

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Anny SIBILSKIEJ-MROZIEWICZ  
pt.: „OPRACOWANIE MODELU DYNAMIKI WYRZUTNI SAMOLOTU  
BEZZAŁOGOWEGO, Z WYKORZYSTANIEM EFEKTU MEISSNERA”**

wykonanej  
w Politechnice Warszawskiej na Wydziale Mechatroniki  
pod kierownictwem  
dr. hab. inż. Edyty ŁADYŻYŃSKIEJ-KOZDRAŚ, prof. PW

### 1. PODSTAWA WYKONANIA RECENZJI

Recenzję opracowano na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 25.09.2017r. z załączoną rozprawą doktorską mgr inż. Anny SIBILSKIEJ-MROZIEWICZ pt. „Opracowanie modelu dynamiki wyrzutni samolotu bezzałogowego z wykorzystaniem efektu Meissnera”. Promotorem rozprawy jest dr. hab. inż. Edyta ŁADYŻYŃSKA-KOZDRAŚ, prof. PW a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Krzysztof FALKOWSKI.

### 2. TREŚĆ I ZAKRES PRACY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera 218 stron. Składa się ze streszczenia, 10 ponumerowanych rozdziałów oraz bibliografii.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” zwrócono uwagę, że większość Bezzałogowych Statków Powietrznych (BSP) wymaga wykorzystania do startu wyrzutni lub katapult. Obecnie najczęściej wykorzystywane są systemy raketowe, wyrzutnie gumowe, pneumatyczne i hydrauliczne. Wadami tych systemów są duże przyspieszenia a w przypadku wyrzutni pneumatycznych i hydraulicznych problemem jest konieczność wyhamowania wózka startowego po starcie BSP. Alternatywą dla tych urządzeń są m.in. katapulty wykorzystujące oddziaływanie magnetyczne. Autorka pracy brała udział w 7 programie ramowym Unii Europejskiej w budowie i badaniach prototypu innowacyjnej wyrzutni magnetycznej, wykorzystującej pasywne zawieszenia z nadprzewodnikami. Zaobserwowane

przez Autorkę pracy problemy techniczne w trakcie realizowanych badań ujawniły konieczność opracowania modeli matematycznych i symulacyjnych umożliwiających zbadanie zjawisk zachodzących podczas ruchu lewitującego wózka startowego wyrzutni wykorzystującej pasywne zawieszenie magnetyczne.

Na tej podstawie został określony cel pracy doktorskiej, którym jest „Opracowanie modelu dynamiki oraz przeprowadzenie symulacji numerycznych procesu startu i lądowania lekkiego samolotu bezzałogowego z wózka startowego wyrzutni magnetycznej”.

Stąd użyteczny cel pracy jawi się w postaci zadań badawczych:

- opracowanie modelu matematycznego dynamiki ruchu wózka startowego oraz układu BSP-wózek w trakcie startu i lądowania samolotu z wyrzutni w oparciu o metody modelowania dynamiki ciała sztywnego oraz mechaniki lotu, a także podstawowe prawa elektromagnetyzmu i nadprzewodnictwa;
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych i numerycznych mających na celu określenie wpływu warunków początkowych układu oraz obciążeń generowanych w trakcie startu i lądowania BSP na zachowanie układu BSP-wózek startowy na torach magnetycznych.

W drugim rozdziale pracy pt. „Zawieszania lewitacyjne” opisano układy oparte o zjawisko lewitacji, omówiono podstawowe prawa elektromagnetyzmu oraz nierozłącznie związane z problemem lewitacji twierdzenie Earnshawa. Rozdział obejmuje również klasyfikację zawieszek magnetycznych.

Tematem trzeciego rozdziału pracy jest „Nadprzewodnictwo”. Zawarto w nim historię nadprzewodnictwa, teorię Londonów, Ginzburg’a-Landau’a oraz teorię BCS. Rozdział zawiera również opis kluczowych właściwości nadprzewodnictwa, w tym zaniku oporu przepływu prądu, efektu Meissnera, kwantyzacji strumienia magnetycznego oraz pułapkowania strumienia na defektach sieci krystalicznej nadprzewodnika. Na końcu rozdziału zawarto przegląd technologii, wykorzystujących materiały nadprzewodzące.

W czwartym rozdziale pracy pt. „Wyrzutnie samolotów bezzałogowych” zostały wymienione i opisane typy powszechnie stosowanych katapult samolotów bezzałogowych. W rozdziale omówiono również konstrukcję modelowanej w pracy wyrzutni.

W piątym rozdziale pracy pt. „Macierzowe równania ruchu bryły” wyprowadzono macierzową postać równań ruchu bryły sztywnej o sześciu stopniach swobody. W rozdziale omówiono formalizm zapisu wielkości wektorowych, definicję i własności dziewięcio-elementowej macierzy rotacji oraz jej pochodnej, zagadnienia rachunku tensorowego oraz reguły różniczkowania wektorów, uwzględniające kinematykę ruchu względnego. Na

podstawie notacji macierzowej i formalizmu zapisu wektorów wyprowadzone zostały równania ruchu bryły sztywnej, jako układu dwóch równań macierzowych. Osobno opisany został ruch postępowy i obrotowy bryły. Punktem wyjściowym analizy była zasada zmienności pędu i momentu pędu bryły sztywnej. Wynikowe równania ruchu bryły sztywnej opisane są w układzie współrzędnych, związanych z bryłą.

Szósty rozdział pracy pt. „Model dynamiki wózka startowego” zawiera model matematyczny układu wyrzutni, rozumianego jako konfiguracja trzech elementów: generujących pole magnetyczne torów, ruchomego wózka startowego oraz startującego samolotu. Omówiony został proces modelowania oraz założenia i uproszczenia modelu. W kolejnej części przedstawiono układy współrzędnych, związane z charakterystycznymi punktami wyrzutni, wózka startowego i samolotu. Na podstawie przedstawionej w rozdziale piątym notacji oraz przyjętych założeń i konfiguracji układów współrzędnych, wyprowadzony został model matematyczny, pod postacią macierzowych równań ruchu. Zaproponowany model matematyczny uwzględnia cztery przypadki: ruch nieobciążonego wózka startowego, swobodny lot samolotu oraz start i lądowanie BSP na wózku wyrzutni.

W siódmym rozdziale pracy pt. „Siła lewitacji” omówiono badania doświadczalne i symulacyjne, umożliwiające aproksymację wartości siły lewitacji. Rozdział zawiera omówienie eksperymentalnego pomiaru pola magnetycznego, generowanego przez pojedynczy magnes neodymowy, symulacje numeryczne, wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES) w modelowaniu pola magnetycznego ponad torami wyrzutni oraz eksperymentalne pomiary siły lewitacji działającej na pojemnik z nadprzewodnikami, umieszczony ponad środkiem torów magnetycznych.

Symulacje modelu dynamiki wózka startowego stanowią meritum ósmego rozdziału pracy. Trajektoria ruchu wózka i samolotu wyznaczona została za pomocą procedur całkowania numerycznego, dostępnych w oprogramowaniu MATLAB. W zaimplementowanym modelu numerycznym wykorzystano wyprowadzoną w poprzednich rozdziałach macierzową postać równań ruchu. W ramach badań numerycznych przeanalizowano swobodny ruch wózka, przy różnych parametrach wejściowych oraz przeprowadzono symulację dynamiki układu BSP-wózek w trakcie startu i lądowania. Analiza wyników uwzględnia wyznaczenie przyspieszeń oraz sił reakcji pomiędzy wózkiem, a samolotem. W rozdziale przedstawiono również porównanie rzeczywistych, zarejestrowanych za pomocą szybkiej kamery oraz symulowanych drgań wózka.

Rozdział dziewiąty zamyka „Podsumowanie” wyników symulacji oraz wnioski końcowe, dotyczące analizy konstrukcji modelowanej w pracy wyrzutni.

### 3. OCENA MERYTORYCZNA PRACY

Temat rozprawy doktorskiej podjęty i opracowany przez mgr. inż. Annę SIBILSKĄ-MROZIEWICZ uważam za dysertabilny i niezwykle istotny pod względem naukowym i użytecznym.

Podjęta tematyka dotyczy zagadnienia procesu modelowania i symulacji numerycznej dynamiki układu BSP-wózek startowy wyrzutni magnetycznej. Opracowany model matematyczny i numeryczny umożliwił symulację ruchu wózka startowego wyrzutni w trakcie startu i bezpiecznego lądowania na nim BSP. Wymagało to wyznaczenia i opisanie sił lewitacji magnetycznej powodującej unoszenie się wózka startowego ponad torami wyrzutni.

W opracowanym modelu założono, że układ BSP-wózek startowy w trakcie startu posiada sześć stopni swobody, natomiast w trakcie lądowania dwanaście.

Na uwagę zasługuje wyznaczenie wartości sił i momentów sił reakcji powstałych w wyniku wzajemnego oddziaływania BSP i wózka. W związku z tym podczas lądowania BSP na wózku siły reakcji uzależnione są od prędkości kątowej i liniowej BSP względem wózka. Jednym z ważnych zadań, z punktu widzenia bezpiecznego lądowania BSP na wózku było dostosowanie prędkości wózka startowego oraz jego położenia względem BSP.

Doktorantka dla opracowanego modelu dynamiki wózka startowego wyrzutni BSP opracowała model pola magnetycznego w postaci modelu pojedynczego magnesu, trzech magnesów ułożonych w rząd oraz torów wyrzutni z ułożonymi magnesami w szachownicę oraz w rynnę.

Dla potwierdzenia przyjętych założeń i opracowanego modelu numerycznego pola magnetycznego przeprowadzono badania eksperymentalne polegające na:

- zbadaniu wartości pola magnetycznego ponad pojedynczym magnesem neodymowym,
- zmierzeniu wartości siły magnetycznej działającej na pojedynczą podporę wózka startowego umieszczoną ponad torami wyrzutni.

Siła lewitacji została zmierzona dla dwóch konfiguracji torów (szachownicy i rynny) oraz różnych wysokości zalania nadprzewodników ciekłym azotem.

Ponadto dla stwierdzenia poprawności wyprowadzonego w pracy modelu wózka startowego wyrzutni dokonano eksperymentu polegającego na rejestracji drgań wózka startowego w trakcie oderwania samolotu za pomocą szybkiej kamery. Następnie zarejestrowane drgania podpory wózka porównano z wynikami symulacji numerycznych

opracowanego modelu dynamiki wózka uzyskując potwierdzenie poprawności opracowanego modelu wózka startowego.

W symulacjach Doktorantka przyjęła dwa modele oddziaływań magnetycznych:

1. Symulacje numeryczne ruchu podłużnego wózka oraz symulacje startu i lądowania uwzględniającą siłę lewitacji wynikającą ze zjawiska Meissnera,
2. Symulacje numeryczne ruchów bocznych wózka uwzględniające zjawisko pułapkowania strumienia będące rezultatem wnikania pola magnetycznego do wnętrza nadprzewodnika.

Model oddziaływań magnetycznych wymagał;

- opracowania modelu analitycznego sił i momentów magnetycznych,
- wyznaczenia na podstawie badań numerycznych, przestrzennego rozkładu pola magnetycznego ponad torami wyrzutni,
- oszacowania na podstawie badań doświadczalnych, wartości momentu magnetycznego indukowanego wewnątrz nadprzewodnika.

Według mojej oceny opracowany model oddziaływań magnetycznych, badania oddziaływań magnetycznych i wyrzutnia są innowacyjnymi elementami doktorantki.

#### 4. UWAGI KRYTYCZNE

Przy ogólnej poprawności językowej pracy Autorka nie ustrzegła się pewnych błędów i niejasności interpretacyjnych. Przedstawiam je poniżej.

- Str. 11. Autorka pisze, że „największymi wadami obecnie stosowanych układów zwanych wyrzutniami lub katapultami jest ograniczona możliwość sterowania trajektorią ruchu samolotu”. W trakcie ruchu samolotu na wyrzutni nie ma możliwości sterowania, zatem nie rozumiem co Autorka miała na myśli.
- Str. 55. Czy możliwy jest start samolotu na odcinku 960 mm, jak zadeklarowano w pracy. Stwierdzenie że samolot osiągnął „prędkość unoszenia” jest niepoprawne - poprawnie jest użycie nazwy prędkość oderwania.
- Str. 60. Rozdział 5 - Macierzowe równania ruchu bryły sztywnej. Wyprowadzenie równań ruchu bryły sztywnej nie jest niczym nowym. Moim zdaniem tego typu wyprowadzenia dopuszczalne są w podręcznikach, a nie w pracy doktorskiej. Ogólna uwaga to trudny w odbiorze aparat matematyczny (np. liczne indeksy, macierzowy zapis iloczynu wektorowego). Moim zdaniem, zbędne jest epatowanie czytelnika formą zapisu matematycznego.

- Str. 89. Rys.6.1 - brak zaznaczonego środka układu  $O_f$  w punkcie  $O_m$ . Brak zdefiniowanych początków układów  $O_m$ ,  $O_s$ .
- Str. 90. Jaka jest relacja między punktami  $O_s$  i  $O_{gs}$ ?
- Str. 91. Dlaczego w układzie  $O_b x_b y_b z_b$  za punkt  $O_b$  przyjęto środek parcia, a nie środek masy samolotu? Ponieważ położenie środka parcia jest zmienne i zależy od kąta natarcia, to wprowadza liczne komplikacje. Czy Autorka je uwzględniła?
- Str. 92. Dlaczego przyjęto, że kąt natarcia  $\alpha$  samolotu jest tożsamy z kątem pochylenia  $\Theta$  samolotu (kąt pochylenia  $\Theta$  nie jest kątem natarcia  $\alpha$ )?
- Str. 93. Podrozdział 6.1.3 - brak w pracy czytelnego rysunku ze schematem sił i momentów sił działających na układ. Brak jednoznacznego zdefiniowania punktu  $O_r$  jako punktu styku samolotu z wózkiem w chwili startu i lądowania.
- Str. 94. Autorka stwierdza, że „Opracowany model zakłada, iż wektor siły grawitacyjnej jest zaczepiony w środku masy obiektu”. Czy jest możliwe przyjęcie, że siła grawitacji nie jest przyłożona w środku masy?
- Str. 95. Nie zdefiniowano położenia równowagi  $h_0$ .
- Str. 98. Skąd założenie, że moment siły wynikający ze zjawiska pułapkowania strumienia ma jedną niezerową składową w postaci momentu przechylającego – wzór (6.15)?
- Str. 100. Wzór (6.18) - współczynnik siły nośnej powinien być oznaczony „ $C_L$ ” a nie „ $C_N$ ”.
- Str.101. Wzór (6.21) moment pochyłający oznacza się jako „ $M$ ” a nie „ $Y_b$ ”. Średnia cięciwa aerodynamiczna oznaczana jest w literaturze nie jako „ $l$ ” a „ $c$ ”.
- Jakie konkretne rozwiązanie techniczne modeluje element sprężysto-tłumiący wykorzystywany w modelowaniu reakcji pomiędzy samolotem a wózkiem startowym w trakcie lądowania?
- Str. 105. Wzór (6.38) - skomplikowany zapis równania ruchu samolotu. Czy nie można używać stosowanych powszechnie w literaturze prostszych form zapisu?
- Czy wykonywana była próba lądowania samolotu na wózku startowym?

## 5. WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu swojej recenzji stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego opracowania modelu dynamiki wyrzutni samolotu bezzałogowego z wykorzystaniem efektu Meissnera.

Uważam, że mgr inż. Anna SIBILSKA-MROZIEWICZ rozwiązała w rozprawie doktorskiej postawiony cel pracy, wykazała, że posiada dobrą znajomość mechaniki,

dynamiki lotu, matematyki stosowanej oraz współczesnych technik obliczeń numerycznych, wykazała umiejętność samodzielnej pracy naukowo-badawczej i kierowania badaniami naukowymi.

Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr inż. Anny SIBILSKIEJ-MROZIEWICZ w zakresie modelu dynamiki wyrzutni samolotu bezzałogowego z wykorzystaniem efektu Meissnera, recenzowaną rozprawę oceniam jako bardzo dobrą spełniającą ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o wyróżnienie pracy.

Przedstawiam Szanownej Radzie Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej wniosek o przyjęcie rozprawy jako podstawy do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych i dopuszczenie mgr inż. Anny SIBILSKIEJ-MROZIEWICZ do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Nowakowski', is positioned in the lower right quadrant of the page.