

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Macieja Adamczyka
pt.

„Analiza wpływu układu wlotowego na niestateczność pracy
sprężarki osiowej silnika turbinowego”

wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa
Wojskowej Akademii Technicznej z dnia 28.04.2025 roku
na podstawie uchwały Rady Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” z dn. 16.04.2025 r.

Praca mgr inż. Macieja Adamczyka podnosi ważny problem badań niestateczności pracy sprężarek silnika turbinowego. Obecny poziom rozwoju napędów turboodrzutowych zapewnia z reguły bezpieczny (stateczny) tryb pracy, jednak od czasu do czasu pojawiają się informacje o różnego rodzaju problemach z silnikami turbinowymi, zarówno wśród samolotów cywilnych (komunikacyjnych) jak i wojskowych. Ponieważ stateczność pracy sprężarki zależy w dużym stopniu od zaburzeń na wlocie do silnika, co po części jest uzależnione od sposobu obsługi silnika przez załogę samolotu, temat pracy jest niezmiernie istotny z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowania tego rodzaju napędu a w konsekwencji bezpieczeństwa lotu. Autor wybrał jako obiekt badawczy układ wlotowy samolotu F-16 Fighting Falcon, jednak tematyka pracy jest bardziej ogólna i może być wykorzystana również w badaniach napędów samolotów cywilnych. Uważam zatem, że temat rozprawy jest aktualny, zarówno z technicznego oraz badawczego punktu widzenia oraz istotny w procesie badania nowych konstrukcji lotniczych, w szczególności układów wlotowych silników turbinowych oraz w przygotowywaniu zasad eksploatacji turbinowych zespołów napędowych.

Rozprawa podzielona jest na 5 rozdziałów głównych oraz spisy literatury, tabel, rysunków i ważniejszych oznaczeń stosowanych w tekście. Układ pracy, podział na rozdziały oraz przedstawione w zakończeniu wnioski są logiczne i klarowne. Praca jest zapisana na 201 stronach. W pracy zamieszczono 158 rysunków oraz 8 tablic z danymi i wynikami obliczeń. Bibliografia zawiera 137 pozycji, z czego 37 to pozycje książkowe, 63 to artykuły z czasopism naukowych a 18 publikacje w materiałach konferencyjnych. Ponadto zacytowano 39 pozycji internetowych oraz raportów technicznych. O ile pozycje książkowe to w większości klasyczne prace z zakresu budowy i eksploatacji silników turbinowych, o tyle cytowane artykuły to w znaczącej części prace aktualne (ostatnie dziesięciolecie) dotyczące problematyki zbliżonej do tematu rozprawy.

W Rozdz.1 (Niestateczna praca sprężarek w lotnictwie), w części pierwszej przedstawiono postawy teoretyczne niestatecznej pracy sprężarki oraz zjawiska pompażu. W części drugiej opisano przypadki utraty stateczności pracy sprężarki silnika odrzutowego w samolotach pasażerskich oraz bojowych, w tym F-16.

W Rozdz.2 (Obszary badań układów wlotowych w aspekcie wpływu na stateczność pracy sprężarek w lotniczych silnikach turbinowych) przedstawiono przegląd literatury z zakresu badań nad niestateczną pracą sprężarek, z którego wynika, że jednym z głównych obszarów badań to badania wlotów powietrza i układów wlot-sprężarka. Jednocześnie przeprowadzona analiza literatury dostarczyła kompleksowego przeglądu stanu wiedzy w dziedzinie badania układów wlotowych i niestatecznej pracy sprężarek w lotniczych silnikach turbinowych i umożliwiła postawienie celu i tezy niniejszej pracy. **Celem pracy** było opracowanie metodyki badań stateczności układu wlot-wentylator (sprężarka) dla turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem metod CFD. **Teza rozprawy** natomiast wskazywała na możliwość określenia, przy zastosowaniu opracowanej metodyki, zbioru parametrów i ich wartości, pozwalającej na identyfikację niestatecznej pracy lub pompażu. Jako obiekt badań przyjęto silnik F-100-PW229 samolotu F-16, dla którego stwierdzono brak badań nad stabilnością pracy zespołu napędowego, a w szczególności interferencji na linii wlot-wentylator.

W Rozdz.3 (Charakterystyka obiektu badawczego) przedstawiono możliwie szczegółowo obiekt badań, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyk pracy silnika i analizą układu wlotowego. Przygotowano model termodynamiczny silnika z wykorzystaniem oprogramowania GasTurb i wyznaczono optymalny punkt pracy silnika.

Rozdz.4 (Badanie układu wlotowego) definiuje cel badania, którym jest określenie zakresu wartości i pola ciśnienia na jego wyjściu, w przekroju przed wentylatorem silnika. Przedstawiono metody oceny pracy układów wlotowych, pokazano reprezentację geometrii obiektu w postaci numerycznej oraz wyniki analiz numerycznych wykonanych komercyjnym pakietem ANSYS Fluent.

Rozdz.5 (Badanie wentylatora) przedstawia obliczenia analityczne oraz badania numeryczne, w tym przyjęty model, prowadzące do analizy pracy wentylatora silnika w stanie ustalonym oraz nieustalonym. W rozdziale tym przedstawiono większość wyników będących następnie podstawą wniosków końcowych.

W „Zakończeniu” autor dokonuje podsumowania opracowanej metodyki badania stateczności pracy układu wlot-wentylator dla turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem metod numerycznej mechaniki płynów. Wskazuje również na wnioski i nową wiedzę dotyczącą pracy układów wlotowych silnika. Zwraca również uwagę na potencjalne zastosowanie w obszarze podnoszenia bezpieczeństwa eksploatacji samolotów F-16 w Siłach Powietrznych RP.

Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta

Uważam, że rozprawa doktorska wpisuje się w aktualny cykl badań prowadzonych zarówno w Polsce jak i na świecie.

Przeprowadzona przez autora analiza literatury dotyczącej niestatecznej pracy lotniczych silników turbinowych wykazała brak prac naukowych, zarówno w zakresie badań numerycznych, jak również eksperymentalnych dotyczących współpracy układu wlotowego samolotu F-16 z jego silnikiem. Jednocześnie w środowisku osób zajmujących się eksploatacją tych samolotów istnieje przekonanie o odporności zespołu napędowego na wystąpienie zjawisk niestatecznej pracy lub pompażu. Należy podkreślić, że takie zjawiska mogą być przyczyną niebezpiecznych zdarzeń lotniczych, w tym wyłączenia silnika w locie lub uszkodzenia jego podzespołów.

Samoloty bojowe, w tym również F-16, są szczególnie narażone na problemy związane ze stabilnością pracy silnika. Wynikają one z układu geometrycznego kanału wlotowego, który cechuje istotne wygięcie, oraz pracy w warunkach wykonywania forsownych manewrów. Brak dostępnych publikacji oraz ograniczona wiedza w Polsce w tym zakresie stanowiły przesłankę do podjęcia i zdefiniowania problemu badawczego, którego celem było zweryfikowanie, czy zespół napędowy rzeczywiście charakteryzuje się odpornością na zjawiska niestateczności pracy, oraz czy istnieje określony zakres parametrów lotu i pracy silnika turbinowego, który może doprowadzić do niestatecznej pracy.

Częstkowym problemem badawczym była analiza układu wlotowego pod kątem wpływu parametrów lotu na nierównomierność rozkładu pola parametrów, ze szczególnym uwzględnieniem przekroju wylotowego kanału (AIP – Aerodynamic Interface Plane). Parametry generowane na wyjściu z układu wlotowego mają istotne znaczenie z uwagi na pracę pozostałych podzespołów silnika.

W trakcie prowadzonych badań uzyskano potwierdzenie możliwości wystąpienia zjawisk niestatecznej pracy silnika (pompażu), w samolocie F-16. Odkrycie to stało się podstawą do sformułowania tezy badawczej zakładającej, że jest możliwe określenie na bazie analiz numerycznych zbioru parametrów i ich wartości, które dostarczą informacji o wejściu zespołu wentylatora silnika F-100-PW229 w niestateczną pracę lub pompaż.

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe autora należy uznać:

1. Odkrycie możliwości zjawisk niestatecznej pracy silnika wbrew powszechnemu przekonaniu o odporności zespołu napędowego na wystąpienie takich zjawisk.
2. Opracowanie metodyki wyznaczenia metodami numerycznymi parametrów, które informują o wejściu w stan niestatecznej pracy silnika.

Krytyczna ocena rozprawy

Praca jest napisana bardzo starannie i jedyną uwagą krytyczną jest brak szerszego odniesienia do różnych napędów turbowentylatorowych, pomimo podania wcześniejszych przykładów zjawisk niestateczności pracy również w samolotach pasażerskich. Zagadnienie pompażu analizowane przez autora dotyczy jedynie konkretnego samolotu bojowego. O ile zrozumiałe jest prowadzenie badań na jednym obiekcie, zwłaszcza przy wysokich kosztach

takich badań, to otwarte jest pytanie o przenaszalność opracowanej metodyki oraz przedstawionych wniosków.

W pracy nie dostrzegłem poważniejszych błędów merytorycznych czy metodycznych – praca jest efektem badań poprawnych warsztatowo i zgodnych ze współczesną wiedzą.

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 dalszym kontynuowaniu tej tematyki badawczej.

W podsumowaniu swojej recenzji stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego wpisującego się w zakres inżynierii mechanicznej. Wskazuje jednoznacznie na dobre opanowanie przez autora zagadnień dotyczących analiz numerycznych przepływów wewnętrznych w silnikach oraz szeroką wiedzę na temat stateczności pracy zespołów sprężarkowych silników turbinowych. Tym samym spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce”, wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Macieja Adamczyka do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Wniosek o wyróżnienie pracy

Ze względu na bardzo duże znaczenie wyników pracy w technice lotniczej, zwłaszcza zagadnieniach bezpieczeństwa oraz unikalność przedstawionego rozwiązania proponuję rozprawę wyróżnić.



Tomasz Goetzendorf-Grabowski