

### Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Ewy CICHOCKIEJ p.t.: „Badania wpływów efektów  
giroskopowych na dynamikę lekkiego samolotu z napędem turbinowym”.

#### 1. Podstawa opracowania

Zlecenie Dyrektora Instytutu Lotnictwa z dnia 11.03.2015r umowa nr 64/DV/2015.

#### 2. Wstęp

W pracy przedstawiono kompleksowe badania wpływu efektów giroskopowych na stateczność dynamiczną i reakcję samolotu na manewry po gwałtownym wychyleniu sterów lub po wejściu samolotu w podmuch. Podjęty przez Doktorantkę problem badania stateczności wszystkich postaci ruchu samolotu klasy General Aviation (GA) jest zagadnieniem złożonym z punktu widzenia naukowo badawczego i niezwykle ważnym ze względów użytkowych. Wyniki badań przedstawione w rozprawie mogą być wykorzystane przez konstruktorów jak i inżynierów nadzorujących eksploatację statków powietrznych w zakresie bezpieczeństwa wykonywania lotów. Badania przeprowadzono na samolocie I-23, który dostosowano do zabudowy turbinowego silnika śmigłowego. Praca liczy 189 stron, składa się z 11 rozdziałów w tym wprowadzenie i wniosków ogólnych. Spis literatury zawiera 135 pozycji literatury wraz z licznymi odwołaniami. Wykazane w spisie literatury pozycje tematyczne wiążą się z pracą, wśród nich są książki stanowiące klasykę mechaniki lotu oraz kilka najnowszych artykułów poświęconych badaniu efektów giroskopowych zespołu napędowego na stateczność dynamiczną samolotu. Rozdział pierwszy, zatytułowany „Wprowadzenie” podzielono na pięć podrozdziałów w których podjęto próbę omówienia światowych programów badawczych, których celem jest wprowadzenie silników turbinowych w lotnictwie GA (GAP, SATS, ESPOSA), zakres pracy i opis stanu wiedzy na temat istoty momentów giroskopowych generowanych przez zespół napędowy samolotów GA. W rozdziale tym postawiono tezę pracy doktorskiej, która brzmi: *„Dla wszystkich lekkich samolotów turbośmigłowych powinno się przeprowadzić analizę wpływu efektów giroskopowych generowanych przez*

*jego zespół napędowy na stateczność dynamiczną oraz reakcję na manewry wywołane przez gwałtowne wychylenie sterów lub podmuchy wiatru”.*

W rozdziale drugim opisano najważniejsze problemy badawcze stateczności samolotów lekkich z napędem turbośmigłowym. Omówiono wiele podstawowych zjawisk jakie towarzyszą oddziaływaniu strumienia zaśmigłowego na główne zespoły samolotu.

W rozdziale trzecim przedstawiono metody modelowania fizycznego i matematycznego, model fizyczny, układy współrzędnych, model matematyczny do badań dynamicznej stateczności i odpowiedzi na gwałtowne manewry. Zamieszczono tamże bezwymiarowe pochodne aerodynamiczne niezbędne do prowadzenia analiz numerycznych. W następnym rozdziale (rozdział 4) omówiono tendencje rozwojowe na rynku samolotów lekkich, projekt ESPOSA, (Efficient Systems and Propulsions for Small Aircraft). Zasadniczym celem projektu ESPOSA jest opracowanie i rozwój innowacyjnych technologicznie silników turbinowych dla lekkich samolotów zasięgu regionalnego. Do badania wpływu efektów giroskopowych na dynamikę lekkiego samolotu z napędem turbinowym wybrano samolot PZL I-23 „Manager” który został zmodernizowany i dostosowany do kompaktowego silnika turbośmigłowego TP100. Nowe oznaczenie samolotu to I-31T. Różnica w geometrii samolotów I-23 „Menager” i I-31T odnosi się jedynie do części nosowej kadłuba. Obliczenia przeprowadzone dla I-31T i porównanie ich z wynikami analogicznych analiz dla I-23 „Menager” pozwoliły zbadać skutki zwiększenia mocy napędu oraz zmiany śmigła (z 2-na 5-łopatkowe) na charakterystyki stateczności. Równowaga i stateczność dynamiczna samolotu I-31T to tematyka rozdziału piątego pracy. W pierwszej części tego rozdziału dokonano analizy wpływu zmiany masy startowej i wpływu położenia środka masy na stateczność. Wpływ momentów giroskopowych, które wywoływane są przez wirujące elementy silnika został przez Doktorantkę uznany za mały i w dalszych rozważaniach pomijała go. Z tej przyczyny uznała, że wpływ efektów giroskopowych jest generowany jedynie przez pięcio – łopatkowe śmigło. Po przeprowadzeniu szeregu obliczeń dotyczących badania wpływu efektów giroskopowych na stateczność dynamiczną samolotów lekkich, można uznać, że ten wpływ jest na tyle mały, że jest w pełni akceptowalne nie uwzględnianie w modelu matematycznym sprzężeń odśmigłowych. Efekt giroskopowy może mieć znaczenie, gdy momenty bezwładności śmigła lub prędkość obrotowa śmigła są co do wartości dużo większe niż przyjęte do obliczeń dla samolotu I-31T.

Dalej w rozdziale piątym badano:

- wpływ wysokości lotu na stateczności samolotu;

- wpływ ustalonego wiatru poziomego na stateczność samolotu;
- wpływ ustalonego ślizgu na równowagę i stateczność samolotu;
- wpływ wiatru w locie ze ślizgiem na stateczność samolotu;
- wpływ kąta toru lotu na stateczność podczas wznoszenia;
- wpływ kąta toru lotu na stateczność podczas zniżania;
- ustalony zakręt prawidłowy.

W rozdziale szóstym przeprowadzono porównanie charakterystyk dynamicznych samolotu I-31T otrzymanych na podstawie dwóch pakietów obliczeniowych STB i SDSA dla wszystkich postaci ruchu. Analiza porównawcza wyników wykazała dużą zgodność w zakresie wszystkich postaci o oscylacyjnym charakterze ruchu samolotu, zadawalającą zgodność charakterystyk przechylenia i różnice o charakterze jakościowym dla spirali samolotu.

Rozdział siódmy to porównanie rezultatów symulacji z wynikami prób w locie przeprowadzonymi dla samolotu I-23, w zakresie stateczności dynamicznej. Wykorzystano pakiet SDSA do obliczeń charakterystyk dynamicznych samolotu. Moduł symulacyjny SDSA bazuje na nieliniowym modelu matematycznym ruchu samolotu o 6-ciu stopniach swobody. Stwierdzono, że oscylacje krótkookresowe samolotu I-31T są stateczne. Potwierdzona została wysoka zgodność badań symulacyjnych z wynikami prób w locie przeprowadzonymi dla prototypu samolotu I-23 „Manager”. Celem przeprowadzonych analiz w rozdziale ósmym było badanie wrażliwości stateczności dynamicznej samolotu oraz reakcji samolotu po wejściu w podmuch wiatru. Na podstawie uzyskanych wyników metodami analitycznego szacowania poziomu stateczności dynamicznej lekkich samolotów, zadaniem Doktorantki są one bardziej satysfakcjonujące w porównaniu z wynikami uzyskanymi w tunelu aerodynamicznym. W rozdziale dziewiątym przedstawiono reakcje samolotu na nagłe wychylenia steru wysokości, kierunku i lotek. Wychylenie powierzchni sterowych realizowano za pomocą funkcji – pojedynczy lub podwójny skok. Analizowano wpływ efektów giroskopowych na reakcje samolotu w manewrach oraz wpływ prędkości lotu na dynamikę po wychyleniu lotek. Na str. 153 zauważyłem błędny opis w tekście co do rysunków 9.18 i 9.19. Dalej w rozdziale tym analizowano wpływ wysokości lotu, wpływ położenia środka masy i wpływ masy na dynamikę samolotu. Reakcja samolotu na podmuchy (pionowy lub poziomy) to tematyka rozdziału dziesiątego. Przyjęto, że podmuch pionowy o profilu typu skok jednostkowy może działać na cały samolot, bądź tylko na skrzydła albo tylko na usterzenie poziome. W przypadku podmuchu bocznego, jego profil ma kształt skoku

jednostkowego działającego na cały samolot. Dodatni podmuch powoduje znaczne, ale bardzo szybko tłumione zaburzenia ruchu podłużnego. Uwzględnianie w równaniach ruchu samolotu sił giroskopowych pochodzących od zespołu napędowego nie wpływa na zaburzenia lotu w kanale podłużnym po wejściu samolotu w podmuch pionowy. Rozdział jedenasty zawiera wnioski i rekomendacje dla konstruktorów lekkich samolotów z napędem turbośmigłowym.

### 3. Ocena pracy

Zasadnicza wartość recenzowanej rozprawy polega na umiejętnym zastosowaniu przez Doktorantkę mgr inż. Ewę Cichocką formalizmu modelowania fizycznego i matematycznego ruchu lekkiego samolotu z turbinowym silnikiem śmigłowym (opis w rozdziale drugim i trzecim) oraz prowadzenia badań numerycznych wpływu efektów giroskopowych generowanych przez jego zespół napędowy na stateczność dynamiczną oraz reakcje na manewry wywołane przez gwałtowne wychylenie sterów lub podmuch wiatru.

Obszerna praca doktorska uzupełnia i systematyzuje stan wiedzy na temat zależności między siłami giroskopowymi generowanymi przez zespoły napędowe turbinowych silników śmigłowych a siłami opisującymi własności dynamiczne samolotów lekkich. To stwierdzenie udokumentowano w bibliografii pracy, powołując się w niej na wiele publikacji, które ukazywały się od zarania lotnictwa aż po czasy dzisiejsze. Badania numeryczne Doktorantka prowadziła z wykorzystaniem programów STB i SDSA stosowanych przez innych badaczy do analizowania problemów mechaniki lotu. Charakterystyki aerodynamiczne samolotu analizowano z wykorzystaniem oprogramowanie FLUENT. Praca ma charakter aplikacyjny o dużym znaczeniu praktycznym. Jej istotą jest to, iż składa się z części obliczeniowej – autorstwa Doktorantki, gdzie swoje wyniki porównywała z wynikami uzyskanymi przez innych autorów w badaniach tunelowych, i badaniach w locie. Powstała w ramach projektu ESPOSA, którego celem było opracowanie nowoczesnego silnika turbinowego charakteryzującego się zwartą, kompaktową i lekką konstrukcją. Samolot I-31T w pracy przyjęto jako reprezentanta lekkich konstrukcji lotniczych podlegających przepisom budowy samolotów CS23 lub FAR23. Płatowiec samolotu I-23 „Manager”. Doktorantka poszukiwała rozwiązań zagadnień bardzo praktycznych, o dużym znaczeniu poznawczym, mającym zastosowanie w rozwiązywaniu zagadnień stateczności dynamicznej samolotu. Prezentowane w pracy wyniki mają bardzo bogate odniesienie w literaturze w której

zawarte są analizy badań numerycznych i badań w locie. Przedstawiona rozprawa zawiera efektywne rozwiązania ważnego zagadnienia naukowego jakim jest „*Badanie wpływu efektów giroskopowych na dynamikę lekkiego samolotu z napędem turbinowym*”. Jej ważną cechą jest fakt, że może być wykorzystana w wielu obszarach badań zachowania się samolotu po gwałtownym wymuszeniu spowodowanym podmuchem lub zmianą konfiguracji samolotu (np. zrzutu uzbrojenia). Jej Autorka rozwiązała postawione zagadnienia stosując nowoczesne metody obliczeniowe oraz aparat matematyczny odpowiadający współczesnym pracą doktorskim. Wyniki pracy są wartościowe z punktu widzenia zastosowań inżynierskich. Wnioski ogólne i rekomendacje dla konstruktorów lekkich samolotów z napędem turbośmigłowym, zamieszczono w jedenastym rozdziale pracy. W pracy Doktorantka potwierdziła również wysoką użyteczność symulacyjnych metod badawczych, jako narzędzi do weryfikacji wyników otrzymanych metodami uproszczonymi. Metody te mogą być wykorzystane w pracach przygotowujących samolot do oblotu. Mimo wielu pochwał wyrażonych przeze mnie w recenzji co do merytorycznej strony pracy, stwierdzam, że jest i jej słabsza strona, a mianowicie błędy w tekście, we wzorach, tzw. literówki:

- str. 24 i 25 poczynając od wzoru 1.5 do wzoru 1.10 należy wyjaśnić i opisać na nowo, które indeksy są poprawne a które nie;
- czy po wzorze (1.5), zdanie „*co można zapisać jako*” jest prawdziwe ?, czy wzór (1.6) ma sens ?;
- str. 31, 6 linia od góry jest :*sformalizowany* – powinno być : *sformalizowana*;
- str. 31, 9 linia od góry jest: *przedstawionym formie* – powinno być: *przedstawionym w formie*;
- str. 44, 5 linia od dołu jest: *...samolotu polega rozwiązaniu...* powinno być *...samolotu polega na rozwiązaniu*;
- str. 45, 10 linia od dołu jest: „*przetawione*” powinno być: „*przedstawione*”;
- str. 133 styl: „*Wybrane do porównań obliczeniowe pochodne aerodynamiczne pokazały dobrą zgodność z wynikami pomiarów w badaniach tunelowych dają*”;
- str. 134, 5 linia do góry jest: „*że jednocześnie wychylono zostać*” – powinno być „*...wychylona...*”;
- str. 153, 16 linia od dołu – błędne zdanie „*Na Rys. 9.18 – 9.19 pokazano, że kąt przechylenia, a zatem równocześnie prędkość katowa pochylenia są tym większe, im mniejsza prędkość lotu.*”:

- str. 159 12 linia od góry – styl: „W stanie początkowym samolot znajduje się w stanie równowadze”.
- str. 175, 10 linia od góry – jest: „...innych...”, powinno być: ...inny...”.
- str. 175, 12 linia od góry – styl: „obejmującego tylko na płat górny”.
- str. 179, 10 linia od dołu – jest „maja”, powinno być: „mają”

#### 4. Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr inż. Ewy Cichockiej w zakresie mechaniki lotu a w szczególności badania stateczności statycznej i dynamicznej samolotu w różnych fazach jego lotu, recenzowana rozprawę oceniam bardzo wysoko. Autorka dowiodła, że posiada umiejętność właściwego formułowania problemów badawczych i umiejętność ich rozwiązywania. Mam pełne uznanie dla staranności i wnikliwości przeprowadzonych analiz stateczności dynamicznej, reakcji samolotu na gwałtowne manewry i podmuchy. Z uwagi na dużą aplikacyjność pracy proponuję wyróżnienie zgodnie z zasadami przyjętymi w Instytucie Lotnictwa.

Praca spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami „o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” i może stanowić podstawę dopuszczenia do egzaminu i publicznej obrony.

