

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski  
krzysztof.sibilski@itwl.pl  
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych  
ul. Księcia Bolesława 6  
01-490 Warszawa

Warszawa, 21-09-2023

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej opracowanej przez Pana mgr inż. Macieja Nyckowskiego

nt.:

### MODELOWANIE I BADANIE DYNAMICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI WYRZUTNI Z NIESTEROWANYMI POCISKAMI RAKIETOWYMI NA PRZYKŁADZIE MODUŁU UZBROJENIA ZSMU-70

*wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Świętokrzyskiej*

#### OCENA STRONY METODYCZNEJ

##### 1. Układ rozprawy

Rozprawa doktorska wydana została w formie książki obejmującej 201 stron wydruku w formacie B5. Praca jest podzielona na 6 rozdziałów oraz liczącego 3 strony Dodatku. Zawiera 131 rysunków oraz 13 tabel. Bibliografię (Piśmiennictwo) stanowią 134 pozycje o znaczeniu poznawczym i technicznym, obejmujących materiał badawczy rozprawy.

Celem pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Nyckowskiego było opracowanie wytycznych zmierzających do takiego kształtowania właściwości dynamicznych wyrzutni, aby moduł uzbrojenia ZSMU-70 skutecznie realizował swoje zadania. W ramach realizacji tego celu, Doktorant zrealizował badania eksperymentalne modułu ZSMU-70 na poligonie wojskowym, opracował modele matematyczne

wyrzutni WW-4 oraz przeprowadził badania symulacyjne modułu. W ramach prac, na poligonie przeprowadzono strzelania niesterowanym pociskiem raketowym typu NLPR-70. Proces zejścia rakiety z wyrzutni został zarejestrowany szybką kamerą cyfrową, a zarejestrowane obrazy Doktorant przeanalizował przy pomocy specjalistycznego oprogramowania. Wyniki przeprowadzonych badań doprowadziły Doktoranta do wniosku, że w celu zwiększenia skuteczności modułu ZSMU-70 należy dokonać korekty charakterystyki dynamicznej wyrzutni WW-4. Na podstawie estymacji parametrów opracowanych modeli Doktorant przeprowadził analizę modalną układu oraz wyznaczył podstawowe charakterystyki dynamiczne modułu ZSMU-70, i wyrzutni WW-4. Następnie przeprowadził symulację ruchu układu podczas wystrzeliwania pocisków raketowych. W wyniku tych symulacji Kandydat otrzymał przebiegi zmienności w czasie wielkości kinematycznych charakteryzujących ruch modelu wyrzutni. Porównanie wyników uzyskanych z analizy teoretycznej z wynikami z otrzymanymi na podstawie badań na poligonie pozwoliło Doktorantowi na walidację opracowanego przez siebie modelu matematycznego modułu ZSMU-70 oraz wyrzutni WW-4. Pozwoliło to Doktorantowi na stwierdzenie, że w warunkach przestrzeni wirtualnej wyrzutnia zachowuje się podobnie, jak obiekt rzeczywisty. Dzięki symulacjom przeprowadzonym za pomocą zweryfikowanego modelu modułu ZSMU-70 oraz wyrzutni WW-4 Kandydat zaproponował zmiany parametrów układu i przedstawił wytyczne umożliwiające poprawę skuteczności modułu uzbrojenia ZSMU-70. Uważam, że w ten sposób cel pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Nyckowskiego został zrealizowany.

Reasumując uważam, że opracowanie mgr inż. Macieja Nyckowskiego jest oryginalne i wnosi wartościowe elementy w nurt badań w dziedzinie dynamiki złożonych układów mechanicznych, a w szczególności systemów uzbrojenia raketowego.

Przyjmując, że rozdziały od 3 do 5 (łącznie 144 strony) stanowią zasadniczą część rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że proporcje pomiędzy jej częściami merytorycznymi są prawidłowe. Treść pracy nawiązuje w sposób właściwy do jej tytułu, a nazwy rozdziałów przedstawiają spójną całość, dając syntetyczny pogląd na rozważaną treść.

## **2. Metoda opracowania**

Ze względów metodycznych całość rozprawy można podzielić na:

**Część metodologiczną**, obejmującą rozdziały 1 i 2 (30 stron), w której Autor przedstawił genezę podjętych badań, ocenił stan wiedzy dotyczący zakresu merytorycznego rozprawy, określił przedmiot, zakres, cele i zarys metodyki przeprowadzonych badań.

Celem pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Nyckowskiego było opracowanie wytycznych zmierzających do poprawy właściwości dynamicznych modułu uzbrojenia *ZSMU-70* oraz wyrzutni *WW-4*.

Realizując cel swojej pracy Doktorant zrealizował następujące zadania:

- Podczas zrealizowanych na poligonie w Nowej Dębie serii strzelań niesterowanych pocisków raketowych *NLPR-70*, wykonał za pomocą szybkiej kamery serie zdjęć obrazujących moment zejścia pocisku z zamontowana na opancerzonym pojeździe samochodowym *TUR- 2* wyrzutni *WW-4*, oraz przeprowadził analizę zarejestrowanych w ten sposób obrazów za pomocą specjalistycznego oprogramowania *TEMA Motion* firmy *Image Systems*.
- Wyznaczył przebiegi zmienności w czasie wielkości kinematycznych charakteryzujące ruch poszczególnych obiektów zestawu.
- Oceniał wpływ uruchomienia silnika raketowego, ruch pocisku w prowadnicy oraz zmianę masy wynikającą z opuszczenia wyrzutni przez pocisk raketowy na zachowanie się układu.
- Określił charakterystykę początkowych parametrów lotu niesterowanych pocisków raketowych *NLPR-70*.
- Oceniał wpływ oddziaływania gazów emitowanych przez silnik raketowy na wyrzutnię.
- 1.5.Wyznaczył trajektorię pierwszej fazy lotu każdej ze startujących rakiet.
- Sformułował model fizyczny i matematyczny ruchu modułu uzbrojenia *ZSMU- 70*, który w warunkach przestrzeni wirtualnej zachowa się jak obiekt rzeczywisty.
- Wykonał estymację parametrów opracowanego modelu.
- Porównał przebiegi zmienności w czasie wielkości kinematycznych charakteryzujących ruch poszczególnych obiektów modelu i rzeczywistego modułu uzbrojenia *ZSMU-70* oraz oszacował wynikające z tego porównania błędy.
- Przeprowadził analizę dynamiki modelu zestawu z wyznaczeniem podstawowych charakterystyk wynikających z rozważań modalnych.
- Poprawił własności dynamiczne analizowanego układu poprzez wprowadzenie korekty parametrów charakteryzujących zestaw *ZSMU-70*.
- Opracował model pierwszej fazy lotu rakiety niesterowanej i po uwzględnieniu warunków początkowych oszacował możliwy rozrzut wystrzelonych po sobie pocisków.
- Sprawdził skuteczność zastosowania pasywnej oraz aktywnej wibroizolacji wieży wyrzutni.

- Opracował wytyczne zmierzające do takiego kształtowania charakterystyki dynamicznej układu, aby zminimalizować czas skutecznego wystrzelenia kolejnych pocisków rakietowych.
- Opracował kilka modeli badanego modułu uzbrojenia oraz przeprowadził szereg symulacji, które pozwoliły Doktorantowi na sformułowanie propozycji zmian w konstrukcji modułu *ZSMU-70*, prowadzących do poprawy jego skuteczności.

Na podstawie powyższego stwierdzam, że Doktorant podjął się opracowania schematu działań prowadzących do opracowania wytycznych zmierzających do poprawy właściwości dynamicznych modułu uzbrojenia *ZSMU-70* oraz wyrzutni *WW-4*. Uważam, że mgr inż. Maciej Nyckowski taką metodykę opracował.

**Część doświadczalną i teoretyczno – obliczeniową** obejmującą rozdziały od 3 do 5 (143 strony), w której Doktorant opisał opracowane przez siebie badania eksperymentalne, modele matematyczne i symulacje numeryczne modułu *ZSMU-70*, i wyrzutni *WW-4*.

Badania empiryczne modułu uzbrojenia *ZSMU-70* zostały opisane w rozdziale 3. Doktorant w rozdziale tym przedstawił metodykę badań prowadzących do rozpoznania zjawisk, oraz wyjaśnienia, w jakim stopniu zjawiska te wpływają na rozrzut pocisków rakietowych *NLPR-70* wystrzeliwanych z modułu *ZSMU-70*. W trakcie wystrzelenia ruch pocisku był filmowany szybką kamerą, a zarejestrowane filmy zostały poddane wstępnej analizie. W rezultacie Doktorant otrzymał charakterystyki określające przebiegi zmienności w czasie wielkości kinematycznych charakteryzujących ruch wyrzutni. Charakterystyki te pozwoliły na estymację ruchu wyrzutni w trakcie wystrzeliwania pocisków rakietowych. W rozdziale 3 Doktorant przedstawił także parametry geometryczne, masowe i bezwładnościowe niezbędne do zbudowania modelu matematycznego i symulacji komputerowych modułu uzbrojenia *ZSMU-70*, wyrzutni *WW-4* oraz pocisku *NLPR-70*.

Modele modułu uzbrojenia *ZSMU-70* zostały przedstawione w rozdziale 4. Na podstawie rzeczywistego obiektu badań - modułu uzbrojenia *ZSMU-70*, Doktorant, w tym rozdziale, przedstawił opracowane przez siebie dyskretne modele fizyczne i matematyczne zestawu artylerii rakietowej. Przedstawione w rozdziale 4 modele są o różnym stopniu złożoności i liczbie stopni swobody. Złożoność poszczególnych modeli fizycznych była wynikiem: kolejnych modyfikacji uzyskanych podczas postępów realizacji pracy doktorskiej; oraz doboru odpowiedniego modelu fizycznego i matematycznego do rodzaju przeprowadzanej analizy. Opierając się na sformułowanych modelach, Doktorant wyróżnił dwa zasadnicze obiekty: opancerzony pojazd samochodowy *TUR-2*, oraz wyrzutnia *WW-4*

z modułem uzbrojenia ZSMU-70. W rozdziale 4 Doktorant przedstawił analizę modalną tych modeli, oraz propozycję zmian w konstrukcji tych obiektów zmierzających do poprawy charakterystyk dynamicznych całego zestawu.

W rozdziale 5 Doktorant szczegółowo opisał model wyrzutni WW-4 wraz z prowadnicą oraz pociskami raketowymi NLPR-70. W rozdziale tym przedstawiony został także model układu wibroizolacji hybrydowej oraz sterowania drganiami platformy wyrzutni niesterowanych pocisków rakietowych. W oparciu o modele fizyczne Kandydat wyprowadził równania ruchu zestawu jako wieloczołowego układu dynamicznego i przeprowadził szereg symulacji dokumentujących wpływ parametrów układu na ruch rakiety, oraz celność strzałów.

Całość pracy kończy rozdział 6 zatytułowany Podsumowanie, w którym Doktorant odniósł się do własnych dokonań naukowych, porównał wyniki symulacji numerycznych z rezultatami badań eksperymentalnych, formułując wnioski wraz z krytyczną analizą wyników oraz wskazał kierunki dalszych badań.

Reasumując stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, jak i głębi prowadzonych rozważań, analiz, obliczeń i badań poligonowych rzeczywistego układu. Z punktu widzenia określonych celów, przyjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane narzędzia i metody badawcze są do niej adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał badawczy, jak i literaturowy został przez Autora rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta np. w poznanie technik analizy zdjęć poklatkowych wykonanych na poligonie w trakcie strzelań, oraz budowy modeli matematycznych złożonych układów dynamicznych.

### **3. Metoda wykładu**

Praca jest ilustrowana 131 rysunkami, wykonanymi czytelnie i jednoznacznie oraz logicznie wplecionymi w treść wykładu. Ułatwia to zrozumienie prezentowanych przez Autora rozważań. Treści poszczególnych rozdziałów właściwie wynikają po sobie, tworząc spójną całość.

Reasumując stwierdzam, że pod względem metodycznym praca zawiera następujące:

#### **A. Niedociągnięcia**

Zasadniczo nie dostrzegłem większych niedociągnięć pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Nycowskiego. Doktorant nie ustrzegł się drobnych pomyłek tzw. „literówek”. Pewnym mankamentem

jest także brak tezy rozprawy doktorskiej. Zdaję sobie sprawę, że w przypadku rozpraw dotyczących problemów związanych z istotnym ulepszaniem cech użytkowych konkretnych rozwiązań technicznych sformułowanie nietrywialnej tezy nie jest zadaniem prostym, a czasem nawet niemożliwym do zrealizowania. Doktorant zatem sformułował szereg istotnych celów swojej pracy, starając się w ten sposób uniknąć konieczności podania tezy. Takie rozwiązanie może zostać zaakceptowane.

Mam także pewne uwagi do strony redakcyjnej pracy. Doktorant wydał rozprawę w formie książki, ale forma graficzna tytułów rozdziałów i podrozdziałów jest charakterystyczna dla sprawozdań. Być może taka forma graficzna wynikała z „odgórnych” wymagań oficyny wydawniczej Politechniki Świętokrzyskiej.

Ponadto uważam, że każdy z rozdziałów powinien kończyć się krótkim podsumowaniem, w którym Doktorant w skrótowy oraz skondensowany odniósł by się do najistotniejszych rezultatów przedstawionych w tym rozdziale badań.

### **B. Zalety**

- Obszerny zakres problemowy pracy dający pogląd na ważność podjętej tematyki, oraz dogłębne studium przedmiotu pracy zawarte w rozdziałach 1 oraz 2.
- Opracowanie oryginalnej metodyki modelowania złożonych układów dynamicznych wyrzutni niekierowanych pocisków raketowych oraz weryfikacji tych modeli na podstawie badań rzeczywistego obiektu podczas strzelań na poligonie.
- Opracowanie szeregu modeli matematycznych wyrzutni o różnym stopniu złożoności umożliwiając w ten sposób łatwą ich weryfikację.
- Opracowanie programów komputerowych przeznaczonych do obliczeń symulacyjnych działania wyrzutni jako złożonego, wielocłonowego obiektu dynamicznego, oraz analizy wpływu dynamiki wyrzutni na celność niekierowanego pocisku raketowego.
- Przedstawienie i analiza wyników symulacji numerycznych oraz sformułowanie wytycznych do modernizacji wyrzutni prowadzącej do zwiększenia celności pocisków.

Należy podkreślić, że przeprowadzone przez mgr inż., Macieja Nyckowskiego badania, obliczenia i analizy stanowią zarazem genezę pracy, a także uwypuklają nowe elementy opracowanego przez Doktoranta innowacyjnego rozwiązania w postaci metodyki badania złożonych obiektów dynamicznych, na przykładzie raketowego zestawu artyleryjskiego.

## OCENA STRONY MERYTORYCZNEJ

Zasadniczym przedmiotem pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Nyckowskiego było opracowanie metodyki analizy wyników badań eksperymentalnych oraz formułowania modeli fizycznych i matematycznych zestawu wyrzutni niekierowanych pocisków raketowych. Na podstawie zweryfikowanych eksperymentalnie modeli matematycznych Kandydat opracował skrypty komputerowe przeznaczone do symulacji numerycznych ruchu wyrzutni oraz rakiety. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacji komputerowych pozwoliły Doktorantowi na sformułowanie wniosków dotyczących poprawy charakterystyk dynamicznych modułu wyrzutni niekierowanych pocisków raketowych, poprawiających celność wystrzeliwanych z tej wyrzutni rakiet. Należy podkreślić, że opracowane przez Doktoranta modele mogą zostać implementowane do dowolnej konstrukcji o zmienionych parametrach.

Po zapoznaniu się z treścią pracy chciałbym podjąć polemikę z Autorem nad zaprezentowanymi przez niego wybranymi rozważaniami i opiniami. I tak:

- Uważam, że celowe byłoby przeprowadzenie badań wyężenia materiału struktury kluczowych elementów wyrzutni.
- Krytycznie należy odnieść się również do wyników symulacji określających celności pocisku, przeprowadzonych w warunkach bezwietrznej atmosfery, czyli bez uwzględnienia wpływu wiatru na lot pocisku. Chciałbym by Doktorant odniósł się do problemu wpływu turbulencji atmosfery na celność niekierowanej rakiety. Czy istnieje możliwość uwzględnienia wpływu wiatru i turbulencji atmosferycznej na celność niekierowanych rakiet.
- Chciałbym, by Doktorant odniósł się do problemu wpływu charakterystyk dynamicznych wyrzutni na lot pocisków kierowanych. W jakich warunkach stresowanie rakiet niekierowanych jest celowe na współczesnym polu walki. Czy Doktorant mógłby się odnieść do tego problemu w świetle doświadczeń płynących z pełnoskalowej wojny na Ukrainie.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiona do recenzji praca jest ciekawa i nowatorska. Autor wykazał się orientacją w badanej problematyce. Potrafił wyodrębnić najistotniejsze problemy badawcze oraz określić sposoby i metody adekwatne do ich rozwiązania.

Uważam, że osiągnięciami Doktoranta są:

- Wyznaczenie przebiegów parametrów kinematycznych charakteryzujących ruch wyrzutni w trakcie wystrzeliwania pocisku na podstawie analizy obrazów zarejestrowanych szybko kamerą.
- Ocena wpływu uruchomienia silnika raketowego oraz ruchu pocisku w prowadnicy i zmiany masy wynikającej z opuszczenia wyrzutni przez pocisk raketowy na zachowanie się wyrzutni.
- Ocena wpływu oddziaływania gazów emitowanych przez silnik raketowy na wyrzutnię.
- Określenie początkowych parametrów kinematycznych lotu rakiety oraz wyznaczenie trajektorii pierwszej fazy lotu niesterowanych pocisków raketowych na podstawie analizy zdjęć wykonanych szybko kamerą.
- Sformułowanie modeli fizycznych i matematycznych ruchu modułu uzbrojenia, w tym:
  - estymacja parametrów opracowanych modeli,
  - przeprowadzenie analiz dynamiki trzech modeli zestawu wyposażonego w wyrzutnię pocisków raketowych i wyznaczenie podstawowych charakterystyk wynikających z rozważań modalnych,
  - opracowanie modelu pierwszej fazy lotu rakiety niesterowanej,
  - oszacowanie rozrzutu wystrzelonych po sobie pocisków,
  - opracowanie aktywnej wibroizolacji wieży wyrzutni.

Bez wątpienia praca doktorska została wykonana samodzielnie i wnosi wkład w rozwój badań nad problemami dynamiki złożonych systemów wyrzutni rakiet traktowanych jako wielocłonowego układu dynamicznego. Wiedza zdobyta na podstawie analiz wyników uzyskanych z przeprowadzonych przez Doktoranta eksperymentów pozwoliła na weryfikację modeli fizycznych i matematycznych wyrzutni niekierowanych pocisków raketowych. Opracowane na podstawie modeli matematycznych programy obliczeniowe pozwalają na symulację dynamiki wyrzutni w trakcie strzelania pociskami raketowymi oraz zaproponowanie zmian charakterystyk dynamicznych wyrzutni, a w konsekwencji poprawę celności artyleryjskich systemów rakiet niekierowanych.

## **WNIOSEK KOŃCOWY**

Reasumując uważam, że recenzowana rozprawa została poprawnie skonstruowana pod względem merytorycznym i językowym. Uwzględniając osiągnięte wyniki badań, rozprawę



doktorska oceniam bardzo wysoko. Zawartość rozprawy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam zatem, że praca doktorska mgr. inż. Macieja Nyckowskiego pt. „*Modelowanie i Badanie Dynamicznych Właściwości Wyrzutni Z Niesterowanymi Pociskami Rakietowymi Na Przykładzie Modułu Uzbrojenia ZSMU-70*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz.U. nr. 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



.....

prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski