i czy pędniki były nawrotne?. W badaniach eksperymentalnych widoczna jest inna dynamika procesu podczas konieczności zmniejszania i zwiększania prędkości statkuSS. Z badań wynika konieczność uwzględnienia w dalszych badaniach wpływu zakłóceń; przynajmniej wiatru. Z badań wynika, że przy niewielkim wietrze zaprojektowany regulator spełnia swoją rolę. Przeprowadzone badania są wartościowe ale nie wyczerpują tematu. Kompensacja istotnych zakłóceń wymaga większej energii na sterowanie i większej aktywności regulatora a to z kolei może powodować przekroczenie założonych wartości sterowań. Nie pokazano wpływu wag w funkcji celu na jakość sterowania.

3. Podsumowanie

Rozprawa dotyczy zastosowania układów sterowania predykcyjnego do automatyzacji procesu sterowania położeniem wzajemnym dwóch statków podczas manewru przeładunku w ruchu. Otrzymane rezultaty nie spełniają wszystkich oczekiwań, szczególnie w obecności zakłóceń, na co Autorka wskazuje w podsumowaniu. Ważnym osiągnięciem Autorki jest implementacja wielowymiarowego regulatora predykcyjnego i weryfikacja na obiekcie rzeczywistym. Dodatkowym osiągnięciem jest rozszerzenie modelu statku o wzajemne oddziaływanie dwóch statków w ruchu, weryfikacja eksperymentalna i opracowanie metody pomiaru tych oddziaływań. Zaproponowane przez Autora rozwiązania są dobrą podstawą do dalszych badań.

4. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Poza uwagami merytorycznymi trzeba zwrócić uwagę na stronę edytorską ocenianej pracy. Praca jest dobrze sformatowana, co ułatwia jej czytanie. Zawartość pracy i kolejność rozdziałów są właściwe. Niestety Autorka nie ustrzegła się wielu błędów edytorskich, z których główne to:

- bardzo dużo zdań zaczyna się od małej litery. Utrudnia to czytanie a przyczyna nie jest oczywista, w sytuacji gdy edytor tekstów automatycznie koryguje tekst,

- nie zawsze Autorka podaje pozycje literatury, do której się odwołuje, np. strona 1 Rawson, Taylor, strona 2 Fu,

- wykaz oznaczeń jest niekompletny i nie wszystkie brakujące są wyjaśnione w tekście, np. macierz \mathbf{K}_{ust} na stronie 109, odchyłki (x_e, y_e, ψ_e) ze wzoru 5.7 nie są zdefiniowane i oznaczone na rysunku 5.2, brakuje jasnego opisu związku pomiędzy x_{dr}, y_{dr} a $\Delta x, \Delta y$ na stronach 96, 97, co to jest zmienna dodatkowa ε_k w równaniu 5.9,

- nie powinno się używać tych samych oznaczeń do różnych wielkości, np. X Y to raz siła a raz układ współrzędnych, N to zarówno moment skręcający jak i horyzont predykcji na stronie we wzorach 1.3 i 1.4.

- niektóre wzory są nieczytelnie sformatowane (niewłaściwy lub nieumiejętnie stosowany edytor wzorów?), np. 4.1–4.6 i nie wszystkie parametry są opisane np. $C_{Xmax}, C_{Ymax},$

- w pracy bada się ruch dwóch statków: tankowca „Blue Lady” jako STBL i gazowca „Dorchester Lady” jako SS. Autorka dla przejrzystości pracy powinna raz to zdefiniować i używać tylko jednej nazwy a nie raz nazwy tankowiec/gazowiec, raz nazwy własnej a raz roli STBL/SS. Bardzo utrudnia to czytanie,

- liczby w tabeli 6.2 i kolejnych, podane z dokładnością do 5 miejsc znaczących, nic nie mówią,

- na rysunku 1.1 trajektoria odniesienia to $s(k)$ a poniżej w tekście to $r(k)$,
- wzór 1.1 jest nieczytelny. Zwyczajowo wektor (tu: $u(k)$) oznaczany jest albo strzałką albo czcionką typu bold,
- w pracach o charakterze naukowym należy unikać sformułowań potocznych i nieprecyzyjnych jak „regulatory uzyskują słabe osiągi ...” na stronie 20, „utworzenie liniowego modelu obiektu, którego struktura będzie odpowiadać (?) strukturze regulatora” na stronie 25, „gdy układ regulacji jest prostokątny...” na stronie 30, „...sygnał sterujący jest gładki.” na stronie 11,
- gdzie zdefiniowano użyte na stronie 55 względne wartości położenia wzdłużnego i poprzecznego?,
- regulator backstepping nie jest regulatorem krokowym (str. 57),
- - dwa punkty są zawsze w jednej linii; str. 81,
- w p.1.4.4 zdefiniowano postać funkcji celu, która nie jest zgodna z wyrażeniami 1.3 i 1.4; nie zdefiniowano N_1 ,
- na stronie 75 wskazano że współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji pomiarowej równy 3.12. Skąd taka liczba?
- jak rozumieć sformułowanie ze strony 102, że „wychylenia pędników powinny zmieniać się 10 razy szybciej od ich nastawy”?

5. Ocena ogólna i wniosek końcowy

Autorka wykazała się dużą wiedzą teoretyczną, umiejętnością posługiwania się zaawansowanymi narzędziami programowymi, umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych, doświadczeniem praktycznym z zakresu automatyki i robotyki, a także umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co świadczy o spełnieniu wymagań stawianych przy nadawaniu stopnia naukowego doktora. Praca mieści się w dyscyplinie elektrotechnika, w specjalności automatyka okrętowa.

Uwagi krytyczne przedstawione wyżej mają charakter dyskusyjny i nie pomniejszają wartości pracy. Autor rozwiązał samodzielnie postawione problemy naukowe i wykazał ogólną wiedzę w dyscyplinie **elektrotechnika**. Stwierdzam, że praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w Art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z późniejszymi zmianami i stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony.