

dr hab. inż. Mirosław KOWALSKI, prof. nadzw.
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
01-494 Warszawa
ul. Księcia Bolesława 6.

Warszawa 30.11.2017.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

(wykonana na podstawie umowy o dzieło nr 397/ZU/2017/APZA)

Tytuł rozprawy: BADANIA TEORETYCZNE I EKSPERYMENTALNE
 HAMULCA LOTNICZEGO Z NAPĘDEM
 ELEKTRYCZNYM – ANALIZA KONSTRUKCYJNA
 HAMULCA

Autor rozprawy: mgr inż. Paweł GRYGORCEWICZ

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Roman DOMAŃSKI

Promotor pomocniczy: dr inż. Zbigniew SKORUPKA

1. Charakterystyka pracy

Podjęta problematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Grygorcewicza wychodzi naprzeciw współczesnym potrzebom w zakresie bezpiecznego użytkowania statków powietrznych. Wynika to z tego, że układy hamulcowe należą do najistotniejszych, bez których użytkowanie wszelkiego typu pojazdów naziemnych oraz statków powietrznych nie byłoby możliwe. W pojazdach naziemnych decydują o ich bezpiecznym ruchu z określoną prędkością lub postoju, natomiast w statkach powietrznych o możliwościach bezpiecznego lądowania oraz kołowaniu i zatrzymaniu. W dodatku należy podkreślić, że hamulce o napędzie elektrycznym mogą zastąpić powszechnie stosowane hamulce hydrauliczne, z czego wynika duże zainteresowanie tego rodzaju tematyką.

Rozprawa ma charakter analityczno-eksperymentalny. Obejmuje prace teoretyczne i eksperymentalne wykonane podczas procesu konstruowania hamulca elektrycznego ze szczególnym uwzględnieniem części konstrukcyjnej i badawczej. W pracy dokonano przeglądu istniejących rozwiązań konstrukcyjnych współcześnie stosowanych hamulców. Następnie przeprowadzono analizę konstrukcyjną hamulca elektrycznego wraz z wyprowadzeniem zależności teoretycznych. Zdefiniowano założenia i przedstawiono obliczenia projektowanego hamulca. Zaprezentowano analizę wytrzymałościową, której głównym celem była eliminacja skupisk naprężeń i wyeliminowanie słabych punktów konstrukcji korpusu hamulca. W kolejnych częściach pracy zaprezentowano analizy procesu lądowania i budowę opony.

W pracy dostosowano także konstrukcję nowo-zaprojektowanego hamulca do goleni samolotu I-23. Bardzo istotnym elementem rozprawy jest - po stworzeniu końcowego modelu 3D hamulca - wykonanie finalnej analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych MES. Opracowano ponadto dokumentację konstrukcyjną na podstawie, której powstał demonstrator hamulca o napędzie elektrycznym.

Opierając się na wcześniejszych badaniach hamulca hydraulicznego do samolotu I-23, wykonano badania hamulca o napędzie elektrycznym. Głównym ich celem było sprawdzenie działania hamulca oraz możliwość porównania wyników z aktualnie stosowanymi hamulcami hydraulicznymi.

Przeprowadzono szereg badań, a następnie przeprowadzono analizę otrzymanych wyników. Pracę zakończono podsumowaniem oraz przedstawiono dość interesujące wnioski końcowe.

2. Cel badań – teza rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa za cel główny podaje opracowanie, w oparciu o badania teoretyczne i eksperymentalne hamulca o napędzie elektrycznym, na przykładzie samolotu o masie 1400 kg, wykonanie działającego demonstratora hamulca i jego badania. Ponadto, Autor sprecyzował cele dodatkowe, tj.:

- opracowanie projektu hamulca i dokumentacji konstrukcyjnej,
 - porównanie cech hamulców elektrycznych z hamulcami innych typów głównie hydraulicznymi,
 - pokazanie korzyści i wad wybranego rozwiązania,
 - zaproponowanie rozwiązania, które można będzie łatwo zaadaptować w konstrukcjach hamulców,
 - analiza konstrukcyjna hamulca,
 - zweryfikowanie przyjętych założeń konstrukcyjnych w trakcie badań,
- których spełnienie warunkowało osiągnięcie celu głównego pracy.

Osiągnięcie celu głównego stanowiło podstawę do udowodnienia przyjętej przez Autora tezy pracy o następującym brzmieniu:

„Hamulce o napędzie elektrycznym mogą zastąpić hamulce hydrauliczne, co znajdzie odzwierciedlenie w tożsamości parametrów eksploatacyjnych obu rozwiązań i przez to umożliwienie ich zastosowania w pojazdach mechanicznych”.

W moim przekonaniu, tytuł rozprawy, teza i cele zostały sformułowane w sposób przejrzysty i jasny.

Autor wykazał się przy tym dużą umiejętnością w efektywnym wykorzystywaniu aparatu matematycznego, w tym metody elementów skończonych MES wykorzystując do tego platformę programową FEMAP z solverem Nastran.

Na uznanie zasługuje również część praktyczna, podczas której Autor wykonał model 3D hamulca elektrycznego, który przyczynił się do opracowania dokumentacji technicznej. W oparciu o tę dokumentację zbudował demonstrator hamulca o napędzie elektrycznym, a następnie przebadał jego możliwości i porównał uzyskane parametry z podobnymi hamulcami hydraulicznymi. Tym samym osiągnął przyjęte cele dysertacji i udowodnił postawioną tezę rozprawy

3. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł i formułowania wniosków

Recenzowana rozprawa zawiera 58 pozycji literaturowych 17 adresów stron internetowych. Zdecydowana większość z prezentowanej literatury została opublikowana w ciągu ostatnich dwóch dekad. Zakres tematyczny należy uznać za właściwy do realizacji niniejszej rozprawy.

Pragnę tylko nadmienić, że kilka z wymienionych pozycji jest niepełna, nie zawiera wydawnictwa, roku wydania lub obu danych równocześnie, jak np. pozycja [2], [22], [31], [32], [42], [56] i [57].

Należy dodatkowo podkreślić, że przegląd literaturowy oprócz pozycji krajowych zawiera wiele pozycji o zasięgu międzynarodowym. Można zatem stwierdzić, że przeprowadzona analiza źródeł - literatury przedmiotu, jest wystarczająco obszerna i świadczy o dużej wiedzy Autora w podjętej tematyce.

4. Rozwiązanie postawionego zadania w rozprawie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy ogółem 155 stron. Składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści i rysunków oraz tabel, wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, dwudziestu rozdziałów i bibliografii, której nie ujęto w spisie treści pracy. W sumie praca zawiera 82 rysunki i 17 tabel.

Wykaz ważniejszych oznaczeń jest dość obszerny i został podzielony oddzielnie na skróty i oznaczenia, które zostały opisane i podane jednostki. Nadmienić tylko należy, że stwierdzono nie ujęcie kilku skrótów i oznaczeń, których istnienie stwierdzono w tekście rozprawy, jak np. FDM, BEM, C_x , C_z , n_g itp. Występuje też wiele oznaczeń różniących się tylko indeksem, jak np. poszczególne długości lądowania (L_1 , L_2 , L_3 , L_4 itp.). Z tych względów wskazanym i bardziej czytelnym byłoby rozdzielenie i opisanie oddzielnie oznaczeń i występujących indeksów.

Rozdział 1 jest wstępem, który zawiera wprowadzenie w tematykę pracy. Opisuje m.in., w skrócie, historię rozwoju hamulców, zasadę działania hamulców i czynniki charakteryzujące konstrukcje współczesnych hamulców. W sumie rozdział ten zawarto na 2 stronach rozprawy.

W rozdziale 2 pt.: „Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych hamulców”, Autor opisał podwozie lotnicze, najważniejsze jego elementy oraz klasyfikację m.in. ze względu na montaż w samolocie i ze względu na budowę, opisał i podał przykłady ukazujące zasadę działania hamulców tarczowych i bębnowych. Dodatkowo opisał spotykane już hamulce elektryczne w samolotach – podał przykłady fotograficzne oraz w samochodach wraz z przeglądem typowych rozwiązań konstrukcyjnych. Ustalił istotne parametry projektowo-eksploatacyjne podwozi i napędów hamulców oraz kryteria ich oceny, a następnie przeprowadził analizę niezawodności, gdzie m.in. opisał występujące ryzyko, niepewność oraz zdefiniował niezawodność określonego obiektu technicznego. Rozdział ten zawarto na 14 stronach rozprawy. W rozdziale tym występuje zależność (2.1) określająca miarę niezawodności obiektu, gdzie występuje parametr U (uszkodzenie) z kreską nad tym

parametrem – oznaczającym zwykle wartość średnią lub wartość względną. Z definicji wiadomym jest (o tym też wspomina Autor), że niezawodność obiektu określa się przez prawdopodobieństwo pracy poprawnej (do wystąpienia uszkodzenia) w czasie (t) i określonych warunkach (w). Proszę zatem Autora o wyjaśnienie zapisu tej zależności?

Rozdział 3 to „Analiza stanu wiedzy”, w której przeprowadzono analizę literatury przedmiotu, wskazano na jej podział z uwagi na poruszane przez nią zagadnienia oraz przybliżył głównych autorów, zajmujących się podobną problematyką. Rozdział ten zapisano na 4 (niepełnych) stronach.

W rozdziale 4 pt.: „Analiza porównawcza hamulców”, Autor dokonał porównania cech i parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych hamulców lotniczych z napędem hydraulicznym i elektrycznym oraz przedstawił ich zalety i wady. Rozdział obejmuje niecałe 2 strony.

W rozdziale 5 pt.: „Cel. teza i zakres pracy” Autor przedstawił cel główny rozprawy oraz cele dodatkowe (szczegółowe), a także zdefiniował tezę rozprawy, którą należało udowodnić. Na zakończenie, dość krótko opisał zakres rozprawy, który w zasadzie jest krótkim streszczeniem rozprawy, a nie opisem zawartości poszczególnych rozdziałów. W sumie rozdział ten zawiera niecałe 2 strony rozprawy.

Rozdział 6 pt.: „Pojęcia dotyczące procesu konstruowania”, zapisany na 10 stronach rozprawy przybliży podstawowe pojęcia konstruowania i projektowania z różnego punktu widzenia. Następnie przedstawia proces projektowania, w tym schemat na przykładzie dużego przedsiębiorstwa. Mankamentem jest jedynie dość mały rysunek, który utrudnia jego czytelność, a miejsca na jego powiększenie jest sporo. W dalszej części tego rozdziału przedstawiono schemat procesu projektowo-konstrukcyjnego samolotu, opisano główne zagadnienia projektowania, wymagania techniczne zadania projektowego oraz dość szczegółowo przedstawiono główne wyróżniki, które należy uwzględnić podczas projektowania obiektów. Oddzielnie opisano wyróżniki dla hamulca elektrycznego.

Rozdział 7 pt.: „Założenia do konstrukcji” przedstawia prace przygotowawcze do przeprowadzenia obliczeń, gdzie zaprezentowano schemat sił działających na koła samolotu oraz podstawowe zależności do wyliczenia parametrów podczas hamowania samolotu. Przeprowadzono również obliczenia podstawowych parametrów hamowania dla samolotu o masie 1400 kg. W dalszej części opisano i wyliczono rzeczywiste siły występujące w hamulcu elektrycznym do samolotu I-23. Rozdział ten zawiera 13 stron. W zależności (7.17) na określenie maksymalnej siły hamowania, występuje współczynnik bezpieczeństwa $k=1,2$, zaś w zależności (7,18) na określenie maksymalnych naprężeń występuje współczynnik bezpieczeństwa $k=2$. W tym miejscu proszę Autora o wyjaśnienie, w jaki sposób dobrano te współczynniki bezpieczeństwa oraz przybliżenie ogólnych zasad doboru tego rodzaju współczynników bezpieczeństwa?

Rozdział 8 pt.: „Przepisy lotnicze dla hamulców” prezentuje dane zawarte w przepisach CS 23.735 Hamulce oraz opisano wymagania zespołu hamulcowego dla pochłaniania energii dla jednego koła według tych przepisów, a na koniec wyliczono drogę

hamowania przy wcześniej przyjętych warunkach. Rozdział ten zawarto na 2 stronach rozdziału.

Rozdział 9 pt.: „Projekt wstępny” zawiera - na 3 stronach - projekt wstępny demonstratora hamulca o napędzie elektrycznym w samolotach klasy Commuter, który zawiera schemat ideowy hamulca, budowę i zasadę działania mechanizmu śrubowego, czynniki wpływające na konstrukcję hamulca oraz schemat wytworzenia dokumentacji wyrobu.

Rozdział 10 „Projekt konstrukcyjny” prezentuje opracowanie modeli geometrycznych 3D z wykorzystaniem programu CAD, fazy jego modyfikacji i optymalizacji oraz finalny model 3D hamulca elektrycznego z tarczą. Ostateczny wynik tworzenia modelu 3D przedstawiono na rysunkach, opisujące dość szczegółowo poszczególne elementy hamulca elektrycznego, co istotnie poprawia czytelność całego przedsięwzięcia. W rozdziale tym opisano również sterowanie hamulcem elektrycznym, prezentując przy tym schemat blokowy układu ze sprzężeniem. Rozdział ten zawiera 10 stron.

Rozdział 11 pt.: „Analizy wytrzymałościowe” prezentuje modele mechaniczne i wytrzymałościowe, w tym schemat obciążeń korpusu hamulca. Dalej zawarto bardzo interesujący opis metody elementów skończonych MES, którą wykorzystano do obliczeń sił i naprężeń występujących w korpusie hamulca. Z pomocą tej metody przekonstruowano i pogrubiono ścianki korpusu hamulca. Kolejne zagadnienia zawarte w tym rozdziale to, analizy quasistatyczne, analizy dynamiczne podczas lądowania samolotu, podczas których Autor wykazał dużą umiejętność posługiwania się aparatem matematycznym. Rozdział ten zawarto na 21 stronach rozprawy.

Rozdział 12 „Dokumentacja techniczna hamulca” (na 2 stronach) opisuje wykonaną dokumentację techniczną hamulca w postaci rysunków wykonawczych oraz rysunku złożeniowego, których dwa przykłady zamieszczono w tekście rozprawy, co - z uwagi na wielkość tych rysunków - raczej było zbędne, gdyż są nieczytelne.

Rozdział 13 „Budowa opony lotniczej” przedstawia krótką historię rozwoju opony oraz jej budowę w postaci dość interesujących schematów. Ponadto (w wielkim skrócie) przedstawia opis przykładowych obliczeń opony z wykorzystaniem modelu 3D i metody elementów skończonych. Rozdział ten zapisano na 4 stronach rozprawy.

W rozdziale 14 pt.: „Montaż” prezentuje proces montażu samego hamulca elektrycznego, jego zabudowy na pół-widelcu goleni samolotu I-23 oraz układu napędu elektrycznego. Cały układ zweryfikowano pod kątem sprawności działania. Rozdział ten zawarto na 4 stronach.

Rozdział 15 „Teoretyczny model procesu hamowania” (na 3 stronach) przedstawiono zależności opisujące zamianę energii kinetycznej samolotu na energię bieżni na stanowisku młot3T z bieżnią oraz odpowiadające za siłę hamowania hamulca.

W rozdziale 16 „Opracowanie koncepcji badań” - zapisany na 10 stronach - prezentuje wykaz eksperymentów oraz uzasadnienie do ich realizacji, plan według którego przeprowadzono poszczególne eksperymenty na prototypie hamulca w laboratorium

Pracowni Podwozi Instytut Lotnictwa, na stanowisku Młot 3T z bieżnią, a także wykaz mierzonych parametrów i wyniki z prób hamulca hydraulicznego z samolotu I-23, prezentowane w tabelach.

Rozdział 17 „Badania” (na 16 stronach rozprawy) przedstawia przedmiot oraz zakres prób zrealizowanych na hamulcu elektrycznym, na stanowisku badawczym Młot 3T z bieżnią, a także wykaz wielkości zmierzonych. Na zakończenie tego rozdziału wykonano badania z użyciem termowizji, do czego wykorzystano oprogramowanie FLIR ReasearchIR. Wyniki tych badań przedstawiono graficznie, gdzie nie stwierdzono istotnego wzrostu temperatury tarczy oraz nie zaobserwowano wpływu temperatury silników elektrycznych na proces hamowania.

W rozdziale 18 pt.: „Analiza wyników badań” (na 6 stronach) prezentuje uzyskane wyniki z badań na stanowisku Młot 3T z bieżnią dla różnych prędkości, w postaci wykresów ukazujących zmiany prędkości obrotowych, sił hamowania, czasu hamowania, momentu hamowania hamulca o napędzie elektrycznym itp. Wadą prezentowanych wykresów jest zbyt mała ich czytelność.

Rozdział 19 „Podsumowanie oraz propozycje dalszych prac” – rozpisany na 3 stronach – zawiera dość precyzyjne podsumowanie zrealizowanych przedsięwzięć w rozprawie, ich znaczenie oraz najistotniejsze walory zastosowania. Na zakończenie stwierdzono osiągnięcie założonych celów pracy i udowodnienie założonej tezy pracy. Trudno jednak dopatrzeć się propozycji dalszych prac związanych z analizowanymi w rozprawie zagadnieniami, co zasugerowano w tytule tego rozdziału.

Ostatni, 20 rozdział pt.: „Wnioski” (na 2 stronach pracy) prezentuje w 15 punktach stwierdzenia, których treść jest wynikiem przeprowadzonych w rozprawie obliczeń, badań i eksperymentu. Potwierdzono w nich wysokie walory hamulców elektrycznych, których parametry sugerują powodzenie zastąpienia hamulców hydraulicznych hamulcami z napędem elektrycznym.

Ostatecznie stwierdzam, że rozwiązanie postawionego zadania zostało przeprowadzone prawidłowo przez Autora, a przyjęte założenia i metody nie budzą zastrzeżeń.

5. Oryginalność rozprawy – samodzielny dorobek Autora

Oryginalnym osiągnięciem Autora jest samodzielne opracowanie i wykonanie:

- obliczeń rzeczywistych sił występujących w hamulcu do samolotu I-23;
- projektu wstępnego demonstratora hamulca o napędzie elektrycznym do samolotów klasy Commuter;
- modelu geometrycznego 3D z wykorzystaniem metody elementów skończonych MES;
- dokumentacji technicznej (konstrukcyjnej) hamulca o napędzie elektrycznym;
- demonstratora hamulca elektrycznego i zabudowanie go na goleni samolotu I-23;

- koncepcji badań eksperymentalnych, planu ich realizacji i ich zrealizowanie w Laboratorium Podwozi Instytutu Lotnictwa;
- analizy uzyskanych wyników, porównanie z uzyskiwanymi przy wykorzystaniu hamulców hydraulicznych oraz wyciągnięcie i opisanie właściwych wniosków.

Równie dużym i bardzo oryginalnym osiągnięciem jest umiejętne przeprowadzenie analizy rozwiązań konstrukcyjnych hamulców elektrycznych, ustalenie istotnych parametrów projektowo-eksploatacyjnych podwozi i napędów hamulców oraz kryteria ich oceny.

Dość oryginalnym jest również sposób przeprowadzenia analizy literatury przedmiotu, wykazujący aktualny stan wiedzy na temat podjęty w rozprawie.

6. Uwagi ogólne

Sposób realizacji pracy nie budzi większych zastrzeżeń, jednak Autor nie ustrzegł się kilku istotnych błędów, do których należy zaliczyć:

- brak opisu istotnych elementów na załączonych rysunkach, jak np. rys.29, rys.31, rys.67, rys.77 itd. co czyni je mało przejrzystymi;
- brak opisu poszczególnych elementów procesu lądowania samolotu na rys.54 – wskazanym jest nazwanie (zgodnie z normami) poszczególnych faz lądowania, co zwiększyłoby czytelność rysunku;
- bardzo słaba czytelność lub jej niemal całkowity brak na rys.36, rys.37, rys. 50, rys.55, rys. 56, rys.57, rys.75, rys.78, rys.79, rys.80, rys.81, rys.82;
- brak opisów używanych oznaczeń i symboli w niektórych zależnościach jak np. „ C_{zprz} ” w (11.14), (11.15), (11.16); „ R ” w zależności (11.17); K_{max} w zależności (11.23); takich przykładów jest więcej, wskazanym jest więc zwrócenie uwagi na przyszłość, aby być konsekwentnym w opisywaniu zmiennych i oznaczeń w prezentowanych zależnościach. Jest oczywistym, że wiele z nich jest znanych zwłaszcza ekspertom w danej dziedzinie, ale to nie zwalania od zachowywania pewnych standardów w pisaniu monografii, które mogą czytać również inni, nie będący ekspertami w tych zagadnieniach;
- nieprawidłowy sposób odwoływania się do wyników tabeli 6 na str.96 – 5 wiersz od dołu jest „...uwzględnić następującą tabelę”, należy podawać konkretny numer tabeli.

Ponadto jest kilka błędów natury czysto redakcyjnych, jak literówki, znaki interpunkcyjne itp.

Stwierdzone błędy nie mają jednak wpływu na jakość pracy oraz jej stronę merytoryczną i nie umniejszają bardzo pozytywnego odbioru całej pracy.

7. Przydatność rozprawy w eksploatacji i poprawie bezpieczeństwa

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła GRYGORCEWICZA stanowi bardzo ważny krok w rozpoznaniu zjawisk i skuteczności działania hamulców o napędzie elektrycznym. Daje

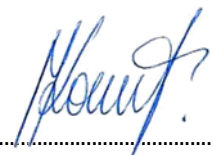
wymierne korzyści w zakresie możliwości ich stosowania w podwoziu statków powietrznych, a także wpływa na wzrost bezpieczeństwa lotów, poprzez określenie i opisanie konkretnych korzyści w relacji do standardowo stosowanych hamulców hydraulicznych. Ponadto opracowane, autorskie metodyki i modele matematyczne, z wykorzystaniem m.in. metody elementów skończonych MES, są nowatorskie i stanowią skuteczne narzędzie do projektowania układów hamulców elektrycznych podwozi lotniczych. W dodatku, wykonany model konstrukcyjny hamulca w technologii 3D i dostosowanie go do goleni samolotu I-23, a następnie – na podstawie tego modelu – opracowanie dokumentacji technicznej i demonstratora hamulca elektrycznego, który przebadano na stanowisku w Laboratorium Podwozi Instytutu Lotnictwa, są przedsięwzięciami innowacyjnymi w kraju i na świecie. Potwierdzeniem tego są m.in. uzyskane wyniki z badań eksperymentalnych opracowanego i wykonanego hamulca elektrycznego, które w wyniku porównania ze standardowo stosowanymi hydraulicznymi hamulcami wykazały dużą ich efektywność. Jest to niewątpliwie przesłanka do podjęcia na szeroką skalę, prac wdrożeniowych tego typu rozwiązań konstrukcyjnych hamulców elektrycznych w lotnictwie.

8. Podsumowanie

Reasumując, uważam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Pawła GRYGORCEWICZA pt.: „BADANIA TEORETYCZNE I EKSPERYMENTALNE HAMULCA LOTNICZEGO Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM – ANALIZA KONSTRUKCYJNA HAMULCA” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) i mieści się w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponadto, uwzględniając obszar badań zrealizowany w rozprawie przez Doktoranta, sposób ich przeprowadzenia, analizy, tworzenie modeli matematycznych i symulacji numerycznej, opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej hamulca elektrycznego i wykonanie demonstratora hamulca z napędem elektrycznym, a następnie jego przebadanie w warunkach zbliżonych do pracy w warunkach rzeczywistych, wnioskuję o jej wyróżnienie.



.....