

# WYKORZYSTANIE NOWOWCZESNYCH NARZĘDZI INŻYNIERSKICH W PROJEKTOWANIU BEZZAŁOGOWEGO WIROPLATA CZTEROWIRNIKOWEGO

MACIEJ PAWEŁCZYK, PRZEMYSŁAW BIBIK

*Politechnika Warszawska*

## Streszczenie

*W pracy krótko przedstawiono główne aspekty związane z procesem projektowania bezzałogowego wiroplata ze szczególnym uwzględnieniem problemów, z jakimi boryka się konstruktor podczas tworzenia koncepcji, wstępnego projektu, optymalizacji konstrukcji oraz doboru modułów i materiałów. Przedstawione zostały główne etapy powstawania konstrukcji przy wykorzystaniu zarówno wiedzy technicznej z zakresu programów CAD/CAM/CAE, jak również modeli ekonomicznych.*

## 1. WSTĘP

W dzisiejszych czasach w przemyśle lotniczym wyraźna jest tendencja odchodzenia od urządzeń pilotowanych przez człowieka i zastępowania ich operatorami naziemnymi. Nie tylko zmniejsza to niebezpieczeństwo związane z wypadkami lotniczymi, lecz również pozwala na stworzenie mniejszych, mobilnych urządzeń umożliwiających wykonanie misji niemożliwych do przeprowadzenia przez pilotowane obiekty.

Jednym ze zdalnie sterowanych urządzeń, które zyskało niezwykłą popularność zarówno w modelarstwie jak i zastosowaniach komercyjnych jest bezzałogowy wiropląt czterowirnikowy potocznie nazywany quadrotorem.

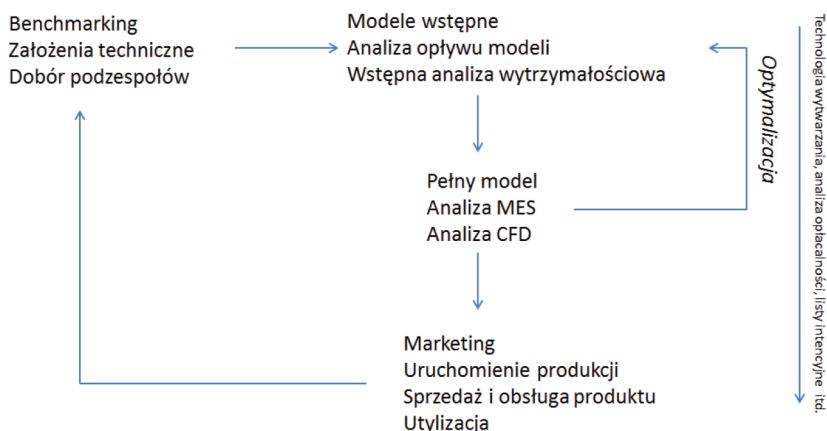
Jego największą zaletą jest stosunkowo prostota konstrukcja, oprogramowanie i sterowanie. Bowiem choć zbudowanie konkurencyjnego modelu komercyjnego do zadań zwiadowczych bądź obserwacyjnych jest zadaniem kosztownym i długotrwałym to proste modele powstają w domach modelarzy najczęściej nie posiadających nawet wykształcenia technicznego.

Tymczasem wykorzystanie narzędzi z zakresu CAD/CAM/CAE pozwoliło na znaczne przyspieszenie projektowania i weryfikacji działania modelu wirtualnego. Najnowsze osiągnięcia techniki już od pierwszego szkicu tworzone są na ekranach komputerów, w postaci cyfrowej, co pozwala na ich dalszą obróbkę i eksport do programów obejmujących dalsze fazy projektowania.

Z inżynierskiego punktu widzenia pozwala to na stworzenie pierwszego szkicu i wstępnego projektu w taki sposób aby już na tak wczesnym etapie możliwa była współpraca zespołów związanych z projektowaniem i technikami wytwarzania. Następnie taki model badany jest

pod kątem wytrzymałościowym jak również – w przypadku lotnictwa – często przeprowadzane są badania CFD w wirtualnym tunelu aerodynamicznym. Oprogramowanie CAD/CAM/CAE pozwala potem na optymalizację i oszacowanie kosztów produkcji takiej struktury. Odpowiednie podprogramy przetwarzają otrzymane w ten sposób dane na konkretne programy do maszyn wytwarzających podzespoły, np.: do frezarek CNC.

## 2. METODYKA POSTĘPOWANIA



Rys. 2.1. Metodyka postępowania wykorzystana w projekcie

W celu zaprojektowania bezzałogowego wiroplata czterowirnikowego konieczne było stworzenie planu pracy. Plan musiał opierać się na cyklu życia realnego produktu, tzw. PLM (Product Lifecycle Management). Ze względu na brak konkretnego odniesienia do tematu pracy niektóre etapy projektowania zostały w tym artykule pominięte.

Należy tutaj dodatkowo podkreślić, iż autorzy artykułu zastosowali rzadko spotykane w analizie tego typu układów podejście. Najczęściej małe, bezzałogowe obiekty latające służą bowiem testowaniu układów automatycznej regulacji, symulatorów lotu bądź innych zagadnień z pogranicza informatyki i elektroniki [1], [2], [3]. W niniejszej pracy skupiono się natomiast na podejściu przemysłowym. Autorzy wyszli więc naprzeciw oczekiwaniom rynku tworząc koncepcję produktu, który będzie jak najbardziej atrakcyjny z punktu widzenia potencjalnego klienta. W celu określenia metod postępowania i ich weryfikacji, przy pominięciu kosztownego, z punktu widzenia życia produktu, procesu weryfikacji laboratoryjnej, autorzy zastąpili badania wytrzymałościowe oraz analizy w tunelu aerodynamicznym analizami MES oraz CFD bazującymi na utworzonych, parametrycznych modelach CAD.

Projekt rozpoczęto od analizy rynkowej, czyli tzw. „benchmarkingu”. Polegał on na przeszukaniu wszelkich dostępnych źródeł w poszukiwaniu podobnych modeli tej samej klasy. Znalezione modele skatalogowano pod kątem długości czasu lotu, masy, gabarytów oraz ceny. Dokonano również daleko idącego porównania rozwiązań konstrukcyjnych. Otrzymane w ten sposób dane posłużyły jako baza do kolejnych etapów projektowania.

Analiza rynkowa pozwoliła bowiem na sformułowanie założeń technicznych służących utworzeniu konstrukcji, która odpowiadałaby rzeczywistym potrzebom rynku. Założenia te oparto na wymogach technicznych bezzałogowego wiroplata podobnej klasy przedstawionych przez Ministerstwo Obrony Narodowej w ich przetargu na demonstrator technologii niewielkiego wiroplata. Demonstrator ten rozwijany jest aktualnie przez firmę WB Electronics z Ożarowa Mazowieckiego.

Po gruntownej analizie rynku i wymagań potencjalnego klienta stworzono długą listę założeń technicznych, z czego najważniejsze przedstawiono poniżej:

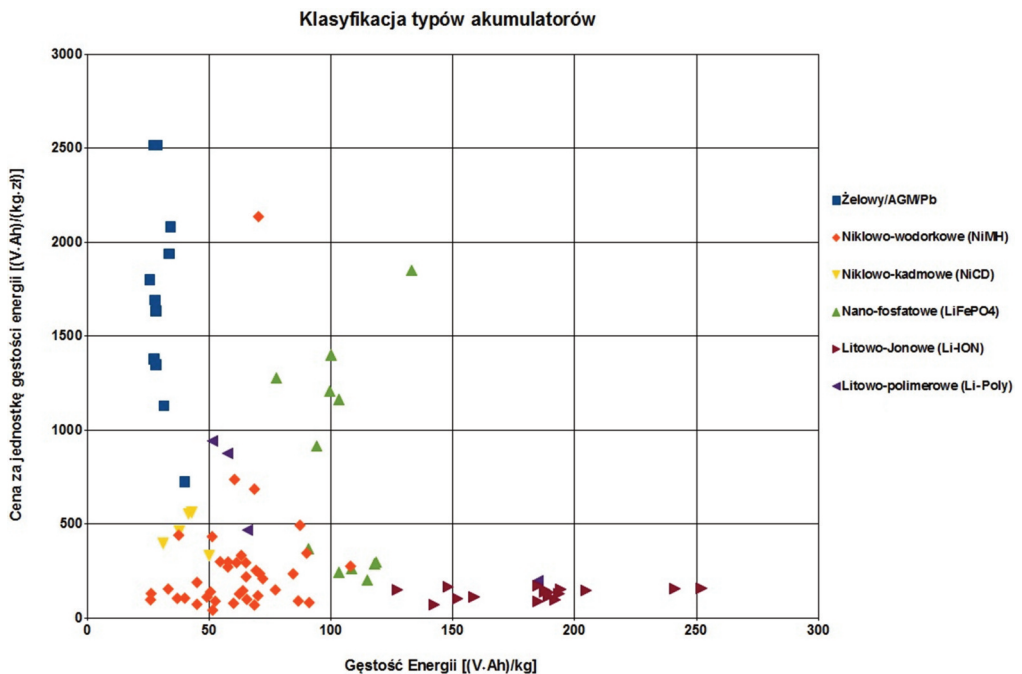
#### Założenia użytkowe:

- minimalny czas lotu: 30 min;
- temperatura użytkowania:  $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \div +35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- minimalna prędkość lotu pionowego – 0 km/h (zawis);
- maksymalna prędkość lotu poziomego – 75 km/h;
- maksymalne natężenie dźwięku emitowanego przez urządzenie: 90 dB;
- minimalny, skuteczny zasięg radiowy: 2500 m;
- przekaz obrazu oraz strumienia informacji podstawowych (lokalizacja, wysokość itd.) w trybie bezpośrednim.

#### Założenia konstrukcyjne:

- rozpiętość maksymalna: 2000 mm;
- maksymalna masa całkowita modelu latającego: 5 kg.

Następnym etapem, krytycznym z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania wiro-  
płata, był dobór podzespołów. Nie wchodząc w szczegóły związane z elektroniką i sterowaniem zdecydowano się na dobór jedynie najważniejszych elementów: śmigła, silnika i akumulatorów. Dobór odpowiedniego śmigła wymagał jednak stworzenia teoretycznego modelu pozwalającego – bez dogłębnych badań na hamowni – na znalezienie choć zbliżonej zależności pomiędzy promieniem śmigła, a prędkością obrotową [4]. Znajomość tej zależności była konieczna do doboru prawidłowego silnika oraz częściowo implikowała wybór rodzaju akumulatora (prądy rozładowania).



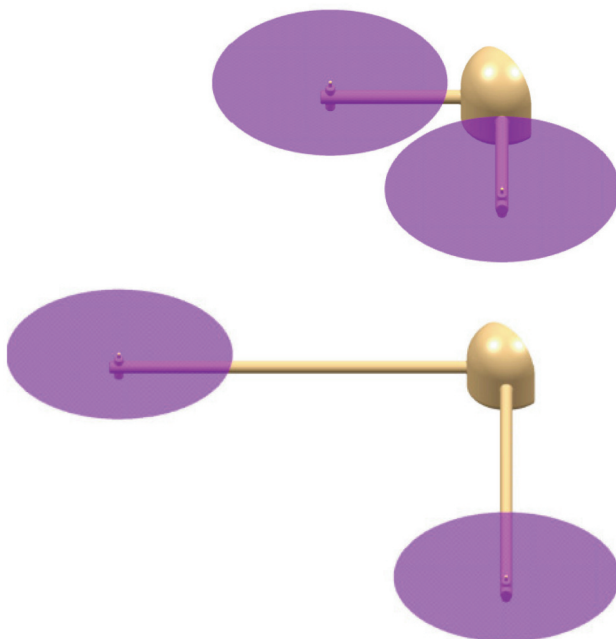
Wykres 2.2. Parametry akumulatorów dostępnych na rynku

W dalszych etapach projektowania zestawy śmigło-silnik-regulator napięcia były optymalizowane w celu minimalizacji masy, jednak największy problem pojawił się przy wyborze najlepszego z punktu widzenia konstrukcji akumulatora. Jego dobór wymagał kolejnej, tym razem znacz-

nie bardziej dokładnej analizy rynkowej. Pozwoliła ona na stworzenie tabeli z ponad 200 pozycjami akumulatorów dostępnych na rynku i ich podstawowymi parametrami. W celu doboru najlepszego (z punktu widzenia atrakcyjności produktu) akumulatora stworzono wykres zależności pomiędzy gęstością energii, a ceną za jej jednostkę. Efektem jest przedstawiona na wykresie 2.2 zależność. Autorzy poszukiwali akumulatora, który posiadałby największą gęstość energii przy jak najniższej cenie. Poniższa zależność jasno wskazuje, że grupą akumulatorów najlepiej spełniającą takie założenia jest grupa akumulatorów litowo-jonowych. Do dalszych etapów wybrano ogniwo z tej właśnie grupy, cechujące się największą gęstością energii.

### 3. MODEL WSTĘPNY

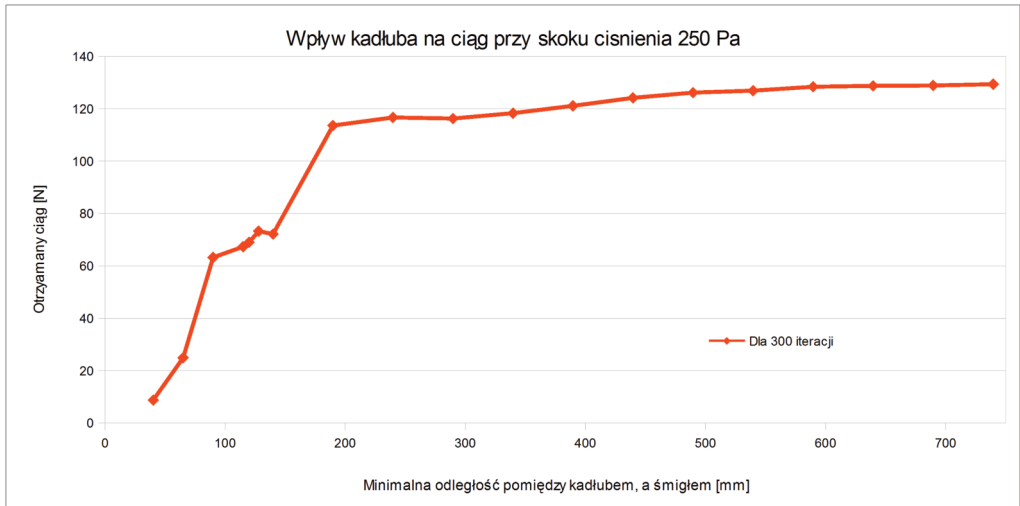
Proces projektowania nowego statku powietrznego rozpoczęto od budowy modelu parametrycznego mającego na celu przetestowanie zależności pomiędzy długością ramienia bezzałogowego wiroplata od ciągu działającego na obiekt (przy stałej geometrii i mocy silników oraz wewnętrznej części urządzenia). Całość została zaprojektowana w programie CATIA v5. Bryła urządzenia została wybrana ze względu na jej opływowość oraz najlepszy z rozpatrywanych stosunek objętości do powierzchni. Ze względu na minimalizację masy urządzenia również starano się uzyskać jak najmniejszą powierzchnię obiektu. Tymczasem objętość quadrotora definiowała ilość baterii jaką dało się umieścić wewnątrz urządzenia. Ilość akumulatorów definiowała znów ich pojemność, a więc maksymalny czas lotu, a ten parametr starano się maksymalizować za wszelką cenę.



Rys. 3.1. Parametryczny model wstępny wiroplata

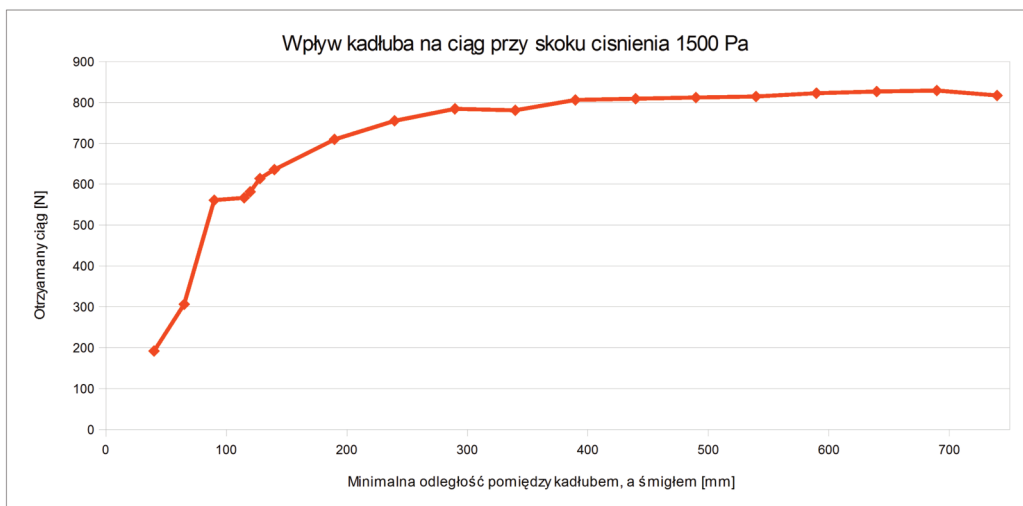
W celu minimalizacji czasu obliczeniowego w modelu uwzględniona została jego symetria. „Przepełowiony” model widoczny jest na rysunku 3.1. Połowa modelu o różnych długościach ramienia (razem 19 modeli) została wyeksportowana do programu Gambit. Tam stworzona została trójwymiarowa siatka obliczeniowa cyfrowego tunelu aerodynamicznego, która przesłana została do programu Ansys Fluent w celu dokonania obliczeń CFD.

Obliczenia CFD wykonane zostały w trzech różnych środowiskach brzegowych. Po uzyskaniu zbieżności przeanalizowano otrzymane wyniki. Otóż okazało się, że w modelach w których tarcza śmigła znajduje się odpowiednio blisko kadłuba wiropłata widoczne są linie prądu łączące kadłub wraz z tarczą. Fizycznie powoduje to powstanie zaburzonego przepływu i znaczny spadek siły nośnej generowanej na obiekcie. Wpływ ten utrzymuje przedstawiony jest na wykresie 3.1.

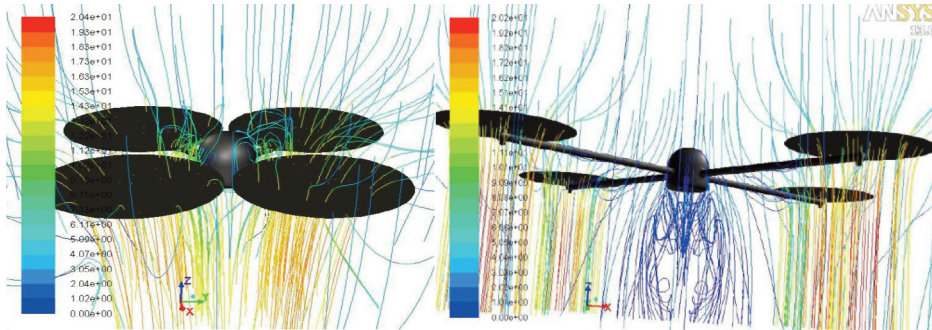


Wykres 3.1. Wpływ kadłuba na ciąg

Podobne zjawiska utrzymują się niezależnie od warunków brzegowych, przy czym wartość dla której wpływ ten jest pomijalnie mały jest zależna od tych warunków. Zjawisko to przedstawione zostało na wykresie 3.2. Dwa skrajne przypadki analizy CFD przedstawione zostały na rysunku 3.2.



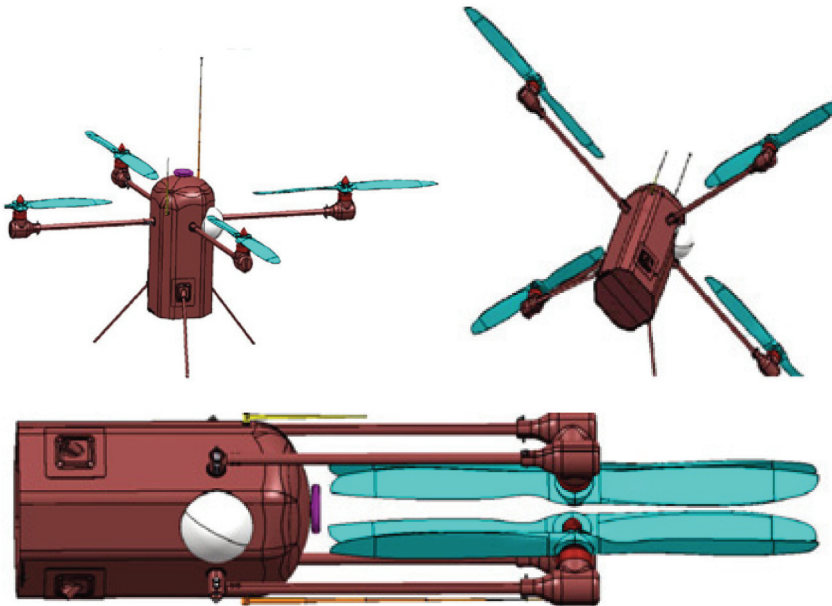
Wykres 3.2. Wpływ kadłuba na ciąg



Rys. 3.2. Analiza CFD dla dwóch skrajnych przypadków ustawień tarczy śmigieł

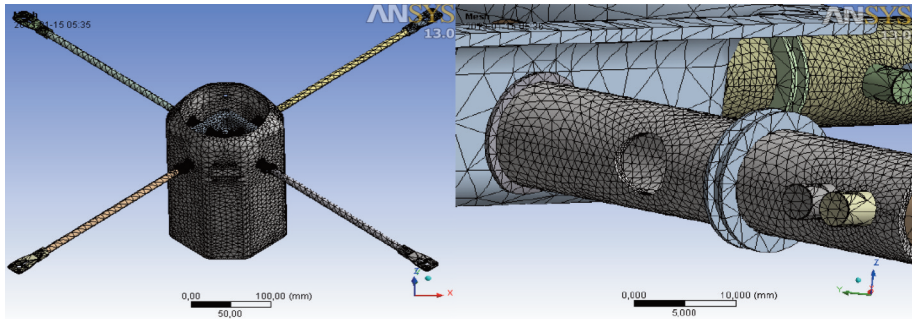
#### 4. MODEL DOCELOWY

Po dobraniu podzespołów, wstępnej analizie ich rozmieszczenia w obiekcie, analizie CFD i przygotowaniu pakietu akumulatorów (wykorzystując ogniwo wybrane we wcześniejszych etapach) pozwalających na 50 minutową misję przygotowano model CAD zarówno w ustawieniu „do lotu” jak i w wersji „złożonej” (rysunek 4.1). Spełniał on wszystkie wymagania przedstawione w założeniach technicznych jak również uwzględnił doświadczenia wyniesione z analizy CFD.



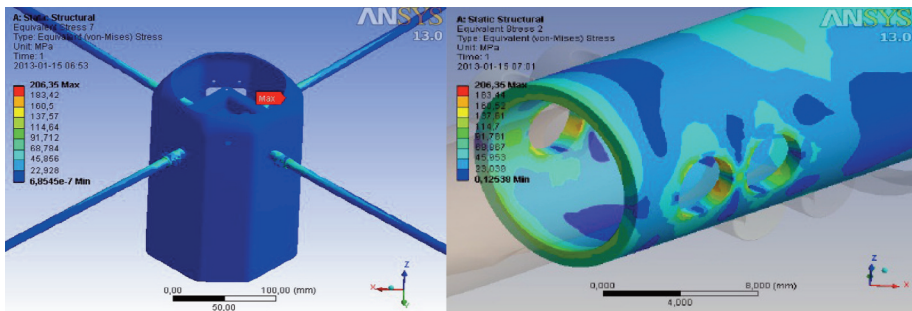
Rys. 4.1. Model CAD wiroplata programie CATIA v5

Choć w trakcie projektowania model był wielokrotnie weryfikowany pod względem wytrzymałościowym to również i wersja ostateczna poddana została takiej procedurze. Gotowy model w odpowiednim formacie wyeksportowany został do programu Ansys Workbench, gdzie stworzona została siatka strukturalna (rysunek 4.2), połączenia kontaktowe, zdefiniowane zostały warunki podparcia oraz siły działające na obiekt (przy uwzględnieniu odpowiedniego współczynnika bezpieczeństwa), a następnie dokonano obliczeń wytrzymałościowych.



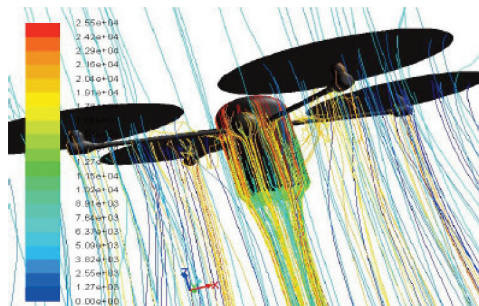
Rys. 4.2. Strukturalna siatka obliczeniowa do modelu MES

Ogólne wyniki tych obliczeń przedstawione zostały na rysunku 4.2. Zgodnie z teorią największe naprężenia były obecne u podstawy ramienia obciążanego pochodząca od ciągu generowanego przez silniki elektryczne. W całym modelu największe naprężenia powstały w okolicach kontaktu otworu ze sworzniem. Nie przekraczały one jednak 210 MPa, czyli były prawie o 100 MPa niższe niż granica plastyczności stosowanego kompozytowego materiału.



Rys. 4.3. Naprężenia zredukowane w modelu

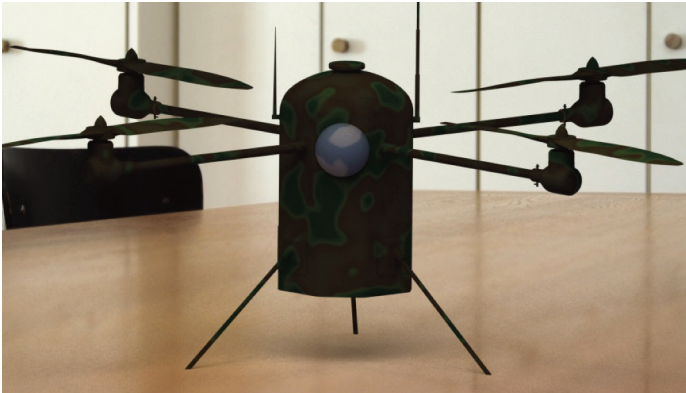
W celu weryfikacji teorii o wpływie tarczy śmigła na uzyskiwany ciąg model z programu CATIA uproszczono i wyeksportowano do programu Gambit. Tam ponownie stworzono trójwymiarową siatkę cyfrowego tunelu aerodynamicznego po czym przy wcześniej stosowanych warunkach brzegowych wykonano analizę CFD opływu. Rysunek 4.4 przedstawia jej wyniki. Jedynie pojedyncze linie prądu łączą tarczę śmigła z kadłubem co w praktyce powoduje iż teoretyczny ciąg jest porównywalny z otrzymywanym ciągiem. Wyniki analizy CFD potwierdzają tą zależność.



Rys. 4.4. Linie prądu opływające uproszczony model

## 5. PODSUMOWANIE

Do stworzenia wstępnego modelu projektowego (którego wizualizacja widoczna jest na rysunku 5.1) konieczna była nie tylko dogłębna analiza rynku, lecz przede wszystkim wykorzystanie komputerowych narzędzi CAD/CAM/CAE. Pozwoliły one nie tylko na sprawdzenie modelu pod względem opływu i wytrzymałości, lecz również umożliwiły wysuwanie tez i ich weryfikację. Choć jedynym sposobem na walidację otrzymanych wyników jest przeprowadzanie drogich badań eksperymentalnych, to w warunkach uczelnianych komputerowe systemy wspomagania pozwalają na stworzenie modelu będącego dobrym przybliżeniem rzeczywistości.



Rys. 5.1. Wizualizacja modelu CAD wiroplata

## BIBLIOGRAFIA

- [1] D'Angelo, R., Levin, R. (2011). Design of an Autonomous Quadrotor UAV for Urban Search and Rescue. A Major Qualifying Project Report. Worcester Polytechnic Institute.
- [2] Muraszkowski, A. (2009). Rejestracja i analiza ruchu obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. Politechnika Wrocławska.
- [3] Pounds, P. Mahony, R., Corke, P. Modeling and Control of a Quad-Rotor Robot. Australian National University.
- [4] Seddon, J., Newman, S. (2002). Basic Helicopter Aerodynamics. Blackwell Science.

MACIEJ PAWEŁCZYK, PRZEMYSŁAW BIBIK

## **USAGE OF MODERN ENGINEERING SOFTWARE IN THE DESIGN OF UNMANNED ROTORCRAFT**

### *Abstract*

*The paper briefly presents main aspects of designing an unmanned rotorcraft. The main focus was on the problems, that the designer has to face during concept phase, initial design, optimization of the structure and selection of modules and materials. Paper presents main stages of construction using technical knowledge acquired from the CAD/CAM/CAE software as well as economical models.*