

dr hab. inż. Jacek Dziurdź, prof. uczelni  
Instytut Podstaw Budowy Maszyn  
Politechnika Warszawska

Warszawa, 2.08.2023 r.

**Recenzja pracy doktorskiej**  
**Pana mgr. inż. Kamila Zenowicza**  
**pt.: „Optimisation of Unmanned Aerial Vehicle of Unlimited Flight Endurance”**  
(promotor: dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. PŚ)

*Wykonano na zlecenie*  
*Przewodniczącej Rady Dyscyplina Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej*

**1. Wprowadzenie**

Jednym z wymogów konstrukcji współczesnych środków transportu jest obniżenia masy pozwalające m.in. na zmniejszenie zużycia energii. W przypadku statków powietrznych ten wymóg jest jednym z podstawowych zagadnień do rozwiązania. Z tego powodu klasyczne materiały konstrukcyjne, pierwotnie metalowe, zastępowane są coraz częściej epoksydowymi materiałami kompozytowymi zbrojonych włóknem szklanym, węglowym lub w skrajnych przypadkach aramidowym, które cechują się dużo lepszym stosunkiem wytrzymałości do masy. Wprowadzenie nowych materiałów wymusza poszukiwanie efektywnych metod obliczeniowych wykorzystywanych w analizach sztywnościowych i wytrzymałościowych konstrukcji.

Coraz większą grupą powietrznych środków transportu są bezzałogowe statki powietrzne. Przeniesienie operatora z samolotu do stacjonarnego stanowiska sterującego lub zastosowanie sterowania autonomicznego całkowicie zmienia podejście do konstrukcji takich obiektów oraz ich wykorzystania, gdyż nie podlegają one ograniczeniom związanym z możliwościami ludzkiego ciała i komfortem pilota.

Można wymienić kilka przykładów ich zastosowania. W systemach monitorujących mogą służyć do obserwacji ruchu drogowego, kontroli zagrożenie pożarowego obszarów leśnych, kontroli zagrożenia powodziowego, kontroli obszarów rolnych (np. oceny działania szkodników lub chorób roślin), filmowania czy też w skrajnym przypadku wojskowego rozpoznania sytuacji taktycznej. W systemach pomiarowych można je wykorzystywać do

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia ..... 16.08.2023  
2023.1741.511.2023  
nr ..... zał. ....

monitoringu stanu powietrza, prognoz pogodowych, ukształtowania terenu itp. Szczególnie istotna jest możliwość wykorzystania w sytuacjach niebezpiecznej dla człowieka.

Wybór rozwiązania konstrukcyjnego uzależniony jest od przewidywanych zadań do wykonania. Rozwiązanie problemu przedstawionego w pracy dotyczyło optymalizacji konstrukcji płata nośnego bezzałogowego statku powietrznego przeznaczonego do lotów na dużych wysokościach o teoretycznie nieograniczonej długotrwałości lotu. Wymagało to opracowania nowych metod projektowania i optymalizacji konstrukcji.

## **2. Ogólne omówienie pracy**

Przesłana do oceny rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim, wydrukowana na 118 stronach i organizacyjnie podzielona na 7 rozdziałów głównych, z których każdy zawiera rozbudowany system podrozdziałów. Tekst został uzupełniony 101 rysunkami i 34 tabelami z danymi. Zamieszczony spis literatury zawiera 119 pozycji i nie budzi zastrzeżeń co do doboru materiałów źródłowych. Po spisie literatury znajdują się streszczenia w języku angielskim oraz polskim. Na końcu rozprawy przedstawiono spis używanych skrótów oraz spis używanych symboli. Podział pracy można uznać za poprawny, choć być może za bardzo rozbudowany. Nie przeszkadza to jednak w czytelności pracy.

Autor w Rozdziale pierwszym, będącym wstępem do pracy, uzasadnia konieczność opracowywania nowych metod projektowania i optymalizacji konstrukcji bezzałogowych statków powietrznych. Pokrótce przedstawia obecnie obowiązujące przepisy europejskie i krajowe dotyczące wymagań dla bezzałogowych statków powietrznych. We wstępie zaprezentowano także kryteria podziałów ze względu na wagę, zasięg i czas lotu, wysokość przelotową czy też obciążenia działające na skrzydła. Inny przedstawiony podział, wraz z przykładami istniejących statków powietrznych, dotyczył różnych rozwiązań konstrukcyjnych, dostosowanych do specyfiki wykonywanych zadań. Następnie Autor skupia się na bezzałogowych samolotach o dużej długotrwałości lotu operujących na wysokościach stratosferycznych. Porusza problem zasilania układu napędowego energią elektryczną związany z ograniczeniem masy całego układu, co wymusza zmniejszenie pojemności akumulatorów i zastosowanie na szeroką skalę paneli fotowoltaicznych do pozyskiwania energii ze światła słonecznego. Jednak stosowalność paneli fotowoltaicznych ma także swoje ograniczenia, wynikające m.in. ze zmiennej gęstości energii słonecznej zależnie od położenia na różnych szerokościach geograficznych (zmienny kąt padania promieni słonecznych, który jest także od zależny pory roku) oraz położenia obiektu względem słońca.

W pracy przedstawiono badania przeprowadzone w zakresie opracowania i optymalizacji konstrukcji na przykładzie głównego skrzydła bezzałogowego statku powietrznego „Twin Stratos”, przy założeniu nieograniczonej długotrwałości i osiągnięcia dużych wysokości lotu. Założeniem konstrukcyjnym było zastosowanie wysoce elastycznej konstrukcji projektowanego obiektu. Bezzałogowe statki powietrzne przeznaczone do lotów na dużych wysokościach charakteryzują się znacznym wydłużeniem skrzydeł, co pozwala na zamontowanie paneli fotowoltaicznych o dużej powierzchni. Na podstawie przedstawionych rozważań i przykładach istniejących konstrukcji Autor przedstawił konkluzję, że nowoczesne konstrukcje bezzałogowych statków powietrznych o dużej wysokości lotu i dużej długotrwałości lotu, projektowane są z dużym naciskiem na wysoką doskonałość aerodynamiczną, maksymalizację powierzchni paneli fotowoltaicznych w skrzydle głównym oraz redukcję masy.

W dalszej części wstępu przedstawiono cel badań, którym było opracowanie modelu numerycznego, metodyki analizy i optymalizacji bezzałogowego samolotu stratosferycznego z napędem elektrycznym o nieograniczonej długości lotu, a następnie wykonanie analiz aerodynamicznych i wytrzymałościowych w celu optymalizacji konstrukcji głównego skrzydła prezentowanego pojazdu bezzałogowego. W ostatnim podrozdziale wstępu Autor przedstawia tezę:

**„Wykorzystując proces projektowania konstrukcji z wykorzystaniem modeli rozwojowych i symulacji podsystemów, struktur oraz opracowaną metodykę optymalizacji, możliwe jest przeprowadzenie częściowo zautomatyzowanej optymalizacji bezzałogowego statku powietrznego o bardzo elastycznej konstrukcji, który może osiągnąć niezwykle parametry wytrzymałościowe i wysokościowe lotu”.**

W rozdziale drugim przedstawiono szczegółowo przedmiot badań. Krótko scharakteryzowano długodystansowe bezzałogowe statki powietrzne latające na dużych wysokościach. Autor opisał ogólną konstrukcję zaprojektowanego samolotu składającego się z głównego skrzydła nośnego, będącego elementem generującym siłę nośną samolotu i łączącą dwa kadłuby zawierające silniki napędowe ze śmigłami ciągnącymi. Kadłuby połączone zostały ogonem za pomocą, cytując Autora, układu „A” (choć moim zdaniem lepszą formą jest określenie „odwróconego V”). Elementy ruchomych powierzchni sterowych zastosowano tylko w części ogonowej.

Przedstawione badania dotyczą jednej z przeskalowanych wersji statku powietrznego o nazwie „Twin Stratos”, wykonanej w skali 1:7, umożliwiającej weryfikację systemu

zasilania, modelu symulacji zużycia energii oraz technologii. Wykonany został także prototyp opracowanego modelu wykorzystywany w badaniach stanowiskowych.

W dalszej części rozdziału drugiego przedstawiono genezę i możliwości wykorzystania docelowej wersji platformy badawczej „Twin Stratos”, możliwej do zastosowania m.in. w branżach związanych ze służbami ochrony i wojskiem, telekomunikacją, monitoringiem, badaniami dużych obszarów, nadzorem nad uprawami, kontrolą ognia, meteorologią itp. Opisano kilka przykładów zastosowania np. jako platforma telekomunikacyjna, platforma obserwacyjna czy też platforma pomiarowo-badawcza.

Na zakończenie rozdziału drugiego Autor przedstawił koncepcję zaprojektowanego samolotu bezzałogowego. Określił cztery parametry charakterystyczne zmienne dla konfiguracji skrzydło–ogon. Wstępną koncepcję projektowanej konstrukcji opracowano porównując ją z istniejącymi rozwiązaniami.

Rozdział trzeci jest przeglądem metod stosowanych podczas analizy konstrukcji samolotów i szybowców, co wynika ze stwierdzenia podobieństwa projektowanego statku powietrznego z konstrukcjami standardowymi. Przedstawiono m.in. metody identyfikacji parametrów powietrza na analizowanej wysokości lotu oraz metody wyznaczania parametrów masowych na podstawie analitycznych obliczeń sił i momentów, metod numerycznych czy też równoważenia przeprowadzanego na obiekcie rzeczywistym. Następną opisaną grupą są metody wyznaczania rozkładu obciążeń i parametrów aerodynamicznych opartych na metodach analitycznych (przedstawiono metodę Schrenka), metod numerycznych, wymagających doboru odpowiedniego modułu obliczeniowego („solwera”), oraz analiz eksperymentalnych. Następnie przedstawiono metody analizy układów napędowych śmigieł lotniczych, jako istotnych elementów układu napędowego, oraz metody analizy strukturalnej, materiałowej i wytrzymałościowej.

Rozdział czwarty zawiera opis metod analizy i optymalizacji rozważanej struktury. Autor zwraca uwagę, że ścieżka projektowania i optymalizacji bezzałogowych statków powietrznych nie powinna znacząco odbiegać od projektowania małych samolotów użytkowych czy też szybowców. Przedstawiona ścieżka została podzielona na cztery etapy przy jednoczesnym założeniu, że uwzględnienia informacji zwrotnej w przypadku przyjęcia błędnych założeń wprowadzonych na poprzednich etapach.

Pierwszy etap projektowania dotyczy określenia głównego układu projektowanego bezzałogowego statku powietrznego, jego zastosowania oraz początkowych wartości prędkości i wysokości, z jaką ma się poruszać. W ramach etapu wykonywane są analizy dotyczące

opracowania koncepcji kształtu i założeń geometrycznych, przybliżone rozmiary powierzchni nośnych oraz określenie typu napędu.

Drugi etap wprowadza pierwsze potwierdzenie przyjętych założeń etapu pierwszego w postaci wyników obliczeń analitycznych. Na tym etapie ustalane są wszystkie współczynniki aerodynamiczne, dokładne rozmiary poszczególnych powierzchni oraz założenia dotyczące wychylenia steru oraz wpływu warunków atmosferycznych na możliwość lotu na wybranych wysokościach. W ramach etapu wyznaczono rozkład masy i położenie środka ciężkości oraz masowe momenty bezwładności i sterowność. Przeprowadzono analizy parametrów geometrycznych, aerodynamicznych i rozkładu obciążeń aerodynamicznych oraz analizę i optymalizację układu napędowego na podstawie badań stanowiskowych.

W trzecim etapie projektowania określane są wstępnie grubości warstw zastosowanych materiałów, przeprowadzane jest planowanie usztywnień i określana jest struktura wewnętrzna oraz inne parametry związane z przygotowaniem projektowanego bezzałogowego statku powietrznego do wykonania. Na tym etapie wykonywane jest odwzorowanie struktury zewnętrznej oraz przeprowadzane są numeryczne analizy aerodynamiczne, następuje określenie i modelowanie początkowej struktury wewnętrznej, określenie materiałów poszczególnych elementów oraz analizy masowe, określające położenie środka ciężkości dla różnych planowanych konfiguracji.

W czwartym etapie przeprowadzona jest ostateczna weryfikacja poprawności zaprojektowanej konstrukcji, po wcześniejszych analizach i poprawkach wprowadzonych w poprzednich etapach, następuje opracowanie konstrukcji wewnętrznej skrzydła. Wykonywane są analizy wytrzymałościowe oraz badania stanowiskowe w tym analiza statyczna konstrukcji dla wcześniej określonych stanów krytycznych.

Następnie w rozdziale piątym Autor przedstawił wyniki analiz opracowanego bezzałogowego statku powietrznego. Struktura rozdziału jest zbliżona do struktury rozdziału czwartego. W pierwszym etapie przyjęto parametry wersji w podziałce 1:7 na podstawie geometrii wersji Twin Stratos 1:1 poddanej przeskalowaniu. Na podstawie przyjętych parametrów wykonano pierwsze szkice bezzałogowego statku powietrznego zawierające panele fotowoltaiczne umieszczone na górnej powierzchni skrzydeł. Na podstawie wyznaczonych wymiarów określono możliwości pozyskania energii i porównano z zapotrzebowaniem oszacowanym dla podobnych konstrukcji.

Etap drugi składa się głównie z wyników obliczeń analitycznych. Założeniem tego etapu było wyznaczenie teoretycznych parametrów lotu dla opracowanej koncepcji pojazdu „Twin Stratos” w podziałce 1:7. Na początku niezbędne było określenie parametrów powietrza

w zależności od wysokości lotu bezzałogowego statku powietrznego. Jest to szczególnie istotne dla dużych wysokości lotu. Do analizy i optymalizacji przyjęto płyty i ich parametry oparte na danych umieszczonych w bazie „Airfoil Tools”. Zaplanowano wykonanie konstrukcji skrzydła głównego o profilach mieszanych, dla których przedstawiono zarysy oraz podstawowe charakterystyki. Niezbędnym do dalszej analizy było wyznaczenie współczynników siły nośnej, oporu i momentu pochylającego dla głównego skrzydła i jednostki ogonowej. W analizie projektowanego samolotu uwzględniono kąt nachylenia głównego skrzydła, kąt części ogonowej oraz kąt natarcia w locie poziomym. Określono rozkład sił działających na skrzydło wykorzystując metodę przybliżeń Schrenka, który zweryfikowano w programach XFLR5 i SolidWorks. Wyniki analiz zostały przedstawione na wykresach rozkładu sił poprzecznych i momentów gnących wzdłuż długości skrzydła. Przewidywane są dalsze prace prowadzące do udoskonalenia przedstawionych metod. W ramach drugiego etapu wyznaczono także parametry masowe i położenia środka ciężkości uwzględniające niezbędne wyposażenie, ale bez dodatkowej aparatury pomiarowej. Zbadano możliwość uzyskania założonej wysokości lotu oraz osiągnięcia minimalnej i maksymalnej prędkości. Określono optymalne parametry prędkości związane z kątem wznoszenia. Na zakończenie etapu drugiego wykonano analizę układu napędowego dla opracowanego przykładowego planu lotu.

W ramach etapu trzeciego wyznaczono obwiednię lotu dla zaprojektowanego układu, określono parametry stateczności w locie dla poszczególnych wysokości lotu, wstępnie określono położenie dźwigara głównego skrzydła oraz wygenerowano model geometryczny w programie XFLR5, w którym wykonano pierwsze numeryczne analizy aerodynamiczne z wykorzystaniem różnych metod rozwiązania problemu. Przeprowadzone analizy uzupełniono wartościami współczynników bezwładności wyznaczonych analitycznie w poprzednich etapach. Efektem optymalizacji była zmiana geometrii głównego skrzydła w tym m.in. kąta nachylenia końcówek skrzydła poprawiając w ten sposób stabilność w locie.

W czwartym, ostatnim etapie projektowania założono najwyższą precyzję odwzorowania projektowanej konstrukcji. Modelowanie numeryczne uwzględniające parametry środowiska, w który będzie poruszał się projektowany obiekt, parametry materiałów zastosowanych do jego budowy, parametrów sztywnościowych konstrukcji nośnej i poszycia oraz parametrów aerodynamicznych zrealizowano z wykorzystaniem programu ANSYS. Powstało kilka modeli projektowanego bezzałogowego statku powietrznego o różnym stopniu uproszczenia w celu skrócenia czasu wstępnych obliczeń. Przeprowadzono numeryczne analizy aerodynamiczne służące do wyznaczenia sił działających na badany obiekt dla trzech, wcześniej zdefiniowanych, stanów krytycznych. W tym celu opracowano analitycznie obwiednię lotu,

odpowiadającą projektowanemu statkowi powietrznemu, a do analizy wytrzymałościowej konstrukcji wybrano trzy punkty związane ze stanami krytycznymi. Kontynuacją analiz było określenie parametrów środowiska: kształtu i wielkości wirtualnego tunelu aerodynamicznego, opracowanego w programie ANSYS Fluent CFX. Autor zwrócił uwagę na zastosowanie właściwych parametrów wielkości stosowanych elementów w celu uzyskania odpowiedniej dokładności obliczeń i na tej podstawie przeprowadził modyfikacje wstępnie wygenerowanej siatki. Po wyznaczeniu warunków brzegowych, wyznaczeniu obszaru roboczego oraz wprowadzeniu parametrów „solwera” programu ANSYS wykonano numeryczną analizę wytrzymałości konstrukcji.

Etap szósty rozprawy poświęcono optymalizacji konstrukcji głównego skrzydła bezzałogowego statku powietrznego. Przy opracowaniu metodyki optymalizacji założono wprowadzenie zmian strukturalnych polegających m.in. na położeniu części dźwigara głównego czy też liczbie warstw materiału usztywniającego w danym przekroju. W tym celu określono wartości skrajnego położenia dźwigara nośnego, grubości zastosowanych materiałów, ich wymiarów oraz mas. Analizy przeprowadzono dla trzech przypadków krytycznych parametrów lotu przy określonej wartości współczynnika bezpieczeństwa.

Ze względu na dużą liczbę obliczeń, wynikających z wieloparametrowych analiz numerycznych, podjęto próbę automatyzacji obliczeń wprowadzając opracowany plan do środowiska ANSYS Workbench. Dzięki temu możliwe było wygenerowanie dużej liczby macierzy wynikowych prezentujących wartości współczynników bezpieczeństwa optymalizowanego skrzydła dla przyjętych parametrów. W ramach wykonanych obliczeń przeprowadzono analizę wpływu zagęszczenia węzłów siatki na dokładność obliczeń oraz opracowano parametryczny model struktury wewnętrznej skrzydła.

Jedną z istotnych analiz wytrzymałościowych było wyznaczenie wpływu położenia dźwigara głównego wzdłuż cięciwy analizowanego profilu skrzydła. Przeprowadzono analizy odkształcenia całkowitego, wewnętrznych naprężeń występujących w konstrukcji (wg hipotezy HMM) oraz współczynnika bezpieczeństwa Tsai-Wu dla wcześniej określonych stanów krytycznych. W celu ułatwienia porównania wyniki przedstawiono we względnych wartościach procentowych.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie i wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Zdaniem Autora, przedstawiona do recenzji praca doktorska zaowocowała opracowaniem optymalnego, pod względem stawianych wymagań, skrzydła analizowanego obiektu. W celu uzyskania wyniku zdefiniowano metodykę przeprowadzenia analizy oraz samą optymalizację. Wykonano badania analityczne optymalizowanego obiektu, przeanalizowano

wymagania prawne, wyznaczono krytyczne parametry lotu, zaproponowano materiały kompozytowe oraz wyznaczono parametry materiałów przyjętych do analiz numerycznych. Optymalizacja została oparta na modelu rozwojowym i połączeniu numerycznych analiz aerodynamicznych z analizami wytrzymałościowymi konstrukcji. Podsumowanie kończy opis planowanych prac związanych m.in. ze zwiększeniem stopnia automatyzacji procesu optymalizacji w programie ANSYS, przeprowadzenie dynamicznych analiz aeroelastycznych optymalizowanego skrzydła czy też badania stanowiskowe w komorze klimatycznej związane z wpływem warunków na określonej wysokości.

### 3. Uwagi krytyczne i zapytania

Staranna lektura rozprawy skłania do zgłoszenia kilku uwag, uwzględnienie których mogło by poprawić jakość pracy, i które można uwzględnić w przyszłych publikacjach:

- Należy zwrócić uwagę na poprawność zapisu stosowanych jednostek, a w szczególności jednostek ciśnienia (naprężeń), np. w tabeli 30 czy też na wykresach zamieszczonych na rysunkach 88-90 widnieje zapis „[Mpa]” oraz w tabeli 27 – [Gpa]. We wzorze 4.4 brak jest znaku „%” przy przeliczeniu na wartości względne przedstawione w procentach.
- Proponuję korzystać z dobrodziejstw edytorów tekstowych i w większym stopniu wpisywać indeksy dolne oraz górne np.: w tabeli 3 jednostkę pola powierzchni [ $m^2$ ]. Konsekwentnie należy też stosować zapisy zmiennych np. jaka jest różnica między  $b_w$  (str. 16), a wartością  $b$  w spisie stosowanych symboli?
- Zachowanie zgodności oznaczeń, włącznie z indeksami we wzorach i na rysunkach np. wzór 4.13 i rysunki 19-21.
- W spisie stosowanych zmiennych proponuję przyjąć jakiś system porządkowy np. sortowanie zgodne z alfabetem podobnie jak zostało to wykonane dla listy skrótów.
- Moim zdaniem można się zastanowić nad zmniejszeniem liczby stopni podrozdziałów w przedstawionej pracy. Występują dwa podrozdziały o tej samej numeracji – 4.2.6.1.
- Jak na rysunku 26 należy interpretować zmienne  $r_5$ ?
- W celu łatwiejszego porównania wygodniej jest przedstawić wykresy na rysunku 44 w takim samym zakresie sił oporów.



- Dlaczego w tabeli 15 rysunek modelu dla III stanu krytycznego jest obrócony góra-dół?
- Czy wnosi coś istotnego do pracy rysunek 78 w porównaniu z obszernym zbiorem rysunków o dużej wartości informacyjnej?
- W spisie literatury od pozycji 100 do końca występują publikacje, do których nie ma odwołań w tekście głównym.

Pozostałe uwagi dotyczące drobnych błędów np. „literówek” czy interpunkcji pominąłem, jako najmniej istotne z punktu widzenia recenzji.

Uwagi dotyczące zapisanych wzorów:

- We wzorach 4.2 występuje błąd, zamiast zmiennej  $x_i$  w mianowniku powinna być zmienna  $g$ , co umożliwi skrócenie i otrzymanie ostatecznej wersji wzoru, która jest przedstawiona poprawnie.
- Czy wartość względna położenia środka ciężkości, wyznaczona we wzorze 4.4 ma być wartością bezwzględną czy też z uwzględnieniem znaku?
- We wzorach 4.5 oznaczenie współrzędnych zapisane jest małymi literami co jest niezgodne z wcześniejszymi zapisami i spisem stosowanych zmiennych.
- Jak należy interpretować w równaniach 4.18, 4.19, 4.21-4.23 zmienne o oznaczeniu  $d\alpha$ ?
- Czy w przedstawionych rozważaniach niezbędne są wzory 4.19, 4.20 i 4.23?

Należy zaznaczyć, że sformułowane uwagi nie wpływają znaczący sposób na jakość recenzowanej pracy doktorskiej i nie przeszkadzają w zrozumieniu jej treści.

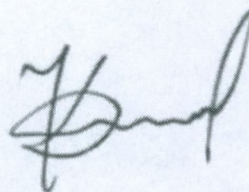
Po zapoznaniu się z recenzowaną pracą nasuwają się następujące pytania:

1. Czy przy określaniu parametrów obiektów w skalach stosowane były liczby podobieństwa?
2. Jak należy interpretować charakterystyki profili przedstawionych w tabelach 8–11?
3. Z jakim klasycznym twierdzeniem mechaniki są związane równania 4.6?
4. Stosunkowo mało miejsca Autor poświęcił na własności mechaniczne zastosowanych materiałów (Tabela 27). Czy warstwy epoksydowo-węglowe o tej samej gęstości ale różnej grubości mają takie same wartości modułów odkształcenia wzdłużnego i poprzecznego? Czy decydując się na niezależne modelowanie elementów z różnych materiałów zdefiniowano zagadnienia kontaktowe między tymi elementami?

#### **4. Ocena końcowa**

Przedstawione uwagi mają głównie znaczenie formalne, mogą być częściowo dyskusyjne, ale nie zmieniają faktu, że Autor wykazał się umiejętnością rozwiązania problemu naukowego mającego także zastosowanie aplikacyjne. Potrafi poprawnie zaplanować i wykonać eksperymenty naukowe oraz przeprowadzić właściwą analizę wyników oraz wykazał się wiedzą z zakresu badanych zjawisk. W przedstawiona do recenzji praca zawiera przykłady analiz z wykorzystaniem modelowania numerycznego popartego obliczeniami analitycznymi. Tym samym Autor potwierdził tezę przedstawioną we wstępie do pracy.

**Uważam zatem, że recenzowana praca doktorska Pana mgr. inż. Kamila Zenowicza spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późniejszymi zmianami) w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna i stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony pracy doktorskiej.**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'K. Zenowicz', is located in the lower right quadrant of the page.