



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

dr hab. Anna Witkowska, prof. PG
tel.0048 603588400
email: anna.witkowska@pg.edu.pl

Gdańsk, 06 kwietnia 2022 r.

*RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ
WYDZIAŁU ELEKTRYCZNEGO UNIWERSYTETU MORSKIEGO W GDYNI*

Tytuł rozprawy: Kompleksowy układ sterowania ruchem statku handlowego we wszystkich fazach podróży morskiej

Autor rozprawy: mgr inż. Andrzej Rak

1. Cel, zakres i charakter rozprawy

Rozwój handlu morskiego na świecie oraz dążenie do zmniejszenia kosztów eksploatacji statku podczas żeglugi spowodował, że w okresie ostatnich lat prowadzone są intensywne prace naukowo-badawcze zmierzające do pełnej lub częściowej autonomii żeglugi morskiej. Opracowanie technologii pozwalającej na budowę autonomicznych statków bezałogowych (MASS – ang. Marine Autonomous Surface Ship) i ich bezpieczną eksploatację jest obecnie dużym wyzwaniem postawionym przed projektantami i konstruktorami.

Rozprawa doktorska wpisuje się w obszar prac rozwojowo badawczych nad autonomicznością jednostek pływających, gdyż skuteczność misji statku bez obecności człowieka na pokładzie opierać się będzie na zintegrowanych komputerowych systemach nawigacji, sterowania, zarządzania i podejmowania decyzji, a także na efektywnej pracy tych systemów w każdych warunkach eksploatacyjnych i operacyjnych.

Autor sformułował tezę badawczą: „Zastosowanie układu kompleksowego sterowania ruchem statku w systemie od kei do kei znacząco przyczyni się do realizacji idei autonomicznego statku morskiego, co w efekcie poprawi wyniki ekonomiczne w żegludze morskiej dzięki redukcji załóg oraz przyczyni się do zwiększenia bezpieczeństwa takiego transportu”. Biorąc pod uwagę przedstawioną tezę oraz możliwość jej weryfikacji, określono cel główny polegający na opracowaniu i wdrożeniu na rzeczywistym obiekcie pływającym kompleksowego układu automatycznego sterowania ruchem statku, z wykorzystaniem kilku współdziałających regulatorów o odmiennych zasadach działania. Cele częściowe rozprawy obejmowały opracowanie kompletnego systemu sterowania statkiem wzdłuż trajektorii zadanej z dowolną prędkością ruchu oraz weryfikację proponowanych rozwiązań podczas eksperymentów na modelu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Szczególna uwaga została zwrócona na zastosowanie i wdrożenie metody bezuderzeniowego przełączania pomiędzy regulatorami oraz dokonanie oceny (sprawdzenie celowości) stosowania tak przyjętego rozwiązania.

Biorąc pod uwagę zakres rozprawy, ma ona przede wszystkim charakter projektowy z elementami symulacyjno-teoretycznymi. Rezultatem rozprawy było: opracowanie systemu sterowania statkiem z trzema regulatorami, o różnej strukturze dla odpowiednio uproszczonych, liniowych modeli użytkowych (matematycznych) statku; przeprowadzenie wszechstronnych badań symulacyjnych na komputerze ze skrupulatnie opracowanym dokładniejszym modelem matematycznym statku w reżimie czasu rzeczywistego w układzie HIL. Od strony praktycznej Autor samodzielnie opracował i wdrożył system do automatycznego sterowania statkiem treningowym Dorchester Lady. Eksperymentalna część na jeziorze Silm potwierdza efektywność systemu sterowania.

Teza pracy jest podana w sposób jasny, uważam jednak że bardzo ogólny, będąc zarazem odpowiedzią samą w sobie. Uważam, że cele pracy zostały dobrze określone i skrupulatnie przez Autora realizowane.

Obecnie układy wieloregulatorowe o strukturze przełączalnej są rzadko spotykane na rzeczywistych jednostkach pływających, stąd podjęta problematyka w mojej ocenie jest istotna i aktualna na tle obecnego stanu wiedzy oraz potrzebna pod względem praktycznym.

2. Przegląd tematyki zawartej w rozdziałach

Rozprawa liczy 143 strony, zawiera wprowadzenie, cztery główne rozdziały, zakończenie i bibliografię. Ich uzupełnienie stanowią zamieszczone spisy: ważniejszych oznaczeń, skrótów, rysunków i tabel oraz dodatek A.

We wprowadzeniu Autor przedstawił motywację podjętych badań, uzasadnił ich konieczność na tle obecnego stanu wiedzy, następnie sformułował tezę i cele pracy.

W rozdziale pierwszym Autor dokonał przeglądu literaturowego w zakresie wybranych układów bezpośredniego sterowania ruchem statku. Należą do nich systemy sterowanie kursem, wzdłuż trajektorii zadanej z minimalizacją odchyłki poprzecznej od trajektorii, dynamicznego pozycjonowania, kompensacji kołysań bocznych. Dotychczasowe osiągnięcia innych autorów przedstawił zgodnie z chronologią rozwoju, na tle pojawiających się rozwiązań technologicznych układów automatycznego sterowania ruchem statku. Dobór analizowanych zagadnień uważam za prawidłowy i jest na tle dotychczasowego stanu wiedzy w obszarze badań własnych.

W tym samym rozdziale Autor dokonał dekompozycji zadania realizacji pełnomorskiej podróży na charakterystyczne etapy, z uwzględnieniem dominujących: czynników decyzyjnych, prędkości statku i metod sterowania. W dalszej części rozdziału przedstawił ogólną ideę przełączania bezuderzeniowego. Następnie omówił na schemacie koncepcję przełączania bezuderzeniowego z układem nadającym sygnału sterującego, stosowaną w dalszej części pracy, podczas badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Rozdział drugi poświęcono przedstawieniu obiektu sterowania, jakim był izomorficzny model statku Dorchester Lady w skali 1:24, wykorzystywany w Ośrodku Manewrowania Statkiem w Iławie Kamionce. Opisano lokalną infrastrukturę badawczą umożliwiającą zdalne eksperymenty na jeziorze Silm.

Trzon rozprawy stanowi rozdział trzeci, w którym Autor przedstawił wieloregulatorową bezuderzeniowo przełączalną strukturę układu sterowania ruchem statku w trzech fazach podróży „od kei do kei”. Fazy rejsu Autor powiązał są z prędkościami poruszania się statku i obszarami operacyjnymi, wykorzystując różne strategie sterowania. Do manewrowania przy małych prędkościach w obszarach portowych zastosowano wielowymiarowy regulator LMI o 3DOF sterujący prędkością wzdłużną, poprzeczną i kątową, opracowany na podstawie publikacji [150]. Niestety w pracy brak szczegółów dotyczących syntezy tego regulatora, w szczególności sposobu uwzględnienia niepewności. W pętli sprzężenia zwrotnego zastosowano filtr Kalmana estymujący prędkości statku podczas ruchu. Układ napędowy wykorzystywał ster azymutalny i tunelowy. Tu również brak szczegółów odnośnie sposobu generowania sygnałów sterujących. Do sterowania statkiem przy prędkościach pośrednich na wodach ograniczonych zastosowano quasi adaptacyjną metodę, opartą na idei PID z programowalną zmianą parametrów oraz prędkością obrotową śrub pędników gondolowych jako zmienną wiodącą. Sterowano kursem statku minimalizując odchylenia od trajektorii zadanej. Do sterowania kursem statku przy prędkościach eksploatacyjnych na wodach otwartych zastosowano klasyczny regulator MPC. Regulatory

uzupełniono o szczegółowy opis dedykowanych układów obliczeniowych wyznaczania wartości zadanych na podstawie zależności geometrycznych, zgodnie z ideą LOS. Opracowane regulatory składowe są znane i powszechnie stosowane w literaturze.

W rozdziale 3 Autor opisał także szczegóły implementacyjne zaprojektowanego układu sterowania w trzech środowiskach pracy: symulacyjnym Matlab-Simulink, w układzie HIL w aplikacji czasu rzeczywistego z modelem Simulink, oraz w układzie rzeczywistym z modelem fizycznym izomorficznym statku. Na potrzeby realizacji przełączania regulatorów część implementacyjną rozszerzył o nadrzędny układ decyzyjny. Wyjaśnienie funkcjonalności tego układu Autor ogranicza do podania schematu oprogramowania nie wdając się w szczegóły związane z samą logiką przełączania.

Działanie zaproponowanego systemu sterowania zilustrowano szeregiem badań symulacyjnych i eksperymentalnych, w rozdziale 4. Wykonana została analiza jakości pracy poszczególnych regulatorów jak i w całości zrealizowanego układu. Badania dotyczyły również analizy porównawczej wieloregulatorowego układu sterowania z mechanizmem bezzderzeniowym przełączania i w sposób klasyczny, nieciągły. Autor dokonał porównania wybranych prób symulacyjnych i eksperymentalnych, posługując się całkowitymi miarami jakości układu sterowania. Ostatecznie Autor podsumował wyniki pracy i przedstawił wnioski w Zakończeniu. Do rozprawy dołączono dodatek, w którym przedstawiono model statku Dorchester Lady o złożonej strukturze, stosowany podczas badań symulacyjnych.

Bibliografia zawiera 188 pozycji. Są one prawidłowo dobrane i cytowane w treści pracy. 11 z nich stanowią cytowania własnych prac, współautorskich. Trzy z nich opublikowano w wysoko punktowanych czasopismach Polish Maritime Research, Sensors i Ocean Engineering.

3. Ogólna ocena rozprawy

Opracowanie i wdrożenie kompleksowego systemu sterowania statkiem w warunkach morskich jest trudnym procesem, ze względu na kilka ważnych aspektów. Mianowicie w wyniku zmiany prędkości statku podczas żeglugi dynamika statku w środowisku morskim podlega znaczącym zmianom. Jest to rezultat m.in. złożonych zjawisk występujących np. podczas ruchu kadłuba w wodzie oraz nagłej zmiany geometrii trajektorii ruchu. Ponadto układ kontrolno-pomiarowy nie jest jednolity dla małych i dużych prędkości. Wynika to m.in. z braku możliwości użycia Logu do pomiaru małych prędkości oraz małej efektywności pracy śruby napędowej ze sterem.

Dodatkowy problematyczny aspekt, to brak możliwości przeprowadzenia testów na pełnowymiarowej jednostce, co sprowadza weryfikację wyników badań do prób modelowych. Tu skolei pojawia się problem skalowania, szczególnie dotyczy to kwestii skalowania prędkości wiatru. Warunki wiatrowe na jeziorze dla modelu w skali nie spełniają prawdopodobieństwa liczby Reynoldsa, która musi być zachowana, aby współczynniki oporu od wiatru były takie same dla modelu jak i dla obiektu rzeczywistego i aby można było policzyć siły. Nie jest możliwe oszacowanie sił od wiatru na modelu w skali w warunkach na jeziorze, co Autor również świadomie kilkakrotnie podkreśla w swojej pracy.

Obecnie zjawiska związane ze zmienną dynamiką modelowane są poprzez układy o zmiennych parametrach (adaptacyjne, odporne) lub zmiennej strukturze (przełączalne struktury sterowania). W zależności od pewnej chwili czasu lub stanu układu dokonuje się wyboru odpowiednich regulatorów. Podczas ruchu statku przy prędkościach manewrowych dynamika statku jest silnie nieliniowa, skolei podczas ruchu przy prędkościach małych dopuszcza się aproksymację liniową modelu ze względu na dominujące liniowe hydrodynamiczne siły tłumienia. Przy małych prędkościach ruchu odmienne są charakterystyki sił oporu kadłuba. Można również zauważyć zwiększony wpływ zakłóceń.

Autor sugeruje zastosowanie przełączalnego systemu sterowania, przyjmując różne strategie sterowania oparte o różne modele matematyczne, w zależności czy statek porusza się przy małych, pośrednich czy eksploatacyjnych prędkościach. Przełączanie pomiędzy regulatorami stanowi osobne zagadnienie naukowo-badawcze. Klasyczne podejście polega na rozszerzeniu układu o zbiór dyskretnych (np. binarnych) stanów używanych do wyboru regulatora oraz zbiór zdarzeń do obsługi przejść między stanami (operacyjnymi). Przy czym dąży się do zapewnienia, przełączania bezzderzeniowego, tzn. aby sygnał przełączający był funkcją gładką klasy C^n . Nieciągłe przełączanie

może prowadzić do pogorszenia jakości układu, a nawet utraty stabilności w wyniku niekontrolowanych zmian sygnałów. Aby zapewnić, że nie występują gwałtowne zmiany stanów przejściowych bezpośrednio po przełączeniu regulatorów, dwa spośród nich (PID i MPC) pracowały w układzie przełączania bezuderzeniowego (bumpless transfer), jednak tylko te które miały spójne wymiary wejścia i wyjścia. Autor opracował w tym celu strukturę, w której sygnał sterujący regulatora rezerwowego nadąża za sygnałem sterującym regulatora aktywnego, zwaną metodą śledzenia sygnałów wyjściowych regulatora aktywnego. Przełączanie pomiędzy regulatorem PID i LMI następowało po procedurze „kopnięcia wstecz”, tj. po zmniejszeniu prędkości statku do wartości bliskiej zeru, co jednak wprowadzało gwałtowne zmiany sygnałów sterujących.

Choć nadal nie ma pewności, że taka struktura zapewni spełnienie warunków przełączania bezuderzeniowego, przedstawionych w podrozdziale (1.4.1), to zaproponowane podejście prowadzi do do minimalizacji (w pewnym sensie) różnic między sygnałami wytwarzanymi przez regulatory aktywny i nieaktywny. Warto tu nadmienić, że dokładna definicja przełączania bezuderzeniowego nie jest powszechnie uzgodniona. Oprócz podejścia autora określa się jako takie, w którym mamy ciągłe wejścia i ciągłe wyjścia lub stany przejściowe wprowadzane przez przejścia regulatora są minimalne.

Pan mgr Andrzej Rak w swojej rozprawie opisał w spójny, logiczny sposób zaplanowane i zrealizowane eksperymenty. Wnioski końcowe są interesujące i istotne szczególnie z praktycznego punktu widzenia. Uwzględniając powyższe, uważam, że opracowane metody i system, uwzględniając przedstawione eksperymenty, pozwalają na efektywne sterowanie statkiem w podróży „od kei do kei”.

Opracowany kompleksowy układ sterowania wraz z jego realizacją techniczną w środowisku badawczym na jeziorze Silm jest istotnym rozwinięciem w stosunku do istniejących rozwiązań przedstawianych w literaturze, stanowiąc oryginalne osiągnięcie Autora.

4. Poprawność redakcyjna rozprawy

Praca pod względem układu i kolejności sformułowanych problemów jest prawidłowo skonstruowana. Od strony redakcyjnej została przygotowana z dużą starannością. Rysunki wykonane starannie oraz wplecione umiejętnie w całość. Język poprawny, jednak Autor nie ustrzegł się od kilku błędów, które zostaną przedstawione w dalszej części recenzji.

Strona 1, linia 11 i 28: błąd literowy „technologii”;

Strona 2, linia 1: błąd literowy „International Chamber of Shipping”;

Strona 2, linia 14: błąd literowy „przejąć”;

Strona 8, rozdział 1.2.1: „Zagadnienie sterowania kursem statku”. W rozdziale tym Autor dokonał przeglądu metod sterowania kursem statku, nie opisuje zagadnienia sterowania kursem tj. samego procesu i problemów z tym związanych.

Strona 13. rysunek 1.3: „Kluczowy podsystem (rys. 1.5)” – powinno być odniesienie do rys. 1.4.

Strona 17, po wzorze (1.3): „prowadzi to do minimalizacji nieciągłości” - niepoprawnie sformułowane, gdyż nieciągłość jest lub jej nie ma.

Strona 17, po wzorze (1.3): „możliwie gładkich zmian jego pochodnych” - niepoprawne, nieprecyzyjne sformułowane, gdyż gładkość sygnału ma swoją definicję. Dodatkowo możemy wyróżnić klasy gładkości.

Strona 36, rysunek 2.15a: powinien zwierać nazwy polskie;

Strona 49: dla transmitancji operatorowej (3.6) nie podano wartości zidentyfikowanych parametrów, np. tabelarycznie;

Strona 55, po tabeli 3.2: błąd oznaczenia n_{AZ} zamiast Vz ;

Strona 59, rysunek 3.10: nie wyjaśniono, co oznaczają skróty (cw) i (os)?;

Strona 84, rozdział 4.3: „Badania regulatora adaptacyjnego PID-GS”. Będąc precyzyjnym, regulator ten należy do grupy regulatorów quasi-adaptacyjnych, ponieważ nie ma wyraźnego mechanizmu adaptacji aktualizującego parametry podczas bieżącej pracy układu. Uwaga dotyczy całej pracy;

Strona 59: rysunek 3.10 jest symetrycznym rozwinięciem schematu z rysunku 1.6. Dla lepszej widoczności tej symetrii, wskazane byłoby, oznaczenie bloków TR, FR, QR na rysunku 3.10.

Strona 113, dolny akapit: błąd literowy „w pewniej mierze”;

Strona 11, linia 31: błąd interpunkcyjny „. Morawskiego i in.”;
Strona 13, rysunek 1.3: kropka zamiast średnika ”;Czerwona”;
Strona 13, rysunek 1.3: „jednakowe: prędkość statku i metodę jego sterowania” - dwukropek jest tu niepotrzebny;
Strona 19: „Stąd istnieją techniki nie tyle usuwania, co ograniczania skutków przełączania” - warto je tu nadmienić;
Strona 20, akapit pierwszy: Warto doprecyzować co oznaczają symbole QR, TR, FR w układzie nadążnym? Brakuje konsekwencji – Autor używa równoważnie określenia parametry, bloki?
Strona 75: rysunek 2.21 przedstawiający układ decyzyjny - zmienne przyjęte na rysunku 2.21 nie są zgodne z przyjętymi wcześniej oznaczeniami;
Strony 67: rysunek 3.15 jest nieczytelny. Wydać, że jest on bardzo starannie przygotowany, jednak zbyt obszerny. Warto w takiej sytuacji sporządzić bardziej ogólny schemat blokowy układu, a następnie osobno przedstawić poszczególne podukłady. To samo dotyczy rysunków 3.11, 3.13 i 3.20;
Skróty używane w pracy powinny być wyjaśnione w tekście, przy pierwszym użyciu;
Modele matematyczne we wzorach (3.1)-(3.2) oraz (3.16)-(3.17) powinny mieć przypisane zmienne stanu, sterujące i wyjściowe.

5. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Dokonując oceny rozprawy mgr Andrzeja Raka Recenzent sformułował kilka uwag i spostrzeżeń, których dyskusja pozwoliłaby poprawić rezultaty i przekaz pracy.

Recenzent do pewnych niedociągnięć rozprawy zalicza brak szerszej dyskusji związanej z metodami przełączania bezuderzeniowego w strukturach wieloregulatorowych. Warto usystematyzować opisywane w literaturze metody, pod względem przedstawionego podejścia naukowego.

Zdaniem Recenzenta brakuje jasnej procedury nadzoru pracy regulatorów, np. w postaci pseudoalgorytmu lub ogólnego schematu algorytmu, objaśniającego poszczególne etapy pracy nadrzędnego układu decyzyjnego (rysunek 3.21).

W pracy Autor nie zamieścił szczegółów dotyczących syntezy regulatora LMI. Wskazany byłby jednocześnie szerszy komentarz w zakresie dokładności przyjętego do syntezy liniowego modelu użytkowego, opierając się chociażby na danych symulacyjnych.

Na stronie 47, akapit 2: Autor pisze „Dodatkowo do modelu liniowego wprowadzono niepewności parametryczne, odzwierciedlające ocenę jego niedokładności”. Niestety Autor nie podaje w jaki sposób uwzględnił niepewności. Idąc dalej wskazane byłoby przeprowadzenie analizy wrażliwości poszczególnych parametrów na jakość rozwiązania.

Na rysunkach 1.4 przedstawiono ogólny schemat układu sterowania. W części dotyczącej układu regulacji pojawia się „Układ rozdziału mocy na pędniki”, odpowiedzialny za generowanie zadanych wartości sygnałów sterujących na podstawie uogólnionego wektora sił i momentów. Jest to ważne zagadnienie, które Autor powinien szerzej omówić, szczególnie w odniesieniu do sterowania przy małych prędkościach, gdzie układ napędowy wykorzystywał ster azymutalny i tunelowy.

6. Podsumowanie:

Praca doktorska stanowi ważne uzupełnienie znanych już w literaturze rozwiązań w zakresie projektowania wieloregulatorowych układów sterowania statkiem. Autor wykazał się dużą umiejętnością w zakresie projektowania takiego typu systemu. Zdaniem Recenzenta główny nacisk Autora skoncentrował się na opracowaniu określonego systemu, implementację algorytmów sterowania wraz z układem przełączania bezuderzeniowego oraz weryfikację proponowanych rozwiązań podczas prób na obiekcie fizycznym. Dobre wyniki uzyskane w symulacjach i podczas badań modelowych, są przesłankami potwierdzającymi efektywność proponowanych w pracy rozwiązań.

Podsumowując, stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr. Andrzeja Raka spełnia wszystkie wymagania aktualnie obowiązującej Ustawy i związanych z nią rozporządzeń, odnoszących się do rozpraw doktorskich, czyli stanowi prawidłowe i oryginalne rozwiązanie dobrze postawionego problemu naukowego. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony przed Radą Naukową Wydziału Elektrycznego, Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, w ramach dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

Anna Wiśkowska