

Kielce, dnia 8.07.2022 r.

dr hab. inż. Izabela Krzysztofik, prof. PŚk  
Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn  
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Tomasza Klemby**  
pt. „Badania dynamiki układu bomba-fluger”

### Podstawa wykonania recenzji:

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo Koordynatora Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna dr hab. inż. Andrzeja Komorka, prof. LAW, z dnia 9 marca 2022 r. z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy mgra inż. Tomasza Klemby pt. „*Badania dynamiki układu bomba-fluger*”, w związku z powołaniem na recenzenta Uchwałą nr 11/22 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Federacji Akademii Wojskowych z dnia 21 kwietnia 2022 r.

### **1. Sylwetka Doktoranta**

Mgr inż. Tomasz Klemba ukończył studia na Wydziale Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał dnia 28 września 2007 roku w specjalności *Konstrukcja i technologia broni lufowej*.

Po ukończeniu studiów, od listopada 2007 roku, rozpoczął pracę w Zakładach Metalowych DEZAMET S.A., w Dziale Głównego Konstruktora jako referent ds. technicznych, którą kontynuował do września 2008 roku. Od października 2008 roku podjął pracę w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych, w Zakładzie Uzbrojenia Lotniczego, w Pracowni Badań Poligonowych, gdzie pracuje do chwili obecnej. W latach 2008-2013 pracował na stanowisku inżyniera, od 2013 do marca 2022 roku jako specjalista badawczo-techniczny, a obecnie jest kierownikiem Pracowni Badań Poligonowych.

W swoim dorobku naukowym Doktorant posiada cztery współautorskie publikacje w czasopiśmie: *Journal of Marine Engineering and Technology*, *Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, lotnictwo, inżyniera bezpieczeństwa*, *Czasopismo Techniczne. Mechanika* oraz *Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych*. Brał również czynny udział

w VI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”.

Doktorant nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora.

## 2. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Badania dynamiki układu bomba-fluger*” obejmuje 191 stron, w tym: trzy strony spisu treści, dwie strony wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz dwie strony spisu bibliografii zawierającego 24 pozycje. Rozprawa nie zawiera streszczenia po polsku i po angielsku.

Praca została podzielona na cztery rozdziały oraz podsumowanie. Praca obejmuje zagadnienia modelowania właściwości dynamicznych lotniczej bomby kierowanej, posiadającej laserowy układ korekcji zabudowany w obudowie typu fluger. Temat pracy jest aktualny i ściśle związany z badaniami prowadzonymi w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych, który w ramach konkursu nr 8/2016 finansowanego przez NCBiR podjął się opracowania demonstratora technologii ćwiczebnej bomby lotniczej wyposażonej w bierny laserowy układ korekcji.

Podstawowym celem rozważań Doktoranta była identyfikacja czynników wpływających na dynamikę ruchu układu bomba-fluger. Doktorant wykorzystując model matematyczny ruchu układu bomba-fluger oraz oprogramowanie opracowane w ITWL, przeprowadził szereg badań symulacyjnych zrzutu badanego układu w różnych wariantach konstrukcyjnych. Na ich podstawie dokonał oceny dynamiki układu bomba-fluger i zaproponował rozwiązanie optymalne, posiadające najlepszą stateczność dynamiczną. Wyniki przeprowadzonych przez Doktoranta analiz wykorzystane zostały przy konstruowaniu demonstratora technologii ćwiczebnej bomby kierowanej LBĆw-10K, w układzie bomba-fluger. Praca ma charakter teoretyczno-symulacyjnych z potencjałem aplikacyjnym.

*Rozdział 1* stanowi wstęp rozprawy. Doktorant krótko przedstawił uzasadnienie podjęcia tematyki pracy. Sformułował następującą tezę pracy: *znajomość cech dynamicznych układu bomba-fluger jest warunkiem koniecznym do zaprojektowania skutecznego, biernego laserowego układu korekcji*. Następnie określił cel naukowy pracy, którym jest *identyfikacja czynników wpływających na dynamikę ruchu rozpatrywanego układu dynamicznego bomba-fluger*. Ponadto określił cel użyteczny rozprawy jako *opracowanie narzędzia umożliwiającego weryfikację pod względem aerodynamicznym projektowanych zespołów detekcji promieniowania zabudowanych w obudowach typu "fluger" oraz ocena ich wpływu na bombę*. Uważam, że teza pracy jest zbyt oczywista. Lepszym rozwiązaniem byłoby określenie

problemu badawczego. Następnie Doktorant dokonał krótkiego przeglądu literatury przedmiotu. Zwrócił uwagę, że naukowe opracowania dotyczące bomb kierowanych nie stanowią szerokiego działu i mają głównie charakter opisowy. Poszukując literaturę zagraniczną trafił na literaturę rosyjską a źródła zachodnie nie są ogólnodostępne. Rozdział pierwszy kończy syntetyczny opis zawartości pracy.

W *Rozdziale 2* zawarto przegląd istniejących rozwiązań konstrukcyjnych bomb lotniczych. Dokonano ich podziału uwzględniając zakres użycia i przeznaczenie oraz zdolność do wymuszonej zmiany toru lotu i rozwiązania konstrukcyjne służące do wymuszenia tej zmiany. Ponadto krótko przedstawiono ogólne zasady użycia bomb niekierowanych i kierowanych wyposażonych w półaktywny laserowy układ korekcji oraz budowę głowicy naprowadzającej zespołem detekcji odbitego, rozproszonego promieniowania laserowego, zabudowanej w obudowie typu fluger.

*Rozdział 3* przedstawia model matematyczny ruchu układu bomba-fluger wykorzystujący opis zawarty w pracy [11]. Bombę z flugerelem przyjęto jako układ dwóch ciał sztywnych, które są ze sobą połączone za pomocą przegubu dwuosowego umożliwiającego swobodny obrót jednemu z ciał wokół dwóch osi prostopadłych do jego osi podłużnej względem drugiego. Pominięto krzywiznę oraz ruch wirowy Ziemi. Zdefiniowano układy współrzędnych wykorzystywane do opisu ruchu układu bomba-fluger w przestrzeni oraz macierze przejścia między układami. Przedstawiono kinematykę i równania ruchu postępowego układu bomba-fluger, równania ruchu obrotowego bomby i flugera oraz uzupełniające związki kinematyczne. Ponadto zdefiniowano siły i momenty działające na badany układ.

*Rozdział 4* stanowi istotę rozprawy i obejmuje 131 stron. Zawiera wyniki ogromnej liczby przeprowadzonych badań symulacyjnych zrzutów bomby dla różnych wariantów konstrukcyjnych układu bomba-fluger.

Na wstępie biorąc pod uwagę założenia taktyczno-techniczne na lotniczą bombę ćwiczebną LBĆw-10K sformułowano założenia konstrukcyjne i w programie INVENTOR, opracowano trójwymiarowy model bomby. Model ten wykorzystano w oprogramowaniu PRODAS do wyznaczenia charakterystyk aerodynamicznych. Następnie opracowano rzeczywisty model bomby i poddano go badaniu w tunelu aerodynamicznym. Uzyskane w obu badaniach współczynniki aerodynamiczne przedstawiono na wykresach w funkcji kąta nutacji i liczby Macha. Kolejno, na podstawie modelu matematycznego, wykorzystując uzyskane współczynniki aerodynamiczne opracowano program symulacyjny.

W celu sprawdzenia stabilności lotu bomby z flugerym, Doktorant przeprowadził symulacje zrzutów bomby w określonych warunkach. Jako kluczowe parametry, których zmiana może potencjalnie mieć wpływ na stabilność układu bomba-flugery Doktorant zdefiniował następujące trzy parametry:

- odległość  $L_M$  pomiędzy środkiem masy bomby a punktem mocowania flugera na bombie (odcinek),
- odległość  $L_F$  pomiędzy środkiem ciężkości flugera a punktem jego zamocowania (odcinek),
- odległość  $L_A$  pomiędzy ogniskiem aerodynamicznym flugera a punktem jego zamocowania.

W związku z tym Doktorant przeprowadził badania symulacyjne w trzech etapach:

- 1) badania symulacyjne wpływu położenia ogniska aerodynamicznego flugera. Analizie poddano trzy położenia ogniska aerodynamicznego  $L_A=0,5,50$  [mm].
- 2) badania symulacyjne wpływu odległości punktu mocowania flugera od środka ciężkości bomby. Do badania wytypowano trzy warianty odległości  $L_M=300,400,500$  [mm].
- 3) badania symulacyjne wpływu położenia środka masy flugera. Analizie poddano trzy wersje położenia środka masy flugera  $L_F=-50,0,50$  [mm].

Symulacje dotyczyły zrzutu bomby w locie nurkowym, poziomym oraz wznoszącym. Dodatkowo przyjęto, że bomba jest zawieszona w układzie X i jej początkowy kąt przechylenia wynosi 45 stopni i nie występuje początkowe odchylenie. Prędkość początkowa bomby podczas zrzutu wynosiła 55 [m/s] a wysokość z jakiej zrzucono bombę 3000 [m]. Odległości punktu mocowania flugera od środka ciężkości bomby dla etapów 1 i 3 badań wynosiła  $L_M=400$  [mm].

Doktorant na wykresach przedstawił przebiegi odpowiednio dla:

- prędkości postępowej bomby,
- prędkości pochylenia bomby  $Q$ ,
- prędkości pochylenia flugera względem bomby  $q_f$ ,
- kąta pochylenia bomby,
- kąta pochylenia flugera względem bomby,
- kąta nutacji,
- trajektorii lotu bomby

Doktorant każdy z otrzymanych wykresów omówił i każdy etap badań zakończył wnioskami.



Ponadto mając na uwadze przyszłe zastosowanie badanej bomby Doktorant przeprowadził kolejne dwa etapy badań. Etap czwarty dotyczy badania wpływu prędkości zrzutu na parametry lotu układu bomba-flugler. Natomiast etap piąty badań dotyczył weryfikacji wpływu początkowej wartości kąta pochylenia flugera względem bomby na prawidłowe działanie całego układu. Analizie poddano bombę, której charakterystyki geometryczne testowane w poprzednich badaniach zapewniały najlepszą stabilizację układu. Przyjęto, że:

- ognisko aerodynamiczne flugera znajduje się 50 [mm] za punktem jego zamocowania na bombie,
- środek ciężkości flugera znajduje się w punkcie jego mocowania na bombie,
- odległość punktu mocowania flugera od środka ciężkości bomby jest równa 400 [mm].
- bomba wisi na podwieszeniu w układzie X i jej początkowy kąt przechylenia wynosi 45 stopni i nie występuje początkowe odchylenie od osi podłużnej.

Analizowano zrzut z wysokości 3000 [m] w locie nurkowym, poziomym oraz wznoszącym. W etapie czwartym symulacje przeprowadzono dla trzech różnych wartości prędkości początkowej zrzutu: 55, 180 i 250 [m/s], a w etapie piątym dla trzech różnych początkowych wartości kąta pochylenia flugera względem bomby: -10, 0 i 10 [deg]. Doktorant podał wyniki badań dla parametrów lotu jak w etapach 1-3. Przedstawione wykresy omówił i etapy badań zakończył wnioskami

Kończąc rozdział 4 Doktorant przedstawił wyniki oceny zachowania flugera w trakcie zrzutu bomby. Jako najbardziej miarodajny przyjął przebieg prędkości kątowej pochylenia. Prędkość ta dla flugera statecznego dynamicznie powinna zanikać do zera. Przebiegi prędkości kątowej pochylenia flugera są superpozycją ruchów długo i krótkookresowych. Doktorant wykorzystując dodatek optymalizacyjny SOLVER arkusza kalkulacyjnego EXCEL wyznaczył parametry ruchu długo i krótkookresowego dla uzyskanych we wcześniejszych badaniach symulacyjnych prędkości pochylenia flugera.

Obliczenia przeprowadził dla trzech wariantów:

- 1) wpływ położenia ogniska aerodynamicznego na parametry ruchu harmonicznego. Analizie poddano dziewięć położen ogniska aerodynamicznego  $L_A=10\div 50$  [mm] za punktem zamocowania flugera na bombie.
- 2) wpływ położenia środka ciężkości flugera. Analizie poddano jedenaście położen środka ciężkości, od położenia wynoszącego 50 [mm] przed punktem zamocowania flugera do 50 [mm] za punktem zamocowania.

3) wpływ odległości punktu mocowania flugera na bombie od środka ciężkości bomby.

Analizie poddano cztery odległości  $L_M=300, 350, 400$  i  $450$  [mm].

Przyjął, że prędkość początkowa bomby podczas zrzutu wynosiła  $55$  [m/s], wysokość z jakiej zrzucono bombę  $3000$  [m] a początkowy kąt zrzutu  $0$  stopni. Wyniki obliczeń parametrów ruchów harmonicznym Doktorant przedstawił w postaci tabelarycznej i na wykresach. Wykresy omówił i wyciągnął stosowne wnioski. . Uważam ten sposób przedstawienia wyników analiz za właściwy.

Rozprawę kończy *Podsumowanie* i *spis literatury*.

Najważniejszym wnioskiem wypływającym z realizacji pracy jest to, że fluger jest kluczowym zespołem bomby kierowanej, którego budowa oraz właściwości aerodynamiczne mają wpływ na stabilność lotu całej bomby. Prawidłowe zaprojektowanie tego urządzenia, polegające na poprawnym rozłożeniu masy i zapewnienie właściwego położenia ogniska aerodynamicznego, jest niezbędne do zamierzonego działania całego układu bomba-fluger. Z kolei stabilny lot bomby przekłada się na prawidłowy odbiór sygnału podświetlenia celu. Wyniki przedstawionych w rozprawie analiz wykorzystane zostały przy zaprojektowaniu demonstratora technologii bomby kierowanej LBCw-10K. Badania w locie bomby LBCw-10K potwierdziły poprawność zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego układu bomba-fluger. Cel pracy został zatem osiągnięty a zakres pracy zrealizowany.

Wykaz literatury obejmuje tylko 24 pozycje, w tym jedno sprawozdanie z 2016 roku w którym Doktorant jest współautorem. Szkoda, że Doktorant nie powołuje się na swoje artykuły naukowe.

### 3. Ogólna ocena rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej pt. „*Badania dynamiki układu bomba-fluger*” koncentruje się wokół zagadnień związanych z opracowanym w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych demonstratorem technologii ćwiczebnej bomby kierowanej. Doktorant podjął się zadania zidentyfikowania czynników wpływających na dynamikę ruchu układu dynamicznego bomba-fluger.

Układ i struktura rozprawy są poprawne. Przedstawione jest uzasadnienie podjęcia tematu, krótki przegląd literatury przedmiotu oraz cel pracy (w tym cel naukowy i użyteczny). Jak już wcześniej wspomniałam teza wydaje się oczywista. Lepszym rozwiązaniem byłoby określenie problemu badawczego. Praca zawiera część teoretyczną, w której sformułowano na podstawie literatury (pozycja 11) model matematyczny dynamiki lotu układu bomba-fluger oraz część praktyczną, w której przeprowadzono szereg badań numerycznych. Wyniki pracy

prezentowane są w sposób przejrzysty, w postaci przede wszystkim graficznej, ale także i tabelarycznej. Rozprawę kończy zwięzłe podsumowanie rozprawy i wyników przeprowadzonych analiz.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- zidentyfikowanie czynników wpływających na dynamikę układu bomba-fluger,
- dokonanie oceny dynamiki ruchu układu bomba-fluger,
- dobór rozwiązania konstrukcyjnego zapewniającego najlepszą stateczność dynamiczną.

Doktorant wykazał się wiedzą z zakresu dynamiki lotu układu bomba-fluger, modelowania oraz opracowania wyników badań. Należy zwrócić uwagę, że przedstawione w pracy wyniki badań wymagały dużego nakładu pracy i czasu. Tematyka pracy dotyczy istotnego zagadnienia badawczego. Prowadzone przez Doktoranta badania i analizy zostały wykorzystane przy zaprojektowaniu demonstratora technologii ćwiczebnej bomby kierowanej. Podsumowując, całość rozprawy oceniam pozytywnie.

#### **Uwagi szczegółowe**

Do najważniejszych uwag szczegółowych zaliczam następujące:

1. Rozprawa zredagowana jest dosyć starannie. Opracowania graficzne są dobre.
2. Występują nieliczne błędy stylistyczne np. str. 17 „...dynamiczny rozwój urządzeń wykorzystujących z technikę laserową”, str. 55 „...: równanie ruchu całego,” błędy gramatyczne np. brak przecinków przed „że” czy „aby” oraz tzw. „literówki” np. str. 13 „Bomy” powinno być „Bomby”, str. 61 „kata nutacji” powinno być „kąta nutacji”.
3. W tekstach technicznych lepszym sformułowaniem od „stworzono” jest chociażby „opracowano”. Na str. 106 pojawia się stwierdzenie, że do dalszych badań przyjęto rozwiązanie najbardziej optymalne konstrukcyjnie. Optymalny już oznacza najlepszy z możliwych.
4. Uważam za niewłaściwe brak powołania się na źródło przy rysunkach.
5. Rysunki 2-14 oraz 2-21 do 2-23 są słabej jakości.
6. Brakuje opisu dla rysunku 2-15.
7. Autor w rozdziale 3 zdefiniował wektory określające położenie punktu F i M jako  $\mathbf{l}_F$  i  $\mathbf{l}_M$  a we wzorach używa raz z indeksami M i F a raz  $m$  i  $f$ . Również później na wykresach w rozdziale 4 używa raz małych, raz wielkich oznaczeń. Proszę o wyjaśnienie.
8. Co to jest geometryczna prędkość unoszenia?
9. Wzór 3.38 nie zawiera siły ciężkości flugera. Co oznacza  $m_g$ ?



10. Proszę sprawdzić poprawność wzoru na  $m\Omega$  i  $I_{vf}$ .
11. Uważam, że roz. 3.7 powinien być odniesiony do rozpatrywanego w pracy układu, w szczególności przytoczony rysunek.
12. Na rys. 3-2 nieprawidłowo zaznaczono wektory  $U_{aer}$ ,  $V_{aer}$  i  $W_{aer}$ .
13. Brak zależności na współczynnik  $C_{za}$ . Wzory 3.89 i 3.94 są identyczne.
14. Wzór 3.79 – dlaczego siła Magnusa jest ze znakiem minus?
15. Wzór 4.2 – Czy  $C_{x\alpha\alpha^4}$  przyjęto równe zero?
16. Czy badania w tunelu aerodynamicznym wykonywane były przez Doktoranta?
17. Na rysunkach 4-6, 4-8 do 4-10 występują błędy w opisach osi.
18. Doktorant wielokrotnie używa sformułowania, że prędkość nie osiągnęła wartości ustalonej. Jaka to wartość?
19. Wg jakiej zależności wyznaczany był kąt nutacji całego układu?
20. Czy Doktorant analizował w trakcie badań symulacyjnych przebiegi prędkości i kąta odchylenia bomby i flugera względem bomby?
21. W jakim środowisku opracowany był program do symulacji lotu układu bomba-fluger? Jakiej metody i kroku użyto do całkowania równań ruchu? Jaki wpływ miał przyjęty krok całkowania na uzyskane wyniki?
22. Jakie były przesłanki, aby analizować tak założone (po trzy) wartości położenia ogniska aerodynamicznego flugera, wartości odległości pomiędzy punktami M i B, wartości położenia środka masy flugera oraz wartości prędkości? Dlaczego analiza dla kąta pochylenia flugera względem bomby prowadzona była dla prędkości wynoszącej 55 m/s skoro wcześniejsze badania wykazały, że nie jest ona najkorzystniejsza?
23. Na str. 106 Autor stwierdza, że wpływ odległości punktu mocowania flugera od środka masy bomby jest niewielki dla badanych stanów lotu i wszystkie warianty konstrukcji są poprawne. Skąd zatem wniosek, że najlepsze jest rozwiązanie dla  $L_M=400$  mm?
24. Dlaczego przebiegi pokazane na rys. 4-142 i 4-143 oraz analogiczne w dalszej części rozprawy nie zaczynają się od zadanych wartości początkowych?
25. Dla jakiego przypadku pokazano dopasowanie na rys. 4-170 i 4-171?
26. W jaki sposób przyjmowano wstępne wartości współczynników ruchu harmonicznego?
27. Czy były weryfikowane dane uzyskane z Solvera?
28. Doktorant nie powołuje się na pozycje 21-24 literatury.

Powyższe uwagi nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Praca ma charakter teoretyczno-symulacyjny z potencjałem aplikacyjnym. Doktorant podjął się rozwiązania



aktualnego problemu badawczego oraz wykazał się wiedzą z zakresu dynamiki obiektów latających i prowadzenia badań numerycznych. Cel naukowy i użyteczny pracy został osiągnięty.

#### 4. Ocena końcowa rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Klemby dotyczy aktualnego zagadnienia badawczego związanego z dynamiką bomby kierowanej, wyposażonej w bierny laserowy układ korekcji lotu. Analiza wyników badań numerycznych została przeprowadzona prawidłowo. Sformułowany cel pracy został osiągnięty. Praca świadczy o odpowiednim przygotowaniu merytorycznym Autora. Doktorant wykazał się stosowną wiedzą i umiejętnościami prowadzenia badań naukowych i interpretacji wyników. Problematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Klemby pt. „*Badania dynamiki układu bomba-fluger*” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i **wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony**.



