

# Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Drężka pt. Surrogate model-based aerodynamic optimization of aircraft engine air-intake duct

dr hab. inż. Radosław Przysowa

20 marca 2023

## 1 Wprowadzenie

Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Drężka poświęcona jest metodom optymalizacji kształtu wlotu powietrza do silnika turbośmigłowego z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów (CFD) i modelu zastępczego typu Kriging. Celem optymalizacji było zmniejszenie straty ciśnienia i zwiększenie jednorodności strumienia wpływającego do silnika. Warto podkreślić, że wlot powietrza samolotu I-31T charakteryzuje się złożoną geometrią o przekroju podłużnym w kształcie litery U. Podjęty w pracy problem badawczy ma znaczenie naukowe, ponieważ wymaga zastosowania zaawansowanego aparatu matematycznego. Jego rozwiązanie ma dużą wartość praktyczną, ponieważ umożliwia efektywne zastosowanie silnika turbośmigłowego o prostym przepływie w samolocie w układzie traktor. Tematyka badań dobrze się wpisuje w panujące w lotnictwie trendy do poprawy sprawności samolotów i silników oraz redukcji ich wpływu na środowisko. Rozprawa jest wynikiem doktoratu wdrożeniowego prowadzonego wspólnie przez Politechnikę Warszawską i Sieć Badawczą Łukasiewicz - Instytut Lotnictwa.

## 2 Treść rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska jest napisana w języku angielskim i składa się z sześciu rozdziałów spisanych na 125 stronach. Rozdziały poprzedzono spisem treści, streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisami tabel, rysunków, akronimów i symboli. Literatura obejmuje 202 pozycje. Rozprawę zredagowano w dobrym stylu, zgodnie z zasadami redakcyjnymi ogólnie przyjętymi dla tekstów naukowych w języku angielskim. Ilustracje, tabele i wzory są czytelne, dobrze wykonane i są do nich odpowiednie odwołania.

Rozdział 1 (Introduction) zawiera motywację i cel badań, a także krótkie wprowadzenie do zagadnień podjętego problemu badawczego. Rozdział 2 (Review of aerodynamic optimization aspects) jest szczegółowym przeglądem literatury w zakresie metod optymalizacji aerodynamicznej oraz parametryzacji geometrii i morfingu. Rozdział 3 (Mathematical framework) opisuje aparat matematyczny zaproponowany w pracy do zadania optymalizacji wlotu. Rozdział 4 (Application: Case study 1) przedstawia wstępne wyniki optymalizacji wlotu samolotu I-31T. W rozdziale 5 (Application: Case study 2) zaprezentowano główne wyniki pracy, obejmujące rozszerzenie zagadnienia do trzech różnych warunków lotu, walidację metamodelu, analizę wrażliwości i prezentację rozwiązania. W rozdziale 6 (Epilogue) zawarto podsumowanie, wnioski i propozycje dalszych badań.

Objętość rozprawy jest optymalna. Należy docenić precyzję języka i jasność przekazu. Tekst jest zrozumiały, logiczny i dobrze zorganizowany, zapewniający udokumentowanie rozwiązania problemu naukowego w zwięzłej formie.

## 3 Ocena merytoryczna

Autor wykonał złożone zadanie optymalizacji dwukryterialnej kanału wlotowego silnika turbośmigłowego dla dwóch przypadków: 1) dla punktu projektowego, 2) w trzech wybranych warunkach lotu. W tym celu opracował zestaw narzędzi (framework) oparty o metamodel typu uniwersalny Kriging, próbkowanie Latin Hypercube i morfing siatki. Do wykonania obliczeń autor wykorzystał pakiet ANSYS CFX i publicznie dostępne biblioteki języka R i Python. Do odnalezienia globalnego minimum zastosowano metodę Expected improvement, a następnie algorytm genetyczny do poprawienia rozwiązania przez lokalne poszukiwania. Mimo, że są to typowe metody i narzędzia stosowane w zadaniach optymalizacji przepływów, zaproponowane podejście i architektura obliczeniowa oparte są o zaawansowany aparat matematyczny i zostały zaimplementowane i zweryfikowane w sposób twórczy, potwierdzający biegłość autora w dziedzinie obliczeń numerycznych i uczenia maszynowego. Podjęte w pracy decyzje związane z wyborem modeli i narzędzi obliczeniowych są racjonalne i na ogół poparte

walidacją i analizą. Złożoność rozwiązywanego problemu dwukryterialnej optymalizacji w trzech punktach oraz przemyślana, podbudowana teoretycznie i zweryfikowana architektura obliczeniowa sprawiają, że prezentowane rozwiązanie należy uznać za oryginalne osiągnięcie naukowe.

Rozdział 2 wprowadza czytelnika w zagadnienia optymalizacji i uzasadnia dobór wykorzystanych narzędzi. Dzięki powszechności stosowania modelu Kriging i licznym publikacjom na ten temat, doktorant twórczo wykorzystał w pracy doświadczenia zebrane przez innych badaczy. Kanaly o przekroju U są często stosowane w technice up. w wyciennikach ciepła i dyfuzorach sprężarek promieniowych. Obszerny przegląd literatury w zakresie optymalizacji zawarty w rozprawie, odwołujący się do licznych prac z całego świata, należy zaliczyć do osiągnięć autora, bo potwierdza ważną umiejętność pracy ze źródłami. Pozostawia on jednak pewien niedosyt, ponieważ w zakresie metod modelowania i optymalizacji wlotów i kanałów o kształcie S i U analiza źródeł nie jest pogłębiona i sprowadza się do zestawienia podejść w tabeli 1. Ponadto tekst nie definiuje luki badawczej (oprócz paru słów w rozdziale 5 na str. 77), więc nie jest wskazane wprost jak bardzo proponowane podejście różni się od wcześniej stosowanych. Elementy te znalazłem w publikacji autora w czasopiśmie [174], która prezentuje wyniki dla wariantu podstawowego z rozdziału 4. Szkoda, że nie zostały umieszczone w rozprawie.

Wyczerpująco i w jasny sposób przedstawiono w pracy zagadnienia optymalizacji, ale opisy metod i wyników modelowania wlotu nie są zbyt szczegółowe i zapewne trzeba się zapoznać z cytowanymi publikacjami zespołu Instytutu Lotnictwa, aby dowiedzieć się więcej. Badano 3 warianty siatki (str. 62) i po wstępnej analizie wyników wybrano z nich pośredni (8 100 000 komórek). Następnie po analizie spadku ciśnienia wzdłuż długości wlotu (rys. 19) wybrano jeszcze rzadszą siatkę zawierającą 1 441 000 komórek. Model CFD poddano walidacji pod kątem modelowania turbulencji różnymi metodami (podrozdział 4.42), porównując je z wynikami eksperymentu opublikowanymi przez Azzola et al. W związku z morfingiem siatki wykonano analizę jej ortogonalności (podrozdział 4.6.1), ważną dla poprawności rozwiązania. Zauważyłem jednak, że histogram z rys. 24 i rozkład z rysunku 25 nie prezentują tego samego kąta.

O ile rozwiązanie podstawowe przedstawione w rozdziale 4 jest ciekawym przykładem zastosowania zaawansowanych metod optymalizacji, to wyniki rozdziału 5 są dużym krokiem naprzód. Zadanie optymalizacji rozszerzono do trzech punktów pracy wlotu, zmodyfikowano liczbę parametrów, a także podparto walidacją i analizą wrażliwości metamodelu oraz przekonującą prezentacją wyników obliczeń. Działania to doprowadziły do uzyskania lepszego i wiarygodnego rozwiązania, ale również potwierdziły biegłość autora w prowadzeniu badań.

Wyniki pracy przedstawione w rozdziałach 4 i 5 są na wysokim poziomie merytorycznym, ale w niewielkim stopniu porównano je z innymi publikacjami. Rozprawa zyskałaby znacznie na wartości, gdyby obok podsumowania zawarto dyskusję z szerszą oceną wyników, porównaniem różnych podejść i wskazaniem zalet i ograniczeń przyjętego podejścia. Ponadto w żaden sposób nie są zmierzone deklarowane oszczędności mocy obliczeniowej. Podano jedynie liczbę próbkowanych punktów bez analizy czasu obliczeń i informacji nt. wykorzystywanego klastra.

Rozprawa od strony redakcyjnej opracowana jest starannie, ale można znaleźć kilka niedociągnięć, np. rys. 19 jest w złej kolejności, bo odwołanie do niego znajduje się po rys. 20. Ortografia (spelling) jest poprawna, ale sporadycznie zdarzają się drobne błędy językowe np. 'This work focus on', 'duct skin fiction' czy 'most simple'. Jest ich dosłownie kilka w całej książce, więc nie utrudniają odbioru dzieła. W spisie akronimów brakuje ważnych pozycji tj. AIP, CFD, DoE, GP i UK, ale są one prawidłowo zdefiniowane w tekście. Pozycje literatury są liczne, aktualne, dobrze dobrane i właściwie cytowane. Szkoda, że w małym stopniu uwzględniony został dorobek polskich autorów.

Podsumowując, należy wysoko ocenić zarówno wykonane badania jak i dokumentującą je rozprawę. Zalety pracy zdecydowanie przeważają nad wskazanymi niedociągnięciami.

## 4 Uwagi i pytania

1. Przepływ przez wlot jest symetryczny, co widoczne jest na wielu prezentowanych wykresach i schematach. Czy model CFD korzysta z tej symetrii i obejmuje połowę objętości wlotu? Jeśli nie to dlaczego?
2. Na str. 4-6 przeanalizowano na podstawie literatury wpływ asymetrii przepływu we wlocie silnika na zapas statecznej pracy sprężarek (surge margin). Czy silnik TP100 został przebadany pod kątem pompażu sprężarki i wrażliwości na asymetrię przepływu we wlocie? Jak się ma uzyskany wynik współczynnika zniekształcenia przepływu do rzeczywistego marginesu bezpieczeństwa?
3. Jak technicznie zrealizowano optymalizację dla trzech zakresów lotu naraz? Oczywiście nie było to trzykrotne uruchomienie procedury optymalizacji. Do funkcji ASF dodano w rozdziale 5 nowy wymiar, ale metamodel badany jest tam w taki sposób jakby przestrzeń się nie powiększyła. Dlaczego liczba próbek wybrana w rozdziale 4 wynosi  $p+1=9$ , a w rozdziale piątym więcej niż 10p, czyli 126?
4. Proszę o podanie informacji nt. zużycia mocy obliczeniowej w obu przypadkach i oszacowania uzyskanych oszczędności w wyniku wprowadzonych zmian (t.j. zwiększenia, a potem redukcji liczby parametrów). Ile ostatecznie było próbek (wywołań solvera CFD) w rozdziale 4 i 5?

5. Dlaczego w rozdziale 5 skupiono się na zmianie liczby parametrów, a nie rozważano zastosowania innego typu metamodelu niż Kriging? Jaki czynnik zdaniem doktoranta ma większy wpływ na czas uzyskania rozwiązania - wymiar przestrzeni, gęstość próbkowania czy efektywność algorytmu poszukującego minimum?
6. Tabela 1 pokazuje, że Kriging jest najczęściej wykorzystywany do optymalizacji przepływów przez zakrzywione kanały i innych zagadnień, więc jest zapewne najlepiej przebadanym statystycznie modelem zastępczym. Proszę o odniesienie uzyskanych wyników walidacji metamodelu z podrozdziału 5.3 do wybranych źródeł.
7. Jakie są korzyści i wady zastosowania transformacji pierwiastkiem sześciennym (str. 86-87)? Jak na uzyskanie optymalnego rozwiązania wpływają pojedyncze punkty skrajne metamodelu, które są na ogół dalekie od końcowego minimum?
8. Rys. 38 przedstawia proces optymalizacji i osiągnięcie kryterium zbieżności. Kryterium to pojawia się w pseudokodzie w rozdziale 3 (str. 50), ale nie jest wprost zdefiniowane. Proszę wyjaśnić jakie przyjęto kryterium zbieżności rozwiązania.
9. Proszę o wnioski i rekomendacje nt. wyboru liczby punktów i miejsc morfingu siatki. Wyniki analizy wrażliwości FANOVA pokazały, że decydujący był punkt dodany w drugim etapie badań, a nie punkty w miejscu największej krzywizny kanału.
10. Jak się ma uzyskany wynik optymalizacji w stosunku do błędów obliczeń i niepewności wymiarowej przy wykonaniu wlotu?

## 5 Podsumowanie

W rozprawie doktorskiej przedstawiono oryginalne rozwiązanie prawidłowo zdefiniowanego problemu badawczego polegającego na dwukryterialnej optymalizacji geometrii wlotu. Głównym osiągnięciem pracy jest zaprojektowanie, implementacja i walidacja złożonej architektury obliczeniowej opartej o model zastępczy. Najważniejszymi dokonaniem doktoranta było:

- sformułowanie problemu dwukryterialnej optymalizacji w trzech punktach z wykorzystaniem funkcji skalarizującej Czebyszewa,
- dwuetapowe poszukiwanie rozwiązania, tj. globalna eksploracja i lokalna eksploatacja,
- walidacja krzyżowa modelu zastępczego i analiza wrażliwości,
- uzyskanie istotnej poprawy spadku ciśnienia i współczynnika zniekształcenia przepływu, mimo przyjęcia wejściowej geometrii, która już wcześniej była optymalizowana.

Przyjęty przedmiot i cel rozprawy sprawia, że jej zakwalifikowanie do dyscypliny inżynieria mechaniczna nie budzi wątpliwości. Zawartość rozprawy potwierdza wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie. Analizowany problem jest dość trudny teoretycznie i wymaga umiejętności sprawnego posługiwania się aparatem matematycznym oraz narzędziami obliczeniowymi. Uzyskanie poprawnego rozwiązania świadczy o dobrym przygotowaniu i dojrzałości badawczej Doktoranta.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra Przemysława Drężka spełnia wymagania wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm) oraz mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Radosław Pyszora

Warszawa, 20 marca 2023

