

Warszawa, 22.05.2023

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. Marty Grzyb

pt.: *Analiza naprowadzania na cel naziemny obiektu latającego jako układu z nałożonymi więzami*

wykonanej na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki
Świętokrzyskiej

promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew KORUBA

Podstawa formalna opracowania recenzji

pismo MAA-510/18/2023 z dnia 23 marca 2023 r. Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna pana dr hab. inż. Stanisława Błasiaka, prof. PŚk.

1. Sylwetka Doktorantki

Mgr inż. Marta Grzyb z Politechniką Świętokrzyską związana jest od 2004 roku, kiedy to na kierunku Automatyka i Robotyka rozpoczęła studia inżynierskie. Swą edukację kontynuowała na studiach II, a następnie III stopnia pod opieką prof. Zbigniewa Koruby zgłębiając tematykę modelowania i analizy numerycznej obiektów latających jako układów z nałożonymi więzami. Od 2012 roku jest zatrudniona w Katedrze Mechatroniki i Uzbrojenia. W ostatnich latach odbyła trzy pięciodniowe wyjazdy zagraniczne w ramach programu LLP-Erasmus+ oraz była członkiem dwóch zespołów w projekcie badawczym realizowanym w ramach konkursu NCBiR pn. „Przyszłościowe Technologie dla Obronności – Konkurs Młodych Naukowców”, gdzie realizowała tematykę związaną m.in. z przygotowywaną rozprawą doktorską. Jej zaangażowanie w pracę dydaktyczną i naukową zostało

uhonorowane dziewięcioma nagrodami, w tym trzema Nagrodami Rektora PŚk oraz złotym medalem na międzynarodowej wystawie Warsaw Inventions Show 2021.

Zgodnie z wykazem dorobku naukowego pracownika PŚk (<https://dorobek.tu.kielce.pl>) mgr inż. Marta Grzyb jest współautorką 31 publikacji, w tym – w ciągu ostatnich czterech lat – ukazały się związane z tematyką rozprawy doktorskiej trzy artykuły w czasopiśmie naukowych (jeden w *Energies* oraz dwa w czasopiśmie *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*), a także dwa rozdziały w monografiach naukowych.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marty Grzyb ma charakter teoretyczno-symulacyjny. Jest wynikiem prowadzonych przez Doktorantkę prac naukowo-badawczych poświęconych analizom układu z nałożonymi więzami kinematycznymi w postaci sterowanego obiektu latającego naprowadzanego na cel naziemny. Obiektem testowym była bomba lotnicza o wagomiarze 15 kg. Autorka porównała różne typy układów sterowania bombą oraz uwzględniła wpływ oddziaływania zakłóceń atmosferycznych na proces jej naprowadzania. W dysertacji przeanalizowane zostały układy sterowania wykorzystujące klasyczne regulatory: P, PI, PD i PID, sterowanie ślizgowe, a także zaproponowane przez Doktorantkę struktury hybrydowe powstałe w wyniku ich odpowiedniego połączenia. Przebadane w pracy struktury hybrydowe sterowania pozwoliły na zwiększenie dokładności trafienia bomby w cel, przy wykorzystaniu wyłącznie uchybu kąтового, co jest innowacyjnym elementem pracy.

Poprawność analizowanego w dysertacji procesu modelowania matematycznego oraz budowy algorytmów sterowania analizowanego obiektu latającego poparta została przykładami symulacji komputerowych ilustrujących proces sterowania lotem bomby i jej naprowadzania w zmiennych warunkach atmosferycznych na nieruchomy oraz ruchomy cel naziemny.

Poruszane w dysertacji problemy badawcze należą do zagadnień interdyscyplinarnych łączących elementy balistyki zewnętrznej oraz teorii sterowania. Uczynienie ich przedmiotem rozprawy doktorskiej jest ważnym i perspektywicznym wyzwaniem, trafnym zarówno z teoretycznego, jak i utylitarne punktu widzenia.

Układ pracy stanowi logiczną całość, a zawarte w poszczególnych rozdziałach treści są proporcjonalne do wagi prezentowanej w nich problematyki. Przedstawiona

dysertacja obejmuje 198 stron tekstu, w tym w kolejności: zawarty na 6. stronach spis ważniejszych oznaczeń i skrótów, pięć obszernych rozdziałów zasadniczych, literaturę oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Pod względem redakcyjnym rozprawa została opracowana bardzo starannie.

W rozdziale 1, zatytułowanym *Przegląd literatury na temat obiektów latających klasy powietrze-ziemia* Doktorantka przeprowadziła analizę literaturową poświęconą rozwojowi uzbrojenia lotniczego na przestrzeni lat, ze szczególnym uwzględnieniem obiektów klasy powietrze-ziemia, w tym pocisków raketowych, bomb oraz bojowych bezzałogowych statków powietrznych. Na zakończenie rozdziału, w jednoakapitowym podrozdziale 1.3 sformułowano cel pracy, a w podrozdziale 1.4 określono pokrótce jej zakres. Zgodnie ze słowami Autorki „celem pracy jest opracowanie autorskiego algorytmu hybrydowego sterowania wraz z analizą kinematyki i dynamiki bomby kierowanej naprowadzanej na cel naziemny w warunkach oddziaływania zakłóceń atmosferycznych”. Mankamentem rozdziału jest brak precyzyjnego określenia przesłanek, które skłoniły Autorkę do zajęcia się poruszoną w pracy tematyką oraz przedstawienia – przed sformułowaniem celu pracy – luki badawczej, której wypełnienie oferuje niniejsza dysertacja.

W rozdziale 2. zaprezentowano proces modelowania fizycznego i matematycznego analizowanego obiektu latającego. W tym celu zdefiniowano obiekt sterowania w postaci kierowanej bomby lotniczej, której ruch w ogólnym przypadku rozpatrywany jest w zmiennych warunkach atmosferycznych. Na lot bomby nałożone zostały więzy kinematyczne wynikające ze sposobu naprowadzania na cel naziemny. Określono właściwości masowe oraz geometryczne rozpatrywanej bomby, a także wskazano przyjęte założenia przy opracowywaniu jej modelu matematycznego. Równania ruchu zostały wyznaczone przez Doktorantkę przy wykorzystaniu równań Newtona-Eulera dla układów o więzach holonomicznych. Następnie, w postaci graficznej i tabelarycznej, Autorka przedstawiła wyniki badań numerycznych dotyczących wpływu warunków początkowych na lot bomby kierowanej. Stały się one podstawą – niestety słabo popartą analizą uzyskanych wyników – do wysnucia przez Doktorantkę wniosku o poprawności opracowanego modelu symulacyjnego. Na zakończenie rozdziału Autorka dokonała analizy dynamiki układu wykonawczego sterowania testowanej bomby oraz przyjęła uproszczenia wykorzystywane w toku dalszych badań.

Rozdział 3, w którym przeprowadzono badania numeryczne wybranych metod sterowania rozważanym obiektem latającym jest najobszerniejszą częścią pracy. Przytoczone wyniki badań występują tu zarówno w wersji graficznej, jak i tabelarycznej, co ułatwia ich analizę. Mankamentem jest odczuwalny w trakcie lektury niedosyt wnikliwej interpretacji prezentowanych wyników. Stanowiące niewątpliwie ciekawy materiał badawczy dane zamieszczone są w poszczególnych pod-pod-rozdziałach bez interpretacji, a dopiero potem zbiorczo podsumowywane, na zakończenie każdego z pięciu głównych podrozdziałów. Taka forma prezentacji treści zmniejsza jej czytelność.

Doktorantka skupia się na zaprojektowaniu systemu sterowania lotem bomby kierowanej jako układu nieliniowego. Na początku rozdziału Autorka przedstawiła zastosowaną w dysertacji metodę linearyzacji nieliniowego modelu bomby oraz sposób zastosowania otrzymanego modelu liniowego dla analizowanego obiektu latającego. Doktorantka poddała analizie układy sterowania lotem bomby kierowanej wykorzystujące klasyczne regulatory: P, PI, PD oraz PID, sterowanie ślizgowe oraz struktury hybrydowe powstałe w wyniku ich połączenia. Każda z metod sterowania wymagała wyznaczenia różnej liczby parametrów dla projektowanego regulatora. W pracy przyjęto, że głównym kryterium doboru współczynników wzmocnień projektowanych regulatorów będzie parametr określany jako dokładność trafienia w cel, czyli minimalna wartość odległości bomby od celu naziemnego w chwili końcowej samonaprowadzania.

Wstępne badania numeryczne przeprowadzone przez Doktorantkę wykazały, że system sterowania bombą kierowaną, który wykorzystywał wyłącznie uchyb kątowy do wypracowania sygnałów sterujących nie pozwolił na osiągnięcie celu naziemnego z założoną dokładnością. Dlatego też następnie analizie poddane zostały cztery różne postacie uchybów sterowania do wygenerowania odpowiednich sygnałów sterujących regulatora. Początkowo uchyb Doktorantka obliczała jedynie dla kąta pochylenia, następnie dla kątów pochylenia i wysokości, i wreszcie dla kąta pochylenia, współrzędnych wysokości i położenia bomby kierowanej. Tego rodzaju uchyby sterowania zaimplementowane zostały w regulatorze klasycznym PID oraz regulatorze ślizgowym. W wyniku przeprowadzonych analiz Autorka stwierdziła, że wprowadzenie dodatkowych uchybów zwiększało skuteczność działania systemu sterowania badanego obiektu latającego.

Na szczególną uwagę zasługuje, zamodelowane przez Doktorantkę, hybrydowe sterowanie bombą kierowaną podczas jej naprowadzania na nieruchomy i ruchomy cel naziemny. Jego dwie struktury – szeregową i równoległą – zostały zaprezentowane w podrozdziałach 3.4 i 3.5. Hybrydowy regulator łączący ze sobą klasyczną postać regulatora PID oraz regulatora ślizgowego dla trzech postaci płaszczyzn ślizgu. Pokazaną w przeprowadzonych symulacjach numerycznych zaletą tego podejścia jest fakt, że do określenia algorytmu sterowania lotem bomby kierowanej wystarcza jedynie uchyb kątowy.

Część badawczą pracy zamyka rozdział 4, w którym Doktorantka rozszerzyła prowadzone badania numeryczne o analizę wpływu zakłóceń atmosferycznych na lot bomby kierowanej. Po zaprezentowaniu sposobu modelowania zakłóceń atmosferycznych takich jak uskoki i podmuch wiatru oraz turbulencja atmosferyczna Autorka przedstawiła wyniki symulacji numerycznych systemu sterowania bombą kierowaną przy wykorzystaniu regulatorów PID, SMC oraz dwóch struktur hybrydowych. Na podstawie przedstawionych w postaci graficznej i tabelarycznej wyników Doktorantka wysnuwa słuszne wnioski, że struktury hybrydowe pozwoliły najlepiej wyeliminować nieregularność zmian w przebiegach parametrów lotu bomby kierowanej.

Zawarty w pracy wykaz literatury obejmuje 221 uporządkowanych alfabetycznie pozycji bibliograficznych w języku polskim i angielskim, w tym 4 współautorstwa Doktorantki. Źródła literaturowe zostały dobrane i wykorzystane w tekście rozprawy właściwie, z dużą starannością. Jedynym zauważonym mankamentem są powielane w kilku miejscach w spisie literatury te same pozycje: [32] i [33], [58] i [59], [77] i [78], [112] i [113], [123] i [124].

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 Autorkę badań i analiz w pełni potwierdza zrealizowanie celu pracy. Proporcje tematyczne treści kolejnych rozdziałów są właściwe i stanowią logiczną całość. Dysertacja została przygotowana w estetyczny sposób, z dużą troską o szczegóły.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

W rozprawie doktorskiej „Analiza naprowadzania na cel naziemny obiektu latającego jako układu z nałożonymi więzami” mgr inż. Marta Grzyb przedstawiła

oryginalne algorytmy sterowania bombą kierowaną jako obiektem latającym z nałożonymi więzami. Autorka wykazała się wiedzą z zakresu analizowanych układów sterowania obiektów latających. W pracy dokonała analizy układów sterowania lotem bomb kierowanych wykorzystujących klasyczne regulatory: P, PI, PD oraz PID, sterowanie ślizgowe, a także struktury hybrydowe powstałe w wyniku ich połączenia. Każda z metod sterowania wymagała wyznaczenia różnej liczby parametrów dla projektowanego regulatora, przy czym w pracy zastosowano jedno kryterium doboru współczynników wzmocnień, w postaci parametru zdefiniowanego jako dokładność trafienia w cel.

Na szczególną uwagę zasługuje opracowany przez Doktorantkę hybrydowy system sterowania bombą kierowaną. System ten został zaimplementowany i przebadany numerycznie w procesie naprowadzania bomby na nieruchomy i ruchomy cel naziemny przy występowaniu zakłóceń atmosferycznych. Jego zaletą jest to, że do określenia algorytmu sterowania lotem wystarczający był jedynie uchyb kątowy. Zgodnie z moją wiedzą tego typu rozwiązanie nie było dotąd wykorzystywane przy naprowadzaniu bomb kierowanych.

Podsumowując, uważam że przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Marty Grzyb spełnia wymogi merytoryczne, formalne i redakcyjne oraz zawiera wyraźne elementy nowości naukowej oraz innowacyjności. Należy stwierdzić, że układ i struktura rozprawy są poprawne. Dokonany został przegląd literatury, przedstawiono cel pracy oraz obiekt badań. Źródła literaturowe są dobrane właściwie i w wystarczającej liczbie. Naświetlone zostało także uzasadnienie szerokiej problematyki poruszonej w dysertacji, obejmującej przeprowadzenie wielu badań i analiz. Przytoczone wyniki badań występują zarówno w wersji graficznej, jak i tabelarycznej. Na zakończenie rozprawy Doktorantka dokonuje podsumowania i wyciąga trafne wnioski końcowe.

Podsumowując rozprawę można stwierdzić, że jej temat jest aktualny i rozwojowy, a postawiony cel został osiągnięty. Zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjęła się Doktorantka zostało zbadane wszechstronnie i wnikliwie. Analizy wyników teoretycznych i symulacyjnych zostały przeprowadzone, a sformułowane wnioski są prawidłowe.

Należy podkreślić, że:

1. Zagadnienie naukowe zostało jasno sformułowane i rozwiązane, a cel naukowy został osiągnięty.

2. Rozprawa ma charakter teoretyczno-symulacyjny.
3. Rozprawę można zaliczyć do dyscypliny „inżynieria mechaniczna”.
4. Doktorantka wykazała się wysokim poziomem wiedzy we wspomnianej dyscyplinie oraz wykazała umiejętność i cechy do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.
5. Doktorantka właściwie przeprowadziła analizę piśmiennictwa i stan wiedzy analizowanego zagadnienia naukowego.
6. Zagadnienia poruszane w rozprawie są aktualne, a wiele z nich przez Autorkę rozwiązanych stanowić może nieocenioną pomoc w projektowaniu systemów naprowadzania bomb kierowanych.
7. Temat rozprawy jest aktualny i perspektywiczny.

Na szczególne podkreślenie zasługują następujące osiągnięcia wykazane w rozprawie:

1. Przeprowadzenie szerokiej analizy układów sterowania lotem bomby kierowanej wykorzystujących regulatory klasyczne oraz regulator ślizgowy dla trzech postaci płaszczyzny ślizgu (klasycznej, quasi – ślizgowej oraz super – twisting).
2. Zaprojektowanie dwóch struktur hybrydowych układu sterowania lotem bomby kierowanej, które pozwoliły na zwiększenie dokładności trafienia w cel naziemny.
3. Przeprowadzenie analizy porównawczej czterech postaci sygnałów sterujących dla regulatora PID oraz regulatora ślizgowego. Oprócz uchybu kąтового dla układu sterowania, wprowadzono dodatkowo korekty dla wysokości, oraz współrzędnej x_g położenia bomby kierowanej. Wprowadzenie dodatkowych korekt zwiększyło skuteczność działania systemu sterowania bomby zarówno dla regulatora PID, jak i regulatora ślizgowego.
4. Analiza zjawisk atmosferycznych w postaci uskoku wiatru, podmuchu wiatru oraz turbulencji atmosferycznej oraz przebadanie przebiegu lotu bomby kierowanej naprowadzanej na cel naziemny w warunkach oddziaływania tychże zakłóceń zewnętrznych.
5. Przeprowadzenie analizy skuteczności działania zaproponowanych układów sterowania bomby kierowanej podczas działania zakłóceń atmosferycznych.

Do mankamentów, które można dostrzec w trakcie lektury pracy należą:

1. Ograniczenie analizy zaproponowanych systemów sterowania lotem BK dla modelu liniowego.
2. Brak badań symulacyjnych dla zaprojektowanych systemów sterowania BK dla modelu przestrzennego.
3. Brak badań dynamiki układu wykonawczego dla zaprojektowanych systemów sterowania lotem BK.

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

1. Układ pracy i szata graficzna są przejrzyste. Napisana została ona z dużą starannością i dbałością o szczegóły.
2. Zdarzają się jedynie nieliczne błędy językowe, głównie tzw. „literówki”, których w całej pracy naliczyłam 28.
3. W tabelach 2.1 – 2.3 nie zostały umieszczone odwołania do źródeł, z których Autorka czerpała dane.
4. Co Autorka miała na myśli stwierdzając, iż (str. 42¹⁵) opracowany „model otoczenia zawiera zarówno sygnały wymuszające (sterowanie), jak i zakłócenia atmosferyczne”? O jakie sterowanie chodzi?
5. Czy na pewno osie startowego układu współrzędnych są nieruchome? (str. 43⁵)
6. Wzór (2.48) nie określa położenia bomby kierowanej, tylko prędkość zmiany położenia jej środka masy w układzie inercyjnym.
7. Pojęcia więzów holonomicznych i nieholonomicznych nie są tożsame z pojęciami więzów geometrycznych i kinematycznych, jak zostało zasugerowane na str. 66.
8. Dlaczego po dokonaniu analizy dynamiki układu wykonawczego sterowania testowanej bomby i zdefiniowaniu jego transmitancji jako elementu drugiego rzędu, w ostatnim akapicie podrozdziału 2.4 Autorka stwierdza, że w dalszych rozważaniach dynamika steru wysokości zostanie pominięta ($u_w = \delta_w$)?
9. Dlaczego tworząc model liniowy tor lotu bomby podzielono na 8 odcinków? Jakie czynniki miały na to wpływ?
10. Jak można zinterpretować fakt, że czas lotu bomby dla modelu liniowego jest inny niż dla modelu nieliniowego?

11. W jaki sposób została dobrana początkowa wartość kąta pochylenia bomby ($\theta_0 = -71.56^\circ$)?
12. Czy wzrost prędkości celu lub jego ruch niejednostajny miałby wpływ na skuteczność działania układu sterowania? Jak zależałoby to od zastosowanego typu regulatora?
13. Powtarza się numeracja rysunków 3.25 - 3.42 (od str. 113).
14. W trakcie lektury rozprawy odczuwa się niedosyt wnikliwej analizy uzyskanych wyników symulacji numerycznych. Stanowiące niewątpliwie ciekawy materiał badawczy wyniki są przedstawiane w postaci graficznej i tabelarycznej, a następnie podsumowywane zbiorczym komentarzem. Np. w jaki sposób zinterpretować można narastające oscylacje kąta natarcia bomby (rys. 3.30 str. 104, rys. 3.38 str. 107, lub rys. 3.69), czy też nagłe jego skokowe zmiany (rys. 3.29 str. 113).
15. We wnioskach (rozdział 5) Doktorantka podkreśla, że „dla każdej z metod sterowania BK należało dobrać współczynniki wzmocnień projektowanych regulatorów, co było procesem bardzo czasochłonnym i wymagało dużej dokładności”. Z prezentowanych w pracy zestawień tabelarycznych widać, że współczynniki wzmocnień były dobierane nie tylko dla każdej z metod sterowania, ale wręcz dla każdego przypadku symulacyjnego (za każdym razem mają one inną wartość). W jaki sposób dobór ten odbywał się w praktyce?
16. Ponieważ Autorka w rozprawie nie sformułowała tezy pracy, a ja uważam mogłaby dodatkowo wzbogacić jej aspekt poznawczy i naukowy przyczyniając się do określenia luki badawczej, prosiłabym aby w ramach publicznej obrony Doktorantka sformułowała tezę i podjęła dysputę w tym zakresie.

Wymienione uwagi nie mają wpływu na ogólną ocenę rozprawy, która niewątpliwie wnosi cenny wkład w analizę procesu modelowania oraz rozwój systemów sterowania obiektów latających z nałożonymi więzami holonomicznymi.

4. Podsumowanie

Rozprawę doktorską mgr inż. Marty Grzyb oceniam wysoko. Jest ona opracowaniem oryginalnym i świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autorki. Wszystkie podejmowane w dysertacji wątki są ważne

zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i użytkowym. Doktorantka wykazała się wiedzą i dojrzałością naukową w formułowaniu zagadnień oraz realizacji rozwiązań. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, iż mgr inż. Marta Grzyb ma bardzo dobre przygotowanie teoretyczne i warsztatowe do twórczej pracy naukowej.

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

Biorąc pod uwagę zakres rozprawy, sposób podejścia do problemu naukowego i uzyskane wyniki, które mogą być wykorzystywane w systemie naprowadzania bomb kierowanych – wnoszę aby Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej rozważyła możliwość wyróżnienia niniejszej dysertacji.

