

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Ewy Cichockiej  
pt.

„Badania wpływu efektów giroskopowych na dynamikę lekkiego samolotu z napędem turbinowym”

wykonana na zlecenie Dyrektora Instytutu Lotnictwa z dnia 11.03.2015 roku  
na podstawie uchwały Rady Naukowej Instytutu Lotnictwa z dnia 10.03.2015 roku

W ciągu ostatnich lat obserwujemy duży rozwój samolotów lekkich związany głównie z nowymi materiałami oraz nowymi zespołami napędowymi. Rozwój w tych dwóch dziedzinach powoduje znaczące zmniejszenie masy konstrukcji, w tym struktury płatowca oraz silnika, przy jednoczesnym zwiększeniu jego mocy. Powodować to może znacznie większy niż w przypadku starszych konstrukcji wpływ elementów wirujących zespołów napędowych na właściwości lotne samolotu. Obecny rynek samolotów lekkich jest trudny dla konstruktorów ze względu na dużą konkurencję. O powodzeniu projektu zaczynają decydować szczegóły dotąd niedoceniane. Właściwości lotne samolotu należą do grupy cech bardzo ważnych dla przyszłego odbiorcy-pilota. Efekty wirujących elementów zespołu napędowego mogą mieć znaczący wpływ zarówno na bezpieczeństwo jak i na komfort pilotowania samolotu, należą więc do grupy cech istotnych z punktu widzenia powodzenia projektu nowego samolotu.

Praca doktorska Ewy Cichockiej podejmuje temat wpływu efektów giroskopowych, pochodzących od wirujących części zespołu napędowego, na dynamikę samolotu. Wyniki jej badań mogą być dodatkową pomocą dla konstruktorów nowoprojektowanych samolotów, wspierającą uzyskanie najlepszego możliwego efektu, czyli zaprojektowania samolotu nie tylko o dobrych osiągnięciach ale również bezpiecznego i przyjemnego w pilotażu. Uważam więc, że temat rozprawy jest aktualny, zarówno z technicznego oraz badawczego punktu widzenia oraz istotny w procesie projektowania nowych konstrukcji lotniczych.

Rozprawa podzielona jest na 11 rozdziałów głównych oraz literaturę i spis ważniejszych oznaczeń stosowanych w tekście. Jest zapisana na 189 stronach maszynopisu. Zawiera analizy dotyczące 3 różnych obszarów badawczych: (1) mechaniki i dynamiki lotu z uwzględnieniem wirujących elementów zespołu napędowego, (2) stateczności ruchu samolotu, (3) symulacji numerycznej manewrów samolotu oraz lotu w warunkach podmuchów. Przedstawia dość szczegółowo model matematyczny lotu samolotu z uwzględnieniem efektów giroskopowych pochodzących od wirujących części zespołu napędowego (w Rozdz.3), analizę stateczności samolotu wraz z porównaniem z wynikami badań w locie (w Rozdz.5, 6 i 7) oraz wyniki symulacji numerycznej wybranych manewrów oraz lotu w warunkach podmuchów (w Rozdz. 9 i 10).

W pracy zamieszczono 161 rysunków oraz 23 tablice z danymi i wynikami obliczeń. Literatura zawiera 135 pozycji, w tym 6 własnych lub współautorskich. Wszystkie pozycje literatury odnoszą się bezpośrednio do zasadniczego tematu rozprawy. 56 pozycji było wydanych po roku 2000, pozostałe są pozycjami klasycznymi w dziedzinie dynamiki lotu bądź mają znaczenie raczej historyczne, choć są wciąż aktualne.

W Rozdz.1 (Wstęp) dokonano wprowadzenia w problematykę wpływu efektów giroskopowych na dynamikę samolotu a w szczególności na stateczność i sterowność samolotów klasy General Aviation. Przedstawiono, w ujęciu historycznym, rozwój wiedzy związanej z wpływem elementów wirujących na właściwości lotne samolotów, sięgający początków lotnictwa po przykłady współczesne.

W Rozdz. 2 (Najważniejsze problemy badawcze stateczności samolotów lekkich z napędem turbośmigłowym) przedstawiono różne zjawiska związane z obecnością obracającego się śmigła. Opisano zjawiska czysto aerodynamiczne (P-factor, efekt strug zaśmigłowych, decentracja ciągu) jak i dynamiczne (moment reakcyjny, efekt giroskopowy). Najszerzej omówiono efekt giroskopowy, przedstawiono podstawy teoretyczne oraz wymagania przepisów dotyczące uwzględniania momentu giroskopowego przy wyznaczaniu obciążeń struktury samolotu.

W Rozdz.3 (Fizyczny i matematyczny model ruchu samolotu lekkiego) zamieszczono założenia modelu fizycznego i matematycznego zastosowanego do analizy dynamiki samolotu z uwzględnieniem efektu giroskopowego od zespołu napędowego. Wyprowadzone zostały równania ruchu oraz dokonano ich linearyzacji. Rozszerzono model klasyczny (wektor stanu) w celu uwzględnienia efektu giroskopowego. Szkoda, że w tym miejscu, autorka nie podała interpretacji fizycznej otrzymanych dodatkowych wartości własnych. W drugiej części rozdziału przedstawiono dane masowe oraz aerodynamiczne samolotu I-31, będącego obiektem badań. Pochodne aerodynamiczne przeanalizowano z użyciem różnym narzędzi, od klasycznych raportów ESDU po metody CFD.

W Rozdz.4 (Wybór samolotu testowego do analiz dynamicznych) omówiono szerzej obiekt badań – samolot I-31, będący modyfikacją samolotu I-23. Przedstawiono zasadnicze różnice między samolotami I-23 i I-31 oraz dokonano analizy zapasów stateczności podłużnej. Wydaje się, że opis obiektu badań powinien być przedstawiony wcześniej, przed prezentacją charakterystyk aerodynamicznych w rozdziale 3.

Rozdz.5 (Równowaga i stateczność dynamiczna samolotu I-31T) zawiera jedną z ważniejszych części otrzymanych wyników. Przedstawiono w nim wpływ różnych parametrów lotu (wysokość lotu, kąt ślizgu, kąt wznoszenia, prędkość wiatru, promień zakrętu prawidłowego) oraz efektu giroskopowego na stateczność dynamiczną samolotu.

Rozdz.6 (Porównanie wyników z różnych pakietów obliczeniowych) jest uzupełnieniem rozdziału 5 i stanowi krytyczną ocenę wyników obliczeń.

Rozdz.7 (Porównanie rezultatów symulacji z wynikami prób w locie) zawiera wyniki symulacji numerycznej lotu, w której dokonano zaburzeń lotu ustalonego w sposób zbliżony do stosowanego w lotach testowych przy badaniach stateczności dynamicznej samolotu. Niestety nie dysponowano rejestracją takich lotów a jedynie oceną subiektywną pilota doświadczalnego. Tym nie mniej wyniki symulacji zasadniczo były zgodne z opinią pilota a ponadto zbadano wpływ efektu giroskopowego na drgania krótkookresowe (oscylacje szybkie i holendrowanie).

Rozdz.8 (Analiza wrażliwości stateczności samolotu na pochodne aerodynamiczne) zawiera dodatkowe wyniki pokazujące wpływ danych aerodynamicznych, w szczególności pochodnych aerodynamicznych na wyniki analizy dynamicznej. Analiza wrażliwości ma znaczenie ze względu na fakt, że badane efekty od elementów wirujących nie są zwykle duże,

zatem ważne jest aby ocenić czy ewentualny błąd w danych aerodynamicznych nie powoduje większych różnic w ocenie właściwości lotnych.

Rozdz. 9 (Reakcja samolotu na gwałtowne manewry) zawiera drugą część zasadniczych wyników analizy dynamiki samolotu otrzymanych na drodze symulacji numerycznej ruchu. Są to reakcje samolotu na gwałtowne wychylenia sterów. W rozdz. 10 (Reakcja samolotu na podmuchy) przedstawione są natomiast wyniki symulacji numerycznej pokazujące reakcję samolotu w burzliwej atmosferze. Jest to najciekawsza część pracy, zwłaszcza, że w przypadku szybkich manewrów, wpływ momentów giroskopowych jest dużo silniejszy niż w przypadku analizy stateczności dynamicznej, gdzie zakłada się tzw. małe zaburzenia. Dodatkową wartością są wyniki uwzględniające symulacje dla różnych modeli matematycznych.

Rozdz.11 (Wnioski) przedstawia dyskusję wyników opisanych szczegółowo w poprzednich rozdziałach i ma charakter uwag końcowych. Interesujące są wnioski i rekomendacje dla konstruktorów nowych samolotów oraz osób wykonujących analizy dynamiki, dotyczące stosowanych modeli obliczeniowych.

### **Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta**

Uważam, że oryginalnym dorobkiem doktoranta jest przeanalizowanie problemów związanych ze stosowaniem napędów śmigłowych na lekkich samolotach a w szczególności z efektem od wirujących elementów zespołu silnik-śmigło. Zagadnienia te do tej pory były zwykle pomijane, przy milczącym założeniu ich marginalności. Szeroki zakres badań, modelowanie matematyczne, analiza wartości własnych modelu, analiza wrażliwości, badania symulacyjne manewrów i lotu w burzliwej atmosferze, jest niewątpliwie dużym atutem pracy.

### **Krytyczna ocena rozprawy**

Uwagi krytyczne odnoszą się raczej do pewnych zaniechań (np. brak interpretacji fizycznej otrzymanych dodatkowych wartości własnych) oraz nieściśłości i nie wpływają zasadniczo na sumaryczną ocenę pracy. Autorka nie ustrzegła się też uchybień redakcyjnych, wynikłych zapewne z pośpiechu związanego (zwykle) z finalizacją pracy. Kilka drobnych uwag krytycznych zostało zamieszczonych przy omawianiu kolejnych rozdziałów pracy.

Najważniejsze uwagi krytyczne:

1. W Rozdziale 2.6 sformułowane jest założenie o pomijalności efektów giroskopowych od elementów wirujących silnika turbinowego w porównaniu z efektami pochodzącymi od śmigła. Zdaniem recenzenta nie można przyjmować takiego założenia. Dopiero analiza ilościowa pozwala wykluczyć efekty od turbiny. Analiza taka jest wykonana i przedstawiona w Rozdziale 5.3
2. W Rozdziale 3.5.1 zaprezentowane jest rozszerzenie klasycznego modelu o dodatkowy element wektora stanu – kąt odchylenia. Jednak we wzorze (1.91) definiującym wektor stanu, zamiast kątów położenia użyto pochodnych kątów położenia, które zależą od składowych prędkości kątowej. Zależności te są przedstawione we wzorach (1.92-1.94) i są prawidłowe, jednak komentarz, że są to składowe prędkości kątowej w układzie grawitacyjnym jest nieprawidłowy.
3. W zapisie macierzowym równań ruchu również wkradły się usterki, zapewne przy zbytnim pośpiechu przy redagowaniu tekstu. Lewa strona równania (1.101) powinna zawierać pochodną wektora stanu, tymczasem zawiera

zarówno elementy wektora stanu jak i niektóre pochodne. Również w prawej stronie równania pojawiają się niezrozumiałe wielkości w wektorze stanu ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ).

4. Wektor  $J_6$  zdefiniowany równaniem (1.107) powinien zawierać współrzędne położenia i kąty położenia a nie składowe prędkości liniowej i kątowej
5. Autorka pracy redagując pracę zastosowała wielostopniową numerację rozdziałów, numerując rysunki i tabele z uwzględnieniem numeru rozdziału głównego. Tymczasem wzory numerowane są globalnie wg formuły (1.x) bez względu w którym rozdziale występują.

W pracy nie dostrzegłem jednak poważniejszych błędów merytorycznych czy metodycznych – praca jest efektem badań poprawnych warsztatowo i zgodnych ze współczesną wiedzą na temat modelowania ruchu samolotu i dynamiki lotu.

### **Wnioski końcowe**

W zakończeniu stwierdzam, że wniesione uwagi i zastrzeżenia nie mają zasadniczo negatywnego wpływu na moją ocenę rozprawy jako całości. Wyrażam nadzieję, że pomogą doktorantowi w doskonaleniu warsztatu badawczego i przygotowaniu ewentualnych publikacji, czy dalszym kontynuowaniu tej tematyki badawczej.

W podsumowaniu swojej recenzji stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego badania dynamiki lekkiego samolotu z uwzględnieniem efektów giroskopowych. Wskazuje jednoznacznie na dobre opanowanie przez autora podstaw aerodynamiki samolotu, mechaniki i dynamiki lotu, oraz metodyki badań symulacyjnych. Tym samym spełnia wymagania ustawy z dnia 27 lipca 2005 roku „Prawo o Szkolnictwie Wyższym” oraz ustawy z dnia 18 marca 2011 o zmianie ustawy – „Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw”. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Ewę Cichocką do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

### **Wniosek o wyróżnienie pracy**

Ze względu na bardzo duże znaczenie wyników pracy w technice lotniczej oraz interdyscyplinarność (modelowanie matematyczne, stateczność lotu, numeryczne badania symulacyjne) proponuję rozprawę wyróżnić.

Tomasz Goetzendorf-Grabowski

