



Modelowanie numeryczne

Karta opisu przedmiotu

Informacje podstawowe

Kierunek studiów Inżynieria multikopterów		Cykl dydaktyczny 2026/2027	
Edycja Wszystkie		Kod przedmiotu MIMSPS.P1.04905.26	
Jednostka organizacyjna Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej		Języki wykładowe polski	
Poziom kształcenia Studia podyplomowe		Obligatoryjność Obowiązkowy	
Forma studiów Stacjonarne		Blok zajęciowy Studia podyplomowe	
Profil studiów Podyplomowe		Przedmiot powiązany z badaniami naukowymi Nie	
Koordynator przedmiotu	Andriy Milenin		
Prowadzący zajęcia	Andriy Milenin		
Okres Semestr 1	Forma zaliczenia Zaliczenie		Liczba punktów ECTS 4
	Forma prowadzenia i godziny zajęć Wykład: 10 Ćwiczenia projektowe: 10		

Cele kształcenia dla przedmiotu

C1	Opanowanie metodologii symulacji numerycznych (MES) metakomputerów: Wykształcenie umiejętności przeprowadzania zaawansowanych analiz statycznych, termicznych oraz modalnych w środowisku SolidWorks, pozwalających na wirtualne testowanie konstrukcji drona przed etapem prototypowania.
C2	Praktyczna walidacja modeli cyfrowych: Nabycie zdolności do krytycznej oceny wyników symulacji poprzez zestawienie ich z realnymi danymi eksperymentalnymi, uzyskanymi za pomocą kamer termowizyjnych oraz analizy widmowej drgań (PSD) z logów kontrolera lotu.
C3	Optymalizacja materiałowo-konstrukcyjna: Zrozumienie fizycznych różnic w zachowaniu ram wykonanych z aluminium oraz kompozytów węglowych, ze szczególnym uwzględnieniem ich zdolności do odprowadzania ciepła z silników oraz tłumienia wibracji strukturalnych.

Efekty uczenia się dla przedmiotu

Kod	Efekty w zakresie	Kierunkowe efekty uczenia się	Metody weryfikacji
Wiedzy - Student zna i rozumie:			
W1	Teoretyczne podstawy Metody Elementów Skończonych (MES) w zakresie analizy statycznej, termicznej i modalnej struktur stosowanych w multikopterach.	IMSP_W01, IMSP_W02	Kolokwium
W2	Fizykę przepływu ciepła w układach napędowych oraz wpływ przewodności cieplnej materiałów (stopy aluminium vs. kompozyty węglowe) na stabilność termiczną silników BLDC.	IMSP_W01, IMSP_W02	Kolokwium
W3	Matematyczny opis drgań własnych i pojęcie gęstości widmowej mocy (PSD) jako kluczowego wskaźnika diagnostycznego w analizie wibracji systemów bezzałogowych.	IMSP_W01, IMSP_W02	Kolokwium
Umiejętności - Student potrafi:			
U1	Przeprowadzić w środowisku SolidWorks kompleksową symulację wytrzymałościową i sztywnościową ramy multikoptera, poprawnie definiując warunki brzegowe i właściwości materiałowe	IMSP_U01, IMSP_U03	Wykonanie ćwiczeń laboratoryjnych
U2	Zaprojektować i zrealizować badanie eksperymentalne z użyciem kamery termowizyjnej, a następnie przeprowadzić walidację modelu numerycznego na podstawie uzyskanych rozkładów temperatur.	IMSP_U01	Wykonanie ćwiczeń laboratoryjnych
U3	Analizować logi lotu (Blackbox) w celu wyznaczenia rzeczywistego widma drgań drona i skorelować te wyniki z numeryczną analizą modalną, identyfikując potencjalne zjawiska rezonansowe.	IMSP_U01	Wykonanie ćwiczeń laboratoryjnych
Kompetencji społecznych - Student jest gotów do:			
K1	Krytycznej oceny wyników uzyskiwanych metodami komputerowymi, wykazując świadomość, że błąd w modelu numerycznym może prowadzić do awarii sprzętowej w rzeczywistym ruchu powietrznym.	IMSP_K01	Wykonanie ćwiczeń laboratoryjnych, Kolokwium
K2	Pracy w zespole inżynierskim przy rozwiązywaniu złożonych problemów optymalizacyjnych, łącząc dane pochodzące z różnych dziedzin (mechanika, termodynamika, elektronika).	IMSP_K02	Wykonanie ćwiczeń laboratoryjnych, Kolokwium

Treści programowe zapewniające uzyskanie efektów uczenia się dla modułu zajęć

W ramach modułu studenci realizują:

Analizy statyczne i modalne w SolidWorks: Modelowanie sztywności i wyznaczanie częstotliwości własnych ram wykonanych z aluminium oraz włókna węglowego. Modelowanie termiczne i walidację eksperymentalną: Symulacje przepływu ciepła z silników na ramę, weryfikowane za pomocą pomiarów kamerą termowizyjną w warunkach rzeczywistego obciążenia. Diagnostykę wibracji (PSD): Korelację wyników numerycznych z danymi z logów kontrolera lotu (Blackbox), co pozwala na ocenę skuteczności tłumienia drgań przez różne materiały konstrukcyjne. Program zapewnia płynne przejście od teorii MES do praktycznej analizy danych, ucząc krytycznego podejścia do wyników generowanych przez oprogramowanie.

Nakład pracy studenta

Rodzaje zajęć studenta	Średnia liczba godzin* przeznaczonych na zrealizowane aktywności
Wykład	10
Ćwiczenia projektowe	10
Przygotowanie do zajęć	30
Samodzielne studiowanie tematyki zajęć	50
Łączny nakład pracy studenta	Liczba godzin 100
Liczba godzin kontaktowych	Liczba godzin 20

* godzina (lekcyjna) oznacza 45 minut

Treści programowe

Lp.	Treści programowe	Efekty uczenia się dla przedmiotu	Formy prowadzenia zajęć
1.	1. Podstawy MES w konstrukcji BSP i modelowanie statyczne. Teoria Metody Elementów Skończonych: dyskretyzacja, funkcje kształtu, warunki brzegowe. Modelowanie sztywności i wytrzymałości ram drona: analiza naprężeń metodą Hubera-Misesa. Definiowanie właściwości materiałowych: izotropia (Aluminium) vs. ortotropia (Laminat węglowy CFRP). (2g). 2. Przepływ ciepła i termodynamika układów napędowych. Mechanizmy przekazywania ciepła w dronie: przewodzenie (silnik-rama), konwekcja wymuszona (strumień zaśmigłowy) i radiacja. Modelowanie MES ciepłych procesów w silnikach BLDC. Rola ramy jako radiatora: analiza porównawcza przewodności cieplnej stopów AL i kompozytów CF. (2g) 3. Dynamika struktur – analiza modalna. Wyznaczanie częstotliwości drgań własnych i postaci drgań struktury drona (rama+silniki+batareja+smigła). Unikanie zjawiska rezonansu z częstotliwościami roboczymi silników. Wpływ masy skupionej i sztywności ramion na pasmo przenoszenia drgań do kontrolera lotu (FC). (2g) 4. Cyfrowe bliźniaki i walidacja modeli numerycznych. Metodyka weryfikacji modeli MES za pomocą danych z rzeczywistych czujników. Teoria analizy widmowej: Gęstość Widmowa Mocy (PSD) jako narzędzie diagnostyczne. Przetwarzanie sygnałów z akcelerometrów (logi Blackbox) na dziedzinę częstotliwości (FFT). (2g) 5. Optymalizacja materiałowa i strukturalna w SolidWorks. Optymalizacja topologiczna strukturalnych elementów drona: redukcja masy przy zachowaniu wymaganej sztywności i ograniczeniach częstotliwości własnych. Analiza porównawcza: Kiedy wybrać aluminium (lepsze chłodzenie, izotropia), a kiedy włókno węglowe (wyższa sztywność właściwa). Projektowanie bezpiecznych systemów nośnych dla dronów (na przykładzie 7-calowych fpv dronów Long Range). (2g)	W1, W2, W3, K1, K2	Wykład

Lp.	Treści programowe	Efekty uczenia się dla przedmiotu	Formy prowadzenia zajęć
2.	1. Analiza statyczna ramy 7" FPV drona. Cel: Wyznaczenie sztywności ramion i naprężeń maksymalnych przy pełnym ciągu. Import modelu CAD drona 7", definicja zamocowań (środek ramy) i obciążeń (ciąg silników na końcach ramion). Narzędzie: SolidWorks Simulation (Static). Wynik: Rozkład naprężeń, współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji, sztywność ramion. (2g) 2. Modelowanie procesów cieplnych i walidacja termowizyjna. Cel: Porównanie zdolności odprowadzania ciepła przez ramy z aluminium (AL) i włókna węglowego (CF). Symulacja nagrzewania się silnika przy zadanym prądzie. Definicja kontaktu termicznego między silnikiem a ramieniem. Część eksperymentalna: Pomiar kamerą termowizyjną temperatury silników na dwóch rzeczywistych dronach (AL i CF) po 5 minutach zawisu. Porównanie wyników z SolidWorks Flow Simulation z obrazami termowizyjnymi. Wnioski dotyczące przewodności cieplnej ramy. (4g) 3. Modelowanie wibracji i analiza PSD z logów. Cel: Korelacja częstotliwości własnych z modelu MES z rzeczywistymi drganiami w locie. Analiza częstotliwościowa w SolidWorks (Frequency Study) dla ramy AL i CF. Wyznaczenie pierwszych trzech postaci drgań. Analiza logów Blackbox (z lotu testowego) przy użyciu oprogramowania do analizy FFT/PSD (Betaflight Blackbox Explorer). Identyfikacja "peaków" wibracji w logach i sprawdzenie, czy pokrywają się one z częstotliwościami własnymi wyliczonymi w SolidWorks. Dyskusja nad tłumieniem materiałowym obu ram. (4g)	U1, U2, U3, K1, K2	Ćwiczenia projektowe

Informacje rozszerzone

Metody i techniki kształcenia :

Wykład, Metoda warsztatowa (ang. workshop), Praca grupowa, Dyskusja

Rodzaj zajęć	Metody zaliczenia	Warunki zaliczenia przedmiotu
Wykład	Kolokwium	Pozytywne zaliczenie kolokwium
Ćwiczenia projektowe	Wykonanie ćwiczeń laboratoryjnych	Pozytywne zaliczenie ćwiczeń laboratoryjnych

Dodatkowy opis

Współczesny rynek bezzałogowców przestał wybaczać błędy projektowe oparte na metodzie „prób i błędów”. Ten kurs przekształca hobbystyczne budowanie dronów w proces inżynierski klasy R&D, przygotowując Cię do pracy w sektorze aerospace i obronnym. Kończąc ten przedmiot, nie tylko „obsługujesz program”, ale stajesz się specjalistą potrafiącym stworzyć cyfrowego bliźniaka multikoptera. To kompetencja, która oddziela projektantów zabawek od inżynierów budujących niezawodne systemy bezzałogowe do zadań specjalnych.

Dlaczego te umiejętności są kluczowe w pracy zawodowej? - Redukcja kosztów prototypowania: Zamiast niszczyć dziesiątki ram z włókna węglowego w testach rzeczywistych, nauczysz się „rozbijać” je w środowisku wirtualnym. Umiejętność przeprowadzenia symulacji w SolidWorks pozwala na wyeliminowanie wad konstrukcyjnych (np. koncentracji naprężeń)

jeszcze przed wysłaniem plików do wycięcia CNC. - Diagnostyka wyższego stopnia: W pracy zawodowej inżyniera BSP często spotkasz się z problemami „niewytłumaczalnych” wibracji (jello) lub przegrzewania się napędów w misjach długodystansowych. Dzięki umiejętności analizy PSD (Power Spectral Density) z logów Blackbox, przestaniesz zgadywać, a zaczniesz precyzyjnie identyfikować rezonanse strukturalne ramy. - Inżynieria materiałowa w praktyce: Wybór między Aluminium a CF to nie kwestia estetyki, lecz bilansu energetycznego i sztywności. Kurs uczy, jak dostarczać twarde dane (termowizyjne i wytrzymałościowe) na poparcie decyzji projektowych, co jest standardem w profesjonalnych zespołach inżynierskich.

Warunki i sposób zaliczenia poszczególnych form zajęć, w tym zasady zaliczeń poprawkowych, a także warunki dopuszczenia do egzaminu

Warunki i sposób zaliczenia poszczególnych form zajęć, w tym zasady zaliczeń poprawkowych, a także warunki dopuszczenia do kolokwium podaje Prowadzący na pierwszych zajęciach w semestrze.

Sposób obliczania oceny końcowej

$OK = 0.5 \text{ Ocena z kolokwium} + 0.5 \text{ Ocena projektu}$

Sposób i tryb wyrównywania zaległości powstałych wskutek nieobecności studenta na zajęciach

Sposób i tryb wyrównywania zaległości powstałych wskutek nieobecności studenta na zajęciach podaje Prowadzący na pierwszych zajęciach w semestrze

Wymagania wstępne i dodatkowe

Wymagane jest posiadanie wiedzy z zakresu mechaniki, wymiany ciepła oraz podstawowej umiejętności w obsłudze oprogramowania SolidWorks.

Zasady udziału w poszczególnych zajęciach, ze wskazaniem, czy obecność studenta na zajęciach jest obowiązkowa

Wykład: Studenci uczestniczą w zajęciach poznając kolejne treści nauczania zgodnie z sylabusem przedmiotu. Studenci winni na bieżąco zadawać pytania i wyjaśniać wątpliwości. Rejestracja audiowizualna wykładu wymaga zgody prowadzącego.

Ćwiczenia projektowe: Studenci wykonują zadania zgodnie z materiałami udostępnionymi przez prowadzącego. Student jest zobowiązany do przygotowania się w przedmiocie wykonywanego zadania, co może zostać zweryfikowane kolokwium w formie ustnej lub pisemnej. Zaliczenie zajęć odbywa się na podstawie zaprezentowania rozwiązania postawionego problemu. Zaliczenie modułu jest możliwe po zaliczeniu wszystkich zajęć projektowych.

Literatura

Obowiązkowa

1. Lienhard, J. H., V and Lienhard, J. H., IV. A Heat Transfer Textbook, 6th ed. Version 6.00. Cambridge MA: Phlogiston Press, April 2024. <https://ahtt.mit.edu>. (Open Access, <https://www.google.com/search?q=https://ahtt.mit.edu/download-ahtt/>)
2. Robert Staidel An introduction to mechanical vibrations (Open Access <https://archive.org/details/introductiontome0000stei>)

Dodatkowa

1. Milenin, A. Effects of FPV Drone Frame Materials on Thermal Conditions of Motors Under Extreme Payloads: Experimental and Numerical Analysis. Processes 2025, 13, 3034. <https://doi.org/10.3390/pr13103034>
2. Milenin, A. Experimental Analysis of an AZ31 Magnesium Alloy Structural FPV Drone Frame: Comparison with Aluminum and Carbon Fiber. Processes 2026, 14, 1361. <https://doi.org/10.3390/pr14091361>

Kierunkowe efekty uczenia się

Kod	Treść
IMSP_K01	Jest gotów do przyjmowania odpowiedzialności za bezpieczeństwo własne, osób trzecich oraz mienia podczas wykonywania operacji lotniczych i testowania prototypów.
IMSP_K02	Jest gotów do pracy w interdyscyplinarnych zespołach technicznych, skutecznie komunikując się z ekspertami z zakresu mechaniki, elektroniki i informatyki.
IMSP_U01	Potrafi zaprojektować i wykonać elementy strukturalne multikoptera, wykorzystując oprogramowanie CAD oraz techniki druku 3D.
IMSP_U03	Potrafi przeprowadzić diagnostykę techniczną, analizę logów lotowych oraz testy naziemne i powietrzne w celu eliminacji błędów konstrukcyjnych.
IMSP_W01	Zna budowę oraz zasadę działania wielowirnikowych statków powietrznych oraz rozumie fizyczne aspekty generowania siły nośnej i stabilizacji lotu.
IMSP_W02	Zna i rozumie właściwości materiałów konstrukcyjnych (kompozytów, metali lekkich) oraz potencjał i ograniczenia technologii wytwarzania przyrostowego (druku 3D) w prototypowaniu multikopterów.