

Warszawa, 25.09.2023

dr hab. inż. Edyta Ładyżyńska-Kozdraś, prof. uczelni
Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki
02-525 Warszawa, ul. Św. A. Boboli 8

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Piotra Szmidta

pt.: *Analiza algorytmów sterowania zestawem artyleryjsko-rakietowym w warunkach oddziaływania zakłóceń zewnętrznych*

wykonanej na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki
Świętokrzyskiej

promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew KORUBA

Promotor pomocniczy: mjr dr inż. Daniel GAPIŃSKI

Podstawa formalna opracowania recenzji

pismo MAA-510/98/2023 z dnia 14 lipca 2023 r. Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna pana dr hab. inż. Stanisława Błasiaka, prof. PŚk.

1. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Szmidta ma charakter teoretyczno-symulacyjny. Jest wynikiem prowadzonych przez Doktoranta prac naukowo-badawczych poświęconych analizom sterowania zestawem artyleryjsko-rakietowym (ZAR) umieszczonym na okręcie i jego stabilizacji w warunkach oddziaływania zakłóceń związanych z ruchem okrętu na fali.

Autor porównał i zweryfikował numerycznie cztery rodzaje układów regulacji: typu PID, regulację ślizgową, liniowo-kwadratową oraz autorski algorytm oparty o zmodyfikowaną dynamikę odwrotną. Następnie dokonał analizy stabilności i odporności analizowanych algorytmów na niepewność identyfikacji parametrów zestawu, opracował algorytm filtracji w czasie rzeczywistym sygnału z głowicy

skanująco-śledzącej oraz zaproponował zmiany konstrukcji mechanicznej w celu poprawy własności dynamicznych ZAR. Poruszane w dysertacji problemy badawcze należą do zagadnień interdyscyplinarnych łączących elementy mechaniki oraz teorii sterowania. Uczynienie ich przedmiotem rozprawy doktorskiej jest ważnym i perspektywicznym wyzwaniem, trafnym zarówno z teoretycznego, jak i użytkowego punktu widzenia.

Układ pracy stanowi logiczną całość, a zawarte w poszczególnych rozdziałach treści są proporcjonalne do wagi prezentowanej w nich problematyki. Przedstawiona dysertacja obejmuje 125 stron tekstu, w tym w kolejności: zawarty na 4 stronach spis ważniejszych oznaczeń i skrótów, 7 rozdziałów zasadniczych (w tym wstęp i podsumowanie), spis literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Pod względem redakcyjnym rozprawa została opracowana bardzo starannie. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż każdy rozdział merytoryczny zakończony jest podrozdziałem zawierającym wnioski, które w sposób konstruktywny podsumowują zawarte w rozdziale treści.

We wstępie Autor omówił rozwój i zastosowanie artylerii oraz wybrane współczesne morskie systemy artyleryjskie i artyleryjsko-rakietowe. Na zakończenie rozdziału, odpowiednio w podrozdziałach 1.3 i 1.4, sformułował cel i tezę rozprawy oraz pokrótce określił jej zakres. Następnie w rozdziale 2 przedstawił sposób opracowania w programie SolidWorks modelu 3D zestawu ZU-23-2MR „Wróbel II”. Na podstawie zaimplementowanego modelu CAD określił parametry masowe i geometryczne elementów ZAR niezbędne na dalszym etapie prac związanych z budową modelu matematycznego dynamiki układu oraz podczas symulacji numerycznych.

W rozdziale 3 Doktorant zaprezentował trzy opracowane przez siebie modele dynamiki ZAR: uproszczony, rozbudowany i symulacyjny. Autor zwrócił uwagę, że model rozbudowany (z pełnym uwzględnieniem zakłóceń kinematycznych od podstawy) ma stosunkowo złożoną postać. Porównał zachowanie modelu rozbudowanego i uproszczonego dla przykładowego sterowania zestawem, badając momenty w układach wykonawczych podczas oddziaływania zakłóceń. Ostatecznie, wprowadzając pewne człony do równań ruchu modelu uproszczonego otrzymał model symulacyjny, który na potrzeby pracy wystarczająco dobrze oddaje dynamikę modelu rozbudowanego i jest używany do badań w dalszej części pracy. Autor zwrócił uwagę, że model symulacyjny jest łatwiejszy do analizy, symulacje numeryczne wykonywane

są szybciej oraz – co wydaje się najistotniejsze – umożliwi on analityczne obliczenia związane z implementacją autorskiego projektu układu regulacji opartego o zmodyfikowaną dynamikę odwrotną. Jej analiza, wraz z oszacowaniem wpływu zakłóceń na celność zestawu, została przeprowadzona w rozdziale 4.

Na szczególną uwagę zasługują rozdziały 5 i 6. W rozdziale 5 Doktorant przedstawił algorytmy sterowania zestawem artyleryjsko-rakietowym opracowane z wykorzystaniem regulatorów PID, SMC, LQR oraz autorskie rozwiązanie wykorzystujące regulator oparty o dynamikę odwrotną z pomocniczym regulatorem PID. Doktorant zaproponował równoległe połączenie regulatora PID oraz sterowania wynikającego z równań ruchu i zadanego punktu pracy zestawu (dynamika odwrotna) z uwzględnieniem, że dynamika odwrotna bierze udział w sterowaniu tylko w pobliżu pokrywania się faktycznego stanu zestawu ze stanem zadanym. Realizowane jest to poprzez zaproponowanie dodatkowej funkcji (opartej o krzywą Gaussa) skalującej układ sterowania dynamiką odwrotną w zależności od uchybu sterowania. Autor dzięki zastosowaniu dwóch regulatorów rozwiązał problem sterowania i zachowania stabilności ZAR, gdy faktyczny (aktualny) punkt pracy zestawu jest inny od zadanego, np. tuż po włączeniu zestawu lub w przypadku skokowej zmiany sygnałów zadanych – wykrycia obiektu, na który zestaw ma być naprowadzony. Ponadto, regulator PID działający równoległe z dynamiką odwrotną jest w stanie skompensować pewne niedoskonałości modelu (np. błędy czy niedokładności identyfikacji), co w pracy również zostało zaznaczone i jest kwestią istotną z praktycznego punktu widzenia.

Autor podczas swoich badań natknął się na problem filtracji zaszumionych sygnałów pochodzących z optoelektronicznej głowicy skanująco-śledzącej, co opisał w rozdziale 6. Zanim sygnały z głowicy zostaną wykorzystane w układzie sterowania, należy wspomniany szum ograniczyć. Doktorant podjął próby zastosowania klasycznych filtrów dolnoprzepustowych oraz filtru Kalmana do estymacji rzeczywistego położenia kąтового obiektu. W pracy wykazał, że filtry te przy odpowiednio dobranych współczynnikach mogą spełniać swoją rolę, ale jednocześnie wprowadzają zbyt duże opóźnienie sygnału wyjściowego do zastosowania w układach czasu rzeczywistego. Autor rozwiązał ten problem opracowując nowy filtr oparty o filtr Kalmana i filtr Butterwortha. Przedstawione w pracy symulacje numeryczne pokazują, iż opracowany filtr zapewnia niemal całkowite zniesienie przesunięcia fazowego użytecznego sygnału przy zachowaniu dobrej jakości filtracji. Opracowany filtr jest również użyteczny przy estymacji prędkości kątowych celu, które (wraz z położeniem

kątowym) muszą być znane w przypadku sterowania metodą zmodyfikowanej dynamiki odwrotnej.

Na zakończenie dysertacji Doktorant przeanalizował pokrótce zakres przeprowadzonych badań i analiz, przedstawiając trafne wnioski wynikające z opisanych w rozprawie rozważań oraz wskazał kierunki dalszych badań.

Ostatnim elementem pracy jest wykaz piśmiennictwa, który obejmuje 105 pozycji literaturowych w języku polskim i angielskim uporządkowanych alfabetycznie, w tym 30 odniesień do stron internetowych. Źródła literaturowe zostały dobrane i wykorzystane w tekście rozprawy właściwie, z dużą starannością i w wystarczającej liczbie.

Reasumując, praca stanowi logiczną, spójną całość dobrze zredagowaną zarówno pod względem merytorycznym, jak i edytorskim oraz językowym. Używana w pracy nomenklatura jest prawidłowa. Zakres wykonanych przez Autora badań i analiz w pełni potwierdza zrealizowanie celu i potwierdzenie tezy pracy. Proporcje tematyczne treści kolejnych rozdziałów są właściwe i stanowią logiczną całość. Analizy wyników teoretycznych i symulacyjnych zostały przeprowadzone należycie i nie budzą zastrzeżeń, a ich interpretacja oraz sformułowane wnioski są prawidłowe. Dysertacja została przygotowana w estetyczny sposób, z dużą troską o szczegóły.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Wybór tematyki rozprawy uważam za aktualny i perspektywiczny. Został on trafnie dobrany i umiejętnie zrealizowany zarówno z teoretyczno-poznawczego, jak i użytecznego punktu widzenia. Opracowany w ramach dysertacji system sterowania może być wstępem do przeprowadzenia modernizacji zestawu morskiego „Wróbel II”, co pozwoli na zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania zestawu poprzez jego zdalną obsługę, a także na precyzyjne, autonomiczne namierzanie i śledzenie celu w warunkach oddziaływania zakłóceń związanych z ruchem okrętu na fali morskiej.

W dysertacji właściwie i wyczerpująco została naświetlona szeroka problematyka naukowo-badawcza obejmująca przeprowadzenie wielu analiz. Do głównych walorów naukowych pracy zaliczam:

- opracowanie i porównanie trzech modeli matematycznych dynamiki analizowanego zestawu „Wróbel II” (modelu rozbudowanego, uproszczonego i

symulacyjnego) oraz wyznaczenie za pomocą Jakobianów niestacjonarnego modelu zlinearyzowanego;

- przeprowadzenie odwrotnej analizy dynamiki zestawu „Wróbel II” wykorzystanej następnie w zaproponowanym przez Autora układzie regulacji;
- przeanalizowanie czterech rodzajów układów regulacji: PID, regulacji ślizgowej, liniowo-kwadratowej oraz opartej o autorskie rozwiązanie wykorzystujące zmodyfikowany algorytm dynamiki odwrotnej;
- opracowanie i implementację autorskiego projektu układu regulacji opartego o zmodyfikowaną dynamikę odwrotną oraz zweryfikowanie jego działania na podstawie badań symulacyjnych dla różnych przykładów uwzględniających możliwe warunki pracy zestawu „Wróbel II”;
- opracowanie i implementację autorskiego algorytmu filtru dolnoprzepustowego realizującego filtrację sygnału z głowicy skanująco-śledzącej w czasie rzeczywistym bez opóźnień.

Ponadto należy podkreślić, że:

- zagadnienie naukowe zostało jasno sformułowane i rozwiązane, a cel naukowy został osiągnięty;
- rozprawa ma charakter teoretyczno-symulacyjny;
- rozprawę można zaliczyć do dyscypliny inżynieria mechaniczna;
- doktorant wykazał się wysokim poziomem wiedzy we wspomnianej dyscyplinie oraz wykazał umiejętność i cechy do samodzielnego prowadzenia prac badawczo-naukowych;
- zagadnienia poruszane w rozprawie są aktualne i mogą zostać wykorzystane do modernizacji istniejących zestawów morskich Wróbel II w celu zdalnego ich sterowania z jednoczesną stabilizacją.

W czasie lektury rozprawy nasunęły mi się następujące komentarze, pytania i uwagi:

- Układ pracy jest przejrzysty i cechuje się dużą dbałością o szczegóły. Na uznanie zasługuje fakt, iż każdy rozdział zakończony jest podrozdziałem zawierającym merytoryczne wnioski, które podsumowują zawarte w rozdziale treści.
- W pracy występują nieliczne błędy językowe, głównie tzw. „literówki”, których w całej dysertacji naliczyłam kilkanaście.

- Powołania na niektóre rysunki są błędne, np. str. 37², 68⁶, 70³, 70¹¹, 79⁵, 87¹¹, 110⁶. Brak jest też odwołania do rys. 5.19.
- Niekiedy Autor w sposób zamienny używa pojęć statek i okręt. Nie jest to właściwe – jednostką pływającą marynarki wojennej przenoszącą analizowany zestaw artyleryjsko-rakietowy jest okręt.
- Brak jest precyzyjnego zdefiniowania położenia i wzajemnej konfiguracji stosowanych w pracy układów odniesienia – rys. 2.8 i jego opis dają tylko informację poglądową.
- Wzór (2.5): pod pierwiastkiem powinno znajdować się całe wyrażenie, a nie tylko dwa jego pierwsze człony.
- Str. 38⁶, 39⁵: nie siła ciężenia, tylko ciężkości; M_g chyba lepiej określić jako moment zredukowany.
- Niepoprawne są niektóre oznaczenia kątów np. rys. 3.2, rys. 4.7 – gdzie są ramiona i wierzchołki tych kątów?
- Wyprowadzony model dynamiki układu zyskałby na przejrzystości, gdyby jego parametry kinematyczne zostały zobrazowane na wspólnym rysunku.
- Dlaczego przyspieszenie ε_2 w opracowanym modelu symulacyjnym (str. 49) zostało zastąpione wyrażeniem $\ddot{r}_x \sin \theta_1 + \ddot{r}_y \cos \theta_1$? Jak można zinterpretować ostatni składnik sumy we wzorze 3.26?
- W niektórych przypadkach brak jest wyjaśnień w jaki sposób wyznaczono wartość zastosowanych parametrów, np. parametrów p_1 i p_2 definiujących powierzchnię ślizgu (str. 82), czy też we wzorze (6.9).
- Czy dla ogólnego modelu dynamiki ZAR (bez ograniczenia ruchu jego podstawy do zależności kinematycznych) możliwe byłoby dostosowanie zaproponowanego układu regulacji ZDO?
- W układzie regulacji ZDO Autor zakłada równoległe połączenie regulatora PID oraz sterowania opartego na dynamice odwrotnej. W jaki sposób znajdowane będą optymalne nastawy dla każdego punktu pracy zestawu przy takim sterowaniu? Jaki jest szacunkowy czas znajdowania takich nastaw w porównaniu z innymi typami analizowanych w pracy regulatorów?

Wymienione uwagi nie mają wpływu na ogólną ocenę rozprawy, która niewątpliwie wnosi cenny wkład w analizę procesu modelowania oraz rozwój

systemów sterowania złożonych obiektów ruchomych z nałożonymi więzami kinematycznymi, w szczególności zestawu morskiego „Wróbel II”.

4. Podsumowanie

Rozprawę doktorską mgr inż. Piotra Szmidta oceniam bardzo wysoko. Jest ona opracowaniem oryginalnym i świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autora. Wszystkie podejmowane w dysertacji wątki są ważne zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i użytkowym. Doktorant wykazał się wiedzą i dojrzałością naukową w formułowaniu zagadnień, realizacji rozwiązań i wyciąganiu właściwych wniosków. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, iż mgr inż. Piotr Szmidt ma bardzo dobre przygotowanie teoretyczne i warsztatowe do twórczej pracy naukowo-badawczej.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Szmidta spełnia wymagania stawiane przez aktualnie obowiązującą Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki. Stawiam wniosek o **przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Piotra Szmidta do jej publicznej obrony.**

Dodatkowo wnioskuję aby Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej rozważyła możliwość **wyróżnienia** niniejszej dysertacji za:

- dojrzałość Doktoranta jako badacza zaangażowanego w rozwój i modernizację zestawów artyleryjsko-rakietowych, w tym zagadnień sterowania i stabilizacji w warunkach oddziaływania zakłóceń zewnętrznych;
- opracowany system sterowania zestawem artyleryjsko-rakietowym zwiększający jego efektywność przechwytywania, śledzenia i unieszkodliwiania manewrującego celu powietrznego;
- interdyscyplinarność przedstawionej tematyki łączącej zakres mechaniki i budowy maszyn z automatyką i teorią sterowania;
- duży dorobek publikacyjny związany z realizacją rozprawy, w tym artykuły w *Energies* i *Electronics* (140 pkt. MEiN).

