

Kielce, dnia 06.11.2017 r.

prof. dr hab. inż. Zbigniew Koruba
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Technik Komputerowych i Uzbrojenia

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Anny SIBILSKIEJ** pt.
**„Opracowanie modelu dynamiki wózka startowego wyrzutni samolotu
bezzałogowego z wykorzystaniem efektu Meissnera”**

Podstawa wykonania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. Natalii Golnik z dnia 25.09.2017 roku z prośbą o opracowanie recenzji zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Mechatroniki PW z dnia 20 września 2017 r.

1. Sylwetka Doktorantki

Mgr inż. Anna Sibilska dyplom magistra inżyniera uzyskała na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej na kierunku informatyka w zakresie systemów informacyjno-decyzyjnych. Pracę magisterską zatytułowaną „Porównanie metody wykorzystującej proste i odwrotne zadanie kinematyki oraz jacobian do sterowania manipulatorem” pod kierunkiem prof. Cezarego Zielińskiego obroniła z oceną bardzo dobrą w 2007 roku.

Podczas studiów, w latach 2005-2006, pracowała jako młodszy konsultant w firmie PREMIDA Consulting sp. z o.o., gdzie wykonywała prace z zakresu rozwoju i adaptacji systemów raportowych z wykorzystaniem systemu SAS oraz w oparciu o bazy danych Oracle. Ponadto, w 2006 r. studiowała przez jeden rok na kierunku Astronomia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Po zdobyciu dyplomu mgr inż. W 2007 r. rozpoczęła studia doktoranckie na Wydziale Elektroniki PW, które przerwała po urodzeniu pierwszego dziecka.

Podczas okresu macierzyńsko-wychowawczego prowadziła jednoosobową działalność gospodarczą w dziedzinie informatyki i prac badawczo rozwojowych - Projekty Informatyczne MiST (Modelowanie i Symulacje Techniczne) Anna Sibilska-Mroziewicz.

Od 2013 roku pracuje na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w charakterze pracownika naukowo-badawczego na stanowisku asystenta. Prowadzi zajęcia z *mecha-*

niki, wytrzymałości materiałów, teorii drgań i metod elementów skończonych przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS.

W listopadzie 2017 r. mgr inż. A. Sibilska została wyróżniona (wraz z prof. Edytą Ładyżyńską-Kozdraś) zespołową nagrodą Rektora III stopnia za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2015-2016. Poza tym, zajęła II miejsce w konkursie „Złota kreda” w kategorii najlepszy prowadzący ćwiczenia/projekt/laboratorium w roku akademickim 2016/2017.

Należy także podkreślić fakt, że uczestniczyła w realizacji 8 projektów badawczych oraz była głównym wykonawcą czterech grantów dziekańskich.

Swój kunszt zawodowy doskonaliła za pośrednictwem międzynarodowych edukacyjnych platform edukacyjnych (Coursera, Edx, copernicuscollege). Dowodem tego niech będzie fakt, że, począwszy od 2015 roku ukończyła 20 certyfikowanych kursów anglojęzycznych, głównie w tematyce inżynierskiej i informatycznej. Natomiast aktywność pracowniczą przejawia poprzez uczestnictwo w szkoleniach organizowanych przez Politechnikę Warszawską (od 2016 roku odbyła ich 3).

2. Krótka charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska pt. „*Opracowanie modelu dynamiki wózka startowego wyrzutni samolotu bezzałogowego z wykorzystaniem efektu Meissnera*” została napisana na 218 stronach wraz ze spisem 228 pozycji literatury (z czego 3 są współautorstwa Doktorantki) uporządkowanych alfabetycznie, Streszczeń w językach polskim i angielskim, Spisu treści, Spisu ważniejszych oznaczeń, (brak jest wykazu rysunków, fotografii i tabel) i Bibliografii. Podzielona została na 10 Rozdziałów, w tym Wstępu oraz Podsumowania.

We *Wstępie*, który nietypowo stanowi rozdział pierwszy rozprawy, Doktorantka zaprezentowała problematykę związaną z modelowaniem dynamiki oraz mechaniki lotu w odniesieniu do układu BSP–wózek startowy podczas startu i lądowania.

Przedstawiony został cel pracy oraz obiekt badań. Naświetlone zostało także uzasadnienie wyboru tematu i określenie jego szerokiej problematyki, obejmującego przeprowadzenie wielu badań i analiz. Autorka dokonała krótkiego streszczenia poszczególnych rozdziałów oraz wyodrębniła główne zadania badawcze.

W *rozdziale drugim* Doktorantka przedstawiła podstawy teorii zawiesznień lewitacyjnych, gruntownie wyjaśniając zjawiska lewitacji, podała elementy zjawisk elektromagnetyzmu, przytoczyła twierdzenie Earnshawa. Opisała zawieszania aktywne i pasywne z magnesami trwałymi oraz z diamagnetykami, zawieszania elektrodynamiczne i hybrydowe.

Rozdział trzeci poświęcony został szerokiemu opisowi historii i teorii nadprzewodnictwa. Podane są pewne ciekawostki dotyczące badania oporu rtęci, eksperymentu Meissnera-Ochfelda oraz nadprzewodników wysokotemperaturowych. Opisała i przytoczyła główne wzory dotyczące teorii Londonów, BCS (Bardeen'a, Coopera i Schieffera), Ginsburg-Landau – teoria nagrodzona nagrodą Nobla w 1962 roku. Wymieniła i dała wykładnię podstawowym własnościom nadprzewodników, takim jak: idealny diamagnetyzm, pułapkowanie strumienia i łożyskowanie magnetyczne. Podkreśla rolę nadprzewodników we współczesnej technologii, podając m.in. przykład magnesów nadprzewodnikowych na bazie niobu umożliwiających lewitację szybkich kolei.

W *rozdziale czwartym* Doktorantka przedstawiła stan wiedzy oraz przegląd literatury dotyczący wyrzutni samolotów bezzałogowych. Opisała rodzaje katapult, w szczególności system JATO (nazywane także RATO – Rocket Assisted Take Off), katapulty gumowe, wyrzutnie hydrauliczne i pneumatyczne oraz katapulty elektromagnetyczne. Doktorantka podkreśla, że wykorzystanie sił magnetycznych w zawieszeniu wyrzutni jest innowacyjnym rozwiązaniem. Krótko przedstawia podstawowe założenia projektowe i konstrukcyjne prototypu wyrzutni z pasywnym zawieszeniem będącej obiektem badań niniejszej dysertacji. Wyszczególnia podstawowe problemy techniczne, takie jak: utrata stabilności, kalibracja siły napędu, wyhamowywanie wózka, dobór parametrów startu, duże siły reakcji w chwili lądowania oraz występowanie drgań wózka w chwili startu. Należy podkreślić, że ww. problemy stały się inspiracją dla Doktorantki do podjęcia badań w tym zakresie i napisania niniejszej rozprawy doktorskiej.

W *rozdziale piątym* Autorka przedstawiła bogaty aparat matematyczny umożliwiający wyprowadzenie równań ruchu bryły sztywnej, za jaką został, w założeniu Doktorantki, przyjęty wózek startowy wyrzutni samolotu bezzałogowego. Równania ruchu bryły sztywnej opisane zostały w sposób najbardziej ogólny względem biegunu różnego od środka masy bryły w lokalnym układzie współrzędnych. Macierzowo-wektorowe równania ruchu podzielne zostały na część postępową i obrotową i wyrażone w postaci dogodnej do zastosowania w oprogramowaniu przeznaczonym do obliczeń numerycznych, w przypadku niniejszej rozprawy w środowisku Matlab-Smulink.

Rozdział szósty, w moim przekonaniu najistotniejszy w rozprawie, poświęcony jest modelowaniu dynamiki wózka startowego. Wyrzutnia BSP działająca na zasadzie pasywnego zawieszenia magnetycznego z nadprzewodnikami została przez Doktorantkę potraktowana jako układ trzech zasadniczych elementów: a) podstawa wózka, b) wózek startowy i c) startujący BSP. Założyła, że struktura wózka, charakterystyki ośrodka zewnętrznego, działające siły zewnętrzne oraz więzy i parametry kinematyczne ruchu są znane i zostały przyjęte



w stosunku do nich założenia upraszczające. Następnie przyjęte zostały odpowiednie układy odniesienia, przy czym obrane układy współrzędnych są prawoskrętne kartezyjskie. Ruch wózka jest wynikiem działających na niego sił i momentów sił, tj.: grawitacji, napędu, lewitacji i oddziaływań aerodynamicznych.. Korzystając z powyższych rozważań i założeń, Doktorantka wykorzystując wyprowadzenia (z poprzedniego piątego rozdziału) równań ruchu bryły sztywnej, przedstawiła model matematyczny układu BSP–wózek startowy, przy czym oddzielnie dla ruchu podczas startu i w trakcie lądowania.

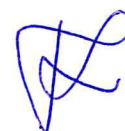
Z kolei najbardziej ciekawym i jednocześnie najoryginalniejszym jest *rozdział siódmy* rozprawy dotyczący zjawiska i siły lewitacji magnetycznej. Z wielkim uznaniem należy się odnieść do Doktorantki, która zdołała wyprowadzić równania sił i momentów sił magnetycznych; wyznaczyć, wykorzystując wyniki badań numerycznych przestrzenny rozkład pola magnetycznego ponad torami wyrzutni oraz oszacować na podstawie badań eksperymentalnych wartość momentu magnetycznego indukowanego wewnątrz nadprzewodnika, tj. zmierzenie siły lewitacji wywieraną na podporę wózka startowego, zawierającego cztery nadprzewodniki.

Rozdział ósmy jest ostatnim etapem badań Doktorantki z wykorzystaniem modelu symulacyjnego dynamiki wózka startowego wyrzutni. Opisane jest w nim opracowane oprogramowanie wraz z interfejsem graficznym oraz podane są parametry modelu numerycznego. Prowadzone są badania symulacyjne drgań wózka startowego, jego ruchów zarówno podłużnych, jak i poprzecznych. Symulacje układu BSP–wózek przeprowadzone są przy wyłączonym i włączonym napędzie samolotu dla różnych jego kątów pochylenia. Wyniki otrzymanych symulacji dla różnych warunków startu są zestawione graficznie w postaci wykresów i poddane analizie. Ciekawe wyniki badań symulacyjnych uzyskane są także dla układu BSP–wózek w trakcie lądowania. Pomimo, że budzą one wiele wątpliwości, to należy odnieść się do nich jako wyraz śmiałości Doktorantki w stawianiu czoła trudnym wyzwaniom, a także wyznaczaniu nowych kierunków badań.

Na zakończenie rozprawy, w postaci *rozdziału dziewiątego*, Doktorantka dokonuje podsumowania i wyciąga wnioski końcowe.

Należy stwierdzić, że Doktorantka podjęła się bardzo ważnego zadania opracowania modeli fizycznych i matematycznych oraz programów komputerowych dotyczących dynamiki układu BSP–wózek startowy.

Zagadnienia w niej poruszane są aktualne, a wiele z nich przez Autorkę rozwiązanych stanowić może nieocenioną pomoc w projektowaniu startu BSP z wyrzutni, a nawet i lądowania. Wobec powyższego, wybór tematu rozprawy uważam za trafnie dobrany zarówno



z teoretyczno-poznawczego jak i przede wszystkim użytecznego punktu widzenia, jest ponadto aktualny i perspektywiczny.

3. Rozważania dotyczące rozprawy

Dokonując analizy niniejszej rozprawy doktorskiej, można wyodrębnić w niej trzy zasadnicze doświadczenia pomiarowe Doktorantki:

1. Zbadła wartość pola magnetycznego ponad pojedynczym magnesem neodymowym w celu dostarczenia danych do kalibracji parametrów modelu numerycznego pola magnetycznego.
2. Zmierzyła wartość siły magnetycznej, działającej na pojedynczą podporę wózka startowego, umieszczoną ponad torami wyrzutni. W wyniku eksperymentu otrzymała przebieg wartości siły lewitacji, w funkcji szczeliny lewitacyjnej (wysokości podpory ponad torami). Siła lewitacji została zmierzona dla dwóch konfiguracji torów (szachownicy i rynny) oraz różnych wysokości zalania nadprzewodników ciekłym azotem.
3. Zarejestrowała przy pomocy szybkiej kamery drgania podpory wózka startowego w trakcie zdejmowania z jego powierzchni obciążenia.

Natomiast w ramach badań numerycznych Doktorantka przeanalizowała:

1. Model pola magnetycznego, generowanego przez pojedynczy magnes, trzy magnesy ułożone w rząd oraz tory wyrzutni, na których magnesy ułożono w szachownicę oraz w rynnę. Model pola został opracowany przy wykorzystaniu metody elementów skończonych i oprogramowania ANSYS, moduł Magnetostatic.
2. Podłużny ruch wózka, dla różnych warunków początkowych: wysokości wózka, pochyleń torów i przesunięcia środka masy wózka.
3. Ruch boczny wózka, gdy nadprzewodniki w podporach wózka zostały zalane ciekłym azotem w niezerowym polu magnetycznym, a model dynamiki wózka, uwzględniający zjawisko pułapkowania strumienia magnetycznego.
4. Dynamikę układu BSP–wózek startowy. Analizy wykazały, iż start samolotu z powierzchni wózka jest możliwy, o ile silnik liniowy będzie miał wystarczającą moc do rozpędzenia wózka do prędkości oderwania, a tory wyrzutni będą miały odpowiednią długość. Start samolotu przy większych kątach natarcia następuje szybciej i wymaga rozwinięcia mniejszych prędkości, jednak zbyt duże pochYLENIE samolotu może skutkować jego opadaniem w pierwszych chwilach lotu, co z kolei może mieć katastrofalne skutki i doprowadzić do kolizji samolotu z torami wyrzutni. W pracy zamieszczono



również analizę symulacji numerycznych lądowania samolotu na powierzchni wózka. W symulacjach prędkość pionowa samolotu, w chwili lądowania miała bardzo małą wartość, dzięki czemu siły lewitacji były w stanie zrównoważyć siłę nacisku, z jaką samolot oddziałuje z wózkiem. Większe wartości prędkości opadania oraz prędkości ruchu względnego samolotu mogą doprowadzić do kolizji samolotu z wyrzutnią.


Oryginalność rozprawy mgr inż. Anny Sibilskiej polega na tym, że Autorka przedstawiła systematyczny i jednoznaczny formalizm zapisu wielkości wektorowych i tensorowych oraz wyprowadziła na bazie macierzy rotacji równania ruchu bryły sztywnej o sześciu stopniach swobody. Zaproponowany zapis równań ruchu ułatwia badanie dynamiki układów wielocłonowych, w szczególności modelowanie ruchu samolotu bezzałogowego startującego oraz lądującego na wózku startowym wyrzutni.

Reasumując, mogę stwierdzić, że Cel pracy, którym było *opracowanie modelu dynamiki wózka startowego wyrzutni samolotów bezzałogowych wykorzystującej efekt Meissnera*, został osiągnięty. Powstały model matematyczny i numeryczny umożliwił symulację ruchu wózka, w trakcie startu i lądowania na nim samolotu. Wyniki symulacji wskazują, iż konstrukcja przedstawionej w pracy wyrzutni umożliwia bezpieczny i wydajny energetycznie start. Wyniki pracy udowadniają również, iż przy odpowiednio dobranych algorytmach sterowania samolotem i wózkiem, możliwe jest bezpieczne wylądowanie samolotu na wózku startowym wyrzutni. Opisana w pracy wyrzutnia jest innowacyjną i atrakcyjną alternatywą, dla występujących komercyjnie wyrzutni samolotów bezzałogowych. Możliwość rozpędzenia samolotu na dłuższej drodze startowej zmniejsza przeciążenia samolotu występujące w trakcie startu, dzięki czemu wyrzutnia, samolot oraz sprzęt pokładowy są dużo bezpieczniejsze. Ewentualne drgania układu BSP–wózek, powstałe w wyniku nierównomiernego rozkładu masy lub wpływu czynników zewnętrznych są tłumione, poprzez siły i momenty sił magnetycznych wynikających z efektu Meissnera oraz zjawiska pułapkowania strumienia. Największą zaletą analizowanej wyrzutni jest to, iż brak tarcia pomiędzy wózkiem startowym, a wyrzutnią poprawia znacząco wydajność energetyczną układu. Niewątpliwą przeszkodą w użytkowaniu wyrzutni jest konieczność zapewnienia chłodzenia nadprzewodników za pomocą ciekłego azotu.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne:

1. Najogólniej mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Anny Sibilskiej napisana została na bardzo wysokim poziomie merytorycznym, redakcyjnym i stylistycznym.



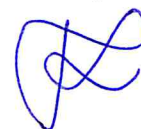
2. Dużą zaletą pracy była weryfikacja modeli analitycznych i numerycznych metodami doświadczalnymi:
3. Model numeryczny (wyznaczony za pomocą MES) pola magnetycznego generowanego przez pojedynczy magnes neodymowy, został zweryfikowany z polem rzeczywistym.
4. Poprawność modelu dynamiki wózka startowego została zweryfikowana poprzez porównanie drgań podpory wózka, zarejestrowanych za pomocą szybkiej kamery, z wynikami symulacji numerycznych. Oscylacje podpory zostały wiernie odtworzone.
5. Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych pola magnetycznego ponad torami wyrzutni wykazały, iż ułożenie magnesów w rynnę jest bardziej efektywne niż ułożenie w szachownicę. Generowane wówczas pole magnetyczne ma większą składową pionową, co przyczynia się do wzrostu siły lewitacji. Wyniki analizy MES znalazły potwierdzenie w doświadczalnych pomiarach siły lewitacyjnej zmierzonych za pomocą maszyny wytrzymałościowej. Siła lewitacji, wywierana na podporę wózka startowego ponad torami ułożonymi w konfigurację rynny jest trzy razy większa, niż ponad torami ułożonymi w konfigurację szachownicy.
6. Należy przyznać, że równania ruchu układu BSP-wózek startowy zostały wyprowadzone poprawnie z niezwykłą starannością i skrupulatnością. Wraz z modelem numerycznym stanowią skuteczny aparat badawczy. Pozwoliło to Doktorantce na opracowanie innowacyjnej wyrzutni stanowiącej atrakcyjną alternatywę dla komercyjnych wyrzutni bezałogowych statków powietrznych funkcjonujących na rynku.

Ponadto, z całą stanowczością mogę stwierdzić co następuję:

- ✓ Zagadnienie naukowe zostało jasno sformułowane i rozwiązane, a cel naukowy został osiągnięty.
- ✓ Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny.
- ✓ Rozprawę można jednoznacznie zaliczyć do dyscypliny „budowa i eksploatacja maszyn”.
- ✓ Doktorantka wykazała się wysokim poziomem wiedzy we wspomnianej dyscyplinie oraz wykazała umiejętność i cechy do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.
- ✓ Doktorantka właściwie przeprowadziła analizę piśmiennictwa i stan wiedzy zagadnienia naukowego.

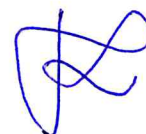
Uwagi szczególne:

1. Brak modelu matematycznego silnika liniowego napędzającego wózek startowy.



2. Wydaje się, iż obliczenia modelu numerycznego pola magnetycznego na wysokości powyżej 5 mm. ponad magnesami zostały wykonane dla zbyt mało dokładnej siatki, [przez co wykresy gradientu pola magnetycznego (rysunek 8.26) nie są „gładkie”, a wartość aproksymowanej siły, wynikającej ze zjawiska pułapkowania strumienia jest niemonotoniczna.
3. Dla przejrzystości rozprawy lepiej byłoby, gdyby składała się z 4 rozdziałów i 2 załączników, przy czym załączniki powinny stanowić obecne rozdziały 2 i 3. Uważam, że niepotrzebnie Wstęp, Podsumowanie i Spis oznaczeń nazwane zostały rozdziałami.
4. W spisie treści brak jest umieszczonej Bibliografii (w tym przypadku słusznie nie nazwanej rozdziałem). Spis oznaczeń dla wygody Czytelnika powinien być umieszczony tuż po Wstępie.
5. Rozdział 4 właściwiej byłoby nazwać” Obecny stan wiedzy dotyczący wyrzutni samolotów bezzałogowych”, a na jego zakończenie wyraźnie wskazać brakujące rozwiązania i analizy w tym zakresie – z tych przesłanek bowiem bezpośrednio wpływałyby cel i ewentualnie teza pracy.
6. Odczuwa się niedosyt krótkich podsumowań po zakończeniu niektórych rozdziałów, szczególnie 5. i 6. Myślę, że konsekwentnie można było zrobić podobnie, jak w rozdziałach 7. i 8.
7. Pod większością rysunków, zdjęć i wykresów brak jest odwołań do źródeł z których Autorka czerpała dane i informacje.
8. Co prawda Doktorantka w rozprawie nie sformułowała tezy pracy, lecz ta ostatnia mogłaby dodatkowo wzbogacić aspekt poznawczy i naukowy. Prosiłbym w związku z tym, aby Doktorantka w ramach publicznej obrony sformułowała tezę i podjęła dysputę w tym zakresie.
9. Czy była analizowana stabilność układu BSP-wózek startowy wyrzutni? Jeśli tak, to jakimi metodami i czy były wyznaczone obszary stabilnej pracy?

Podczas recenzji rozprawy odnotowałem kilka usterek, np. niewłaściwe użycie słowa „posiada” zamiast „ma”, „moment” zamiast „chwila”, itp. –zaznaczone są one bezpośrednio na stronach recenzowanego egzemplarza rozprawy. Ogólnie jednak należy stwierdzić, że praca napisana jest na bardzo wysokim poziomie językowym.



5. Ocena końcowa rozprawy

Podsumowując rozprawę mogę stwierdzić, że postawiony w niej cel został osiągnięty. Zagadnienie naukowe, którego rozwiązania podjęła się Doktorantka zostało zbadane wnikliwie. Analizy wyników teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych zostały przeprowadzone należycie i nie budzą zastrzeżeń, a ich interpretacja i sformułowane wnioski są prawidłowe. Chciałbym podkreślić, że problematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn*.

Rozprawę doktorską mgr. inż. Anny Sibilskiej oceniam bardzo wysoko, gdyż przedstawia oryginalne własne osiągnięcie naukowe. Ma ona poważne walory poznawcze i użyteczne. Praca świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autorki. Doktorantka bowiem wykazała nie tylko obszerną wiedzę z budowy eksploatacji maszyn, mechaniki, modelowania i dynamiki układów, metod symulacyjnych i numerycznych oraz programowania, ale również dużą dojrzałość naukową w formułowaniu zagadnień i realizacji rozwiązań. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, że mgr inż. Anna Sibilska ma bardzo dobre przygotowanie teoretyczne i warsztatowe do twórczej pracy naukowej.

Ponadto stwierdzam, że niniejsza rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą Ustawę o tytule i stopniach naukowych. Wysoki poziom naukowy, redaktorski i stylistyczny rozprawy sprawia, że zasługuje ona na dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę zakres rozprawy, uzyskane wyniki, a przede wszystkim sposób podejścia do problemu naukowego – umiejętnie łączącego zagadnienia budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki oraz elementy elektrotechniki, które obejmują trzy dyscypliny naukowe – wnoszę aby Rada Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej rozważyła możliwość **wyróżnienia** niniejszej dysertacji.