

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

Warszawa 19.09.2018.

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

(na zlecenie Rady Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii  
Technicznej w Warszawie - pismo z dnia 02.06.2018 r.)

Tytuł rozprawy:           ANALIZA NUMERYCZNA I DOŚWIADCZALNA  
                                  PROBLEMÓW STATYKI I DYNAMIKI  
                                  CIENKOŚCIENNYCH STRUKTUR LOTNICZYCH

Autor rozprawy:         mgr inż. Tomasz ŁĄCKI

Promotor rozprawy:    prof. dr hab. inż. Aleksander OLEJNIK

### **1. Charakterystyka pracy**

Podjęta problematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Łackiego dotyczy bardzo istotnej kwestii związanej z prowadzeniem analiz numerycznych cienkościennych konstrukcji struktur lotniczych oraz ich weryfikacją przy wykorzystaniu badań eksperymentalnych. Rozprawa ma charakter analityczno-eksperymentalny i dotyczy prób statycznych i dynamicznych wybranych konstrukcji lotniczych. Dowodowe próby statyczne stanowią bardzo istotną część procesu projektowania samolotu przed wdrożeniem go do produkcji oraz w dalszej kolejności – jego sprzedaży. Pozytywne przejście wszystkich prób wymiarujących zespoły konstrukcyjne samolotu i cały samolot jest warunkiem uzyskania pozwolenia na wykonanie lotów dla egzemplarza prototypowego, a tym samym otwarcie procesu prób w locie. Zaliczenie prób przewidzianych programem - prób statycznych i dynamicznych - jest też podstawą do ubiegania się o certyfikat typu, co pozwala na komercyjną sprzedaż samolotu.

Ze względu na dużą pracochłonność związaną przygotowaniem pojedynczej próby, proces wykonania prób statycznych jest bardzo kosztowny i czasochłonny. Wpływ na to mają: układy obciążające, które dla każdej próby muszą zostać zaprojektowane indywidualnie, oraz proces wykonania dźwigni, cięgieł oraz ich montaż.

### **2. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł i formułowania wniosków**

Recenzowana rozprawa zawiera 53 pozycje literaturowe, spośród których zdecydowana większość została opublikowana w ciągu ostatnich dwóch dekad. Zakres tematyczny należy uznać za właściwy do realizacji niniejszej rozprawy.

Pewnego rodzaju nieprawidłowością jest sposób prezentacji literatury, głównie od strony redakcyjnej. Chodzi o brak wcięcia za numeracją poszczególnych pozycji literatury, co czyni ją mało czytelną.

W dodatku wskazanym było oddzielenie literatury zasadniczej od wykorzystanych stron internetowych, czy wąskich opracowań własnych (nie zawsze Autorskich), które w zasadzie trudno traktować jako oddzielne pozycje literaturowe - są to opracowania konkretnych, dość wąskich zagadnień w ramach prowadzonych projektów, których wyniki (wykresy) zamieszczono w tekście rozprawy. Z tych względów bardziej racjonalnym było ich opisanie, np. formie przypisów. Pozycji tych jest dość sporo (30) i można odczuć wrażenie sztucznego zwiększania ilości pozycji literaturowych.

Ponadto, na uwagę zasługuje fakt, że prezentowany przegląd literaturowy, oprócz pozycji krajowych, zawiera pozycje o zasięgu międzynarodowym.

Można zatem stwierdzić, że przeprowadzona analiza źródeł - literatury przedmiotu - jest dość wąska, ale wystarczająca do przeprowadzenia planowanych analiz numerycznych i badań eksperymentalnych.

### **3. Rozwiązanie postawionego zadania w rozprawie**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy ogółem 168 stron. Składa się z ośmiu rozdziałów, w skład których wchodzi: wstęp, sformułowanie tezy i przedstawienie problemu badawczego, obliczenia obciążeń zewnętrznych, obliczenia numeryczne samolotów, badania doświadczalne samolotów, wyniki obliczeń numerycznych drgań własnych rozpatrywanych konstrukcji, wnioski oraz wykaz literatury. W przedstawionym spisie treści nie zamieszczono spisu ważniejszych oznaczeń i symboli, które występują w rozprawie od strony 4 do 6 oraz brak jest spisu rysunków i tabel, co w zasadzie nie jest wymagane w tego rodzaju pracach, ale znacznie ułatwia dostęp do poszczególnych rysunków czy tabel.

Nadmienić jednak należy, że w załączniku do rozprawy doktorskiej zamieszczono 30 tabel (do rozdziału 3 rozprawy) z danymi do obliczeń i wynikami obliczeń obciążeń analizowanych konstrukcji lotniczych oraz 2 tabele do rozdziału 4 rozprawy - jedna zawierająca zestawienie sił skupionych, aerodynamicznych i masowych, zredukowanych do siatki modelu numerycznego samolotu OSA z usterzeniem motylkowym i druga, zawierająca te same informacje, ale dla samolotu OSA z usterzeniem klasycznym.

Spis ważniejszych oznaczeń i symboli jest niekompletny, np. m.in. brakuje:  $b$  - występujące w zależności (3.15),  $b_f$  - na rys. 3.5,  $A_R$  - w zależnościach (3.18 do 3.21),  $C_{do}$  - zależność (3.20 i 3.22),  $C_m$  - zależność (3.21) itd.

Kilka parametrów występuje pod kilkoma oznaczeniami, a brak jest tej informacji w spisie, np.:  $\nu$  - jest opisany jako współczynnik bezpieczeństwa, zaś tekście pojawia się również jako współczynnik Poissona.

Poza tym wykaz ten nie jest opisany w porządku alfabetycznym, co istotnie utrudnia wyszukiwanie poszczególnych oznaczeń i symboli. Brak jest jednostek przy opisach poszczególnych oznaczeń. Uważam, że wskazane byłoby rozdzielenie wykazu na

oznaczenia i indeksy oddzielnie, co istotnie poprawiłoby ich czytelność oraz uniknęłyby się powtarzania tego samego oznaczenia, ale z innym ideksem. W dodatku brak jest wykazu zastosowanych skrótów, których w rozprawie jest dość sporo np. VLA, OCP, LAR1, WZL-2, CFD, FAA (Federal Aviation Administration). itd. Oczywiście większość z nich jest powszechnie stosowana i nie budzie wątpliwości jak np. samolot typu VLA, czyli Very Light Aircraft. Nie zwalnia to jednak Autora od pełnego ich opisywania, chociażby ze względu na możliwość przeglądania tego rodzaju prac przez osoby nie do końca z branży lotniczej.

Rozdział 1 jest jednocześnie wstępem, który rozpoczyna się od wprowadzenia, gdzie podkreślono wagę wykonywania prób statycznych nowoprojektowanych statków powietrznych oraz jaki jest zasadniczy cel ich wykonywania. Wskazano na istotny wpływ jakości przygotowywanych prób statycznych oraz potrzebę wykonywania obliczeń numerycznych przed tymi próbami. Jednocześnie wskazano na wpływ badań statycznych, na jakość kolejnych obliczeń numerycznych. W dalszej części wstępu przedstawiono struktury badanych statków powietrznych, gdzie opisano:

- samolot OSA – dwumiejscowy, lekki samolot sportowy typu VLA;
- samolot Flaris – kompozytowy typu business jet;
- samolot bezzałogowy OCP – odrzutowy cel powietrzny.

W sumie rozdział ten zawarto na 14 stronach, z czego ponad połowę stanowią rysunki. Na uwagę zasługuje fakt raczej zbędnego zamieszczenia rysunków konstrukcyjnych samolotu OSA, których czytelność – przy tej skali – jest bardzo słaba. Wskazaniem było, jeżeli już Autor chciał je zamieścić, dołączyć w postaci załączników i w skali, która gwarantowałaby ich czytelność.

Rozdział 2 to sformułowanie tezy i postawienie problemu badawczego. Przed samym sformułowaniem tezy rozprawy Autor zaprezentował zalety i wagę projektowania numerycznego z wykorzystaniem systemów CAD, których efektem jest minimalizacja pomyłek i kolizji przy projektowaniu poszczególnych zespołów konstrukcyjnych. Drobną uwagę dotyczy prezentowanego celu pracy, który – po analizie całej pracy – powinien zawierać cel naukowy, który Autor w zasadzie określił – dotyczy określenia przydatności numerycznych metod obliczeniowych do przeprowadzenia analiz dowodowych struktur SP oraz cel drugi, badawczy, który oparty jest o badania doświadczalne i weryfikację wcześniej wykorzystywanych metod numerycznych. W sumie rozdział ten zawarto na niecałych 2-ach stronach rozprawy.

W rozdziale 3 pt.: „Obliczenia obciążeń zewnętrznych”, Autor dokonał przeglądu rodzaju obciążeń zewnętrznych, koniecznych do uwzględnienia podczas procesu projektowania konstrukcji lotniczych. Kolejnym elementem jest wyznaczenie obwiedni obciążeń dopuszczalnych, w którym, w pierwszej kolejności przedstawiono niezbędne zależności matematyczne, a następnie graficzne prezentacje obwiedni poszczególnych samolotów: samolotu OSA, OCP, Flaris LAR1. Drobną uwagę, to brak opisów poszczególnych prędkości na rysunkach prezentujących obwiednie – są ich wartości, ale brak jest ich opisów (nazw). W dalszej części przedstawiono obliczenia obciążeń zewnętrznych – zastosowane metody, gdzie przedstawiono:

- obliczenia obciążeń skrzydeł, do której wykorzystano metodę linii wirowej,

- obliczenia obciążeń usterzenia poziomego, gdzie do obliczeń obciążeń samolotu OSA i OCP wykorzystano metodę klasyczną, zaś do samolotu Flaris metodę vortex lattice. Dodatkowo dokonano skrótowego porównania wyników uzyskanych metodą klasyczną i sieci wirowych na przykładzie samolotu OSA;
- obliczenia obciążeń kadłuba, w których wykorzystano standardowe zależności wykorzystywane do obliczeń belki o zmiennej sztywności i podpartej w okuciach skrzydło-kadłub, obciążanej siłami reakcji od innych zespołów konstrukcyjnych, siłami bezwładności oraz różnicą ciśnień wewnątrz i na zewnątrz kadłuba.

Następnie dokonano obliczeń obciążeń dla analizowanych konstrukcji SP, których wyniki zaprezentowano graficznie na wykresach oraz w tabelach.

W sumie rozdział zawarto na 44 stronach rozprawy.

Rozdział 4 stanowią obliczenia numeryczne, gdzie na wstępie przedstawiono bardzo skrótowo historię metody elementów skończonych oraz zasady podejścia do obliczeń tą metodą dla różnych elementów. Następnie przedstawiono modele numeryczne samolotu OSA, OCP i Flaris, przy czym dla samolotu OSA i Flaris ograniczono się tylko do skrzydła i jego podzespołów. W dalszej części zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych dla wybranych przypadków obciążeń i rozpatrywanych konstrukcji. Uzyskane wyniki z przeprowadzonych analiz przedstawiono graficznie w sposób bardzo interesujący i czytelny. Tego rodzaju materiał jest bardzo ciekawy i dość precyzyjnie pokazuje miejsca nadmiernych naprężeń od poszczególnych obciążeń analizowanych konstrukcji. Rozdział ten jest z mojego punktu widzenia bardzo wartościowy i jeden z istotniejszych elementów niniejszej rozprawy. Rozdział ten zawarto na 39 stronach.

W rozdziale 5 pt.: „Badania doświadczalne samolotów”, we wstępie opisano cel prowadzenia tego rodzaju badań oraz podstawowe zasady ich prowadzenia, podkreślając przy tym ich dużą komplikację, ale i wagę. W dalszej kolejności przedstawiono realizację badań doświadczalnych dla skrzydła samolotu OSA, gdzie graficznie pokazano arkusz obciążeń skrzydła z obwiedni obciążeń w locie, schemat wykonania próby oraz uzyskane wyniki. Dodatkowo zamieszczono fotografie z realizowanych prób i sposobów pomiaru ugięć. Ponadto opisano przeprowadzone badania z wykorzystaniem tensometrów, które pozwoliły na określenie odkształceń w funkcji obciążeń zadanych. Kolejnym były badania doświadczalne samolotu OCP, których zakres był podobny do poprzedniego, przy czym dodatkowo obciążano kadłub i usterzenie samolotu. Siły do skrzydeł i usterzenia przykładano za pomocą obejm, a dla kadłuba za pomocą przylepców. Nie uwzględniano natomiast prób tensometrycznych. Dla samolotu Flaris próby realizowano podobnie jak dla OCP. Wyniki z tych prób przedstawiono w tabelach, natomiast sposób realizacji na rysunkach i fotografiach. Dla samolotu Flaris podczas próby, dodatkowo dokonano pomiaru skręcenia skrzydła. Zakończenie tego rozdziału to analiza porównująca wyniki badań doświadczalnych z numerycznymi. Wykazano, że najlepsza korelacja uzyskanych wyników jest dla samolotu Flaris – sięgała 11,43%, co może wynikać, jak podał Autor, ze znacznie większych rozmiarów tego samolotu w stosunku do samolotu OCP, dla którego korelacja była najgorsza – sięgnęła 85,19%. Dla samolotu OSA wskaźnik korelacji wynosił 26,08%. Należy podkreślić, że uzyskane wskaźniki korelacji dla samolotu OSA i szczególnie

OCP nie pozwalają na bezpośrednie wykorzystanie modeli numerycznych do określenia faktycznych obciążeń podzespołów samolotów. Jedynie dla dużej konstrukcji kompozytowej, jakim jest samolot Flaris, wskaźnik jest na poziomie sugerującym możliwość wykorzystania modelu numerycznego do obliczeń dowodowych. Ten bardzo interesujący rozdział zawarto na 38 stronach rozprawy.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych drgań własnych rozpatrywanych konstrukcji. We wstępie przybliżono istotę badań rezonansowych oraz cel ich stosowania, a dodatkowo podkreślono ich konieczność przy procesie certyfikacji. Wspomniano także o dużych nakładach czasowych i kosztach, co komplikuje istotnie ich realizację. Z tych względów dość często wykorzystuje się metody numeryczne do wyznaczania częstotliwości drgań własnych poszczególnych podzespołów samolotu. Pozwalają one na wyznaczanie tych częstotliwości, postaci drgań oraz linii węzłowych. Wstęp tego rozdziału prezentuje przykładowe obliczenia analityczne i numeryczne drgań prostokątnej płyty, które wykazały niewielkie różnice pomiędzy uzyskanymi częstotliwościami i ich wzrost wraz ze wzrostem częstotliwości drgań własnych. Stąd trafny wniosek Autora, że metody numeryczne mogą stanowić przybliżenie metod doświadczalnych i pozwalają na szybką analizę złożonych układów konstrukcyjnych. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych drgań własnych dla poszczególnych samolotów, przy wykorzystaniu wcześniej opracowanych (do obliczeń wytrzymałościowych) modeli numerycznych. Przy czym dla samolotu OSA dokonano analizy dla dwóch wariantów konstrukcyjnych, tj. samolotu z usterzeniem motylkowym i klasycznym. Wyniki przedstawiono na rysunkach prezentujących wizualizacje postaci drgań własnych samolotu OSA dla różnych form obciążeń i kilku wybranych częstotliwości. Nie stwierdzono istotnych różnic dla obu konstrukcji, co – zdaniem Autora – wynika z niewielkich sprzężeń pomiędzy drgającymi zespołami płatowca. Podobnie przeprowadzono obliczenia dla skrzydła samolotu OCP i Flaris. Na zakończenie rozdziału przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, w których wyznaczono częstotliwości drgań własnych skrzydeł poszczególnych samolotów. Dokonano także porównania uzyskanych wyników podczas badań doświadczalnych i numerycznych, a ich faktyczne wartości przedstawiono w tabelach. Wykazano, że największe różnice częstotliwości drgań własnych są dla samolotu Flaris, co – zdaniem Autora – jest wynikiem nie wykorzystania rzeczywistych własności kompozytów. W sumie rozdział ten zawarto na 19 stronach rozprawy.

Kolejny rozdział to wnioski, w których Autor jednoznacznie stwierdził wyższość badań doświadczalnych nad numerycznymi, co powoduje, że próby doświadczalne są i nadal będą głównym i ostatecznym sposobem dowodzenia faktycznych wytrzymałości konstrukcji lotniczych. W dalszej części wniosków wskazano na coraz częstsze próby zastępowania badań doświadczalnych numerycznymi, ale tylko w bardzo ograniczonych przypadkach i do mniej ważnych zespołów. Wskazano przy tym, że uzyskane wyniki z badań porównawczych odkształceń analizowanych konstrukcji, wykazują dużą korelację dla konstrukcji kompozytowych, dużych – samolot Flaris, a najmniejszą dla konstrukcji metalowej zastosowanej w samolocie OSA. Na zakończenie wniosków wskazano na koszty

i czas realizacji metod numerycznych, co czyni je bardzo atrakcyjnymi i sugeruje potrzebę dalszego ich rozwijania. Autor wskazał także na potrzebę stworzenia platformy wymiany doświadczeń pomiędzy osobami zajmującymi się obliczeniami numerycznymi i badaniami doświadczalnymi, zwiększenia nakładów na szkolenia w zakresie wykorzystywania metod numerycznych, organizacji konferencji bezpieczeństwa i omawianie błędów stwierdzanych podczas występowania zdarzeń lotniczych.

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

#### **4. Oryginalność rozprawy – samodzielny dorobek Autora**

Oryginalnym osiągnięciem Autora jest:

- wyznaczenie obwiedni obciążeń dopuszczalnych dla poszczególnych konstrukcji lotniczych, tj. samolotu OSA, OCP i Flaris;
- przeprowadzenie obliczeń obciążeń zewnętrznych poszczególnych zespołów analizowanych konstrukcji lotniczych;
- opracowanie modeli numerycznych analizowanych konstrukcji lotniczych i wykonanie z ich wykorzystaniem obliczeń numerycznych;
- opisanie i zaprezentowanie przeprowadzonych badań doświadczalnych;
- przeprowadzenie obliczeń numerycznych drgań własnych skrzydeł analizowanych konstrukcji lotniczych.

Wątpliwości budzi tylko fakt, czy aby wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia są Autorskie, ponieważ niektóre elementy opisane w rozprawie zostały przedstawione w spisie literatury, jako opracowania własne, ale współautorskie. W pracy nie rozdzielono wyraźnie osobistego wkładu Autora w poszczególne badania i obliczenia.

Nadmienić jednak należy, że niniejsza rozprawa ma bardzo szeroki zakres tematyczny, co sugeruje dość szeroką wiedzę Autora, stawiająca Go w gronie wysokiej klasy specjalistów projektujących konstrukcje lotnicze.

#### **5. Uwagi ogólne**

Sposób realizacji pracy z merytorycznego punktu widzenia nie budzi większych zastrzeżeń. Autor nie ustrzegł się jednak wielu istotnych błędów, głównie natury redakcyjnej, jak tzw. literówki, pozostawianie tzw. „sierot” na końcach wierszy itp. A ponadto do istotnych należy zaliczyć:

- brak opisu wielu oznaczeń i skrótów użytych w treści analizowanej rozprawy, których przykłady przedstawiono już podczas omawiania „Spisu ważniejszych oznaczeń i symboli” podczas opisu zakresu rozprawy;
- słaba czytelność oraz jakość niektórych rysunków, szczególnie od rys. 1.2 do rys. 1.5, rys. 3.5 rys. 5.2, rys. 5.10, rys. 5.13. Natomiast mała czytelność rys. 6.3, do rys. 6.18, wynika z przyjętej (zbyt małej) skali ich prezentacji. W dodatku występują błędne

numery rysunków na str. 155, dotyczy: rys. 5.16 - powinien być 6.16, rys. 5.17 - powinien być 6.17 i rys. 5.18 - powinien być 6.18;

- brak opisu osi odciętych na rys. 3.2, rys. 3.3;
- brak konsekwencji przy pisaniu oznaczeń niektórych parametrów, raz pisane z dużej litery, drugi raz z małej, np. prędkość – w „Spisie ważniejszych oznaczeń i symboli” jest z dużej litery V oraz w kilku miejscach w tekście rozprawy, a już w zależnościach np. 3.4, 3.5, 3.8 itd. jest z małej litery v, co nie uwzględniono w wymienionym spisie ważniejszych oznaczeń i symboli.

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

## **6. Przydatność rozprawy w eksploatacji i poprawie bezpieczeństwa**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza ŁĄCKIEGO stanowi ważny krok w rozpoznaniu możliwości wykorzystywania metod numerycznych w obliczeniach obciążeń konstrukcji lotniczych. W dodatku opracowane, modele numeryczne typowych konstrukcji lotniczych, metodyki badań doświadczalnych oraz modele matematyczne, stanowią skuteczne narzędzie do prowadzenia analiz wytrzymałościowych konstrukcji lotniczych metalowych jak i kompozytowych. Rozprawa niniejsza, choć w dość ograniczonym zakresie, może stanowić wartościowy materiał do wykorzystania przez przyszłych, młodych projektantów konstrukcji lotniczych.

## **7. Podsumowanie**

Reasumując uważam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza ŁĄCKIEGO pt.: „ANALIZA NUMERYCZNA I DOŚWIADCZALNA PROBLEMÓW STATYKI I DYNAMIKI CIENKOŚCIENNYCH STRUKTUR LOTNICZYCH” 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 dziedzinie - nauki techniczne, dyscyplinie - mechanika.

**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, symulacje numeryczne i badania stanowiskowe, wnioskuję o jej wyróżnienie.

