

KONKURS NA NAJLEPSZE PRACE DYPLOMOWE WIMiR

VI Konkurs Na Najlepsze Prace Dyplomowe Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki 2016/2017 – prace inżynierskie



Bartosz PRZEPIÓRSKI

MiBM



Projekt układu przeniesienia napędu ultralekkiego wodolotu zasilanego ogniwami fotowoltaicznymi Design of powertrain for ultralight hydrofoil boat powered by solar cells.

promotor: dr inż. Jerzy Wojciechowski – Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska

STRESZCZENIE

W pracy zaproponowano różne koncepcje układu przeniesienia napędu w ultralekkim wodolocie zasilanym ogniwami fotowoltaicznymi. Przedstawiono kryteria konstrukcyjne i metodę którą wyznaczono parametry jakie musi mieć zespół napędowy. Dokonano analizy koncepcji i wybrano najlepszą według autora do dalszego rozwoju. Przedstawiono metodę projektowania śruby napędowej i pylonu, a także zaproponowano metodę rozwiązania zagadnienia nadsterowności wodolotu.

1. Cel pracy:

Celem pracy jest zaproponowanie i analiza projektu układu przeniesienia napędu jednoosobowej łodzi wyposażonej w ognia fotowoltaiczne o mocy 950 Wp (Watt-peak) i akumulatory o pojemności do 1750 Wh. Na konstrukcję wpływa wiele zmiennych spowodowanych zaproponowaną technologią, które ujawniają się dopiero w procesie wytwarzania. Podmiotem opracowania są najważniejsze parametry konstrukcyjne, a mniejsze elementy takie jak elementy mocujące nie zostaną przedstawione, ponieważ ich forma może ulegać zmianie.

Łódź jest projektowana w ramach projektu AGH Solarboat Team i docelowo ma wystartować w zawodach Monaco Solar Boat Challenge. Jest to pierwszy taki projekt na Uczelni, a zarazem pierwszy projekt łodzi solarnej poruszającej się na hydroskrzydłach w Polsce. Z tego powodu wiele parametrów należy ustalić na podstawie analizy i obserwacji istniejących rozwiązań.

Zawody w Monaco wymagają od urządzenia przeciwnych parametrów takich jak niski pobór mocy, duża szybkość, zwrotność i bezpieczeństwo. Wysoki reżim pracy zespołu napędowego wymaga dużej sprawności układu przeniesienia napędu przy średnich prędkościach płynięcia w części maratonowej wyścigu, jak i w sprincie. Częścią wyścigu jest również slalom, wymagający małej inercji i dużej zwrotności przy zachowaniu stateczności kursowej na bezpiecznym poziomie.



Zawody Monaco SolarBoat Challenge, łódź poruszająca się na hydroskrzydłach.

2. Wyznaczenie zapotrzebowania mocy:

Przy charakterystycznej dla kadłuba liczbie Frouda (liczba podobieństwa, opisująca dynamikę ciała w płynie) kadłub porusza się z prędkością graniczną. W momencie przekroczenia prędkości granicznej, długość fali generowanej przez dziób przekracza długość linii wodnicy. Łódź przestaje wtedy płynąć wypornościowo i przy dostarczeniu wystarczającej mocy wchodzi w półślizg. Przy odpowiednim stosunku mocy do masy, możliwe jest przejście do pełnego ślizgu.

W przypadku wodolotu AGH Solarboat minimalizacja oporów następuje w wyniku wyniesienia kadłuba ponad lustro wody tuż powyżej prędkości granicznej, przy której kadłub zaczyna płynąć w półślizgu. Charakterystykę płynięcia wypornościowego wyznaczono w zakresie do prędkości granicznej określonej liczbą Frouda, która jest liczbą podobieństwa, charakterystyczną dla kształtu obiektu.

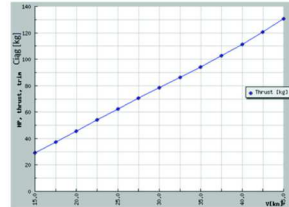
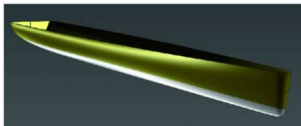
$$v_{gr} = F_n \sqrt{gL}$$

Gdzie:
 v_p - prędkość łodzi
 g - przyspieszenie ziemskie
 L - długość łodzi
 F_n - liczba Frouda, dla kadłubów smukłych wynosząca 0,45

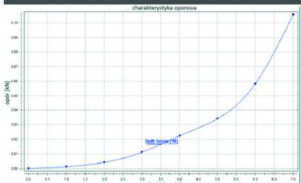
Otrzymana prędkość graniczna kadłuba wynosi 3,45 m/s.

Sprawdzono charakterystykę oporową zaprojektowanego kadłuba za pomocą programu obliczającego opory metodami numerycznymi.

W celu oszacowania jakie opory osiągałby kadłub w ślizgu przy prędkości 10 m/s skorzystano ze skryptu opierającego się na pracach Savitski'ego. Danymi wejściowymi były wymiary charakterystyczne zaprojektowanego modelu. Charakterystykę przedstawiono na rysunku (rys. 6). Oporó równy oznaczonemu na charakterystyce ciągłowy przy prędkości 10 m/s czyli 19,5 kn, wynosi 45 kg siły czyli 441 N. Potrzebna moc użyteczna wyniosłaby więc 4410 W



Charakterystyka oporowa kadłuba podczas ślizgu



Kadłub i jego charakterystyka oporowa w płynięciu wypornościowym

Wyznaczenie mocy potrzebnej do poruszania się na hydroskrzydłach:

Przeważające w wyścigach jednostki wyposażone są w hydroskrzydła, wynoszące kadłub powyżej lustra wody, rozważono więc ich zastosowanie. Sprawdzono jakie opory występowałyby w przypadku zastosowania płatów nośnych.

Siłę nośną i opór hydroskrzydła opisują identyczne wzory co siłę nośną skrzydła lotniczego:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_l \cdot v^2$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_d \cdot v^2$$

Gdzie:
 C_l - współczynnik siły nośnej.
 ρ - gęstość wody
 S - powierzchnia referencyjna skrzydła
 C_d - współczynnik oporu hydrodynamicznego

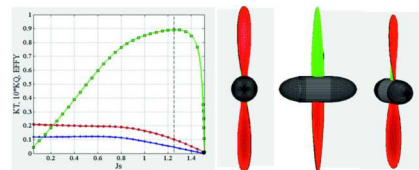
Przekształcając wzór na siłę nośną otrzymano wymaganą powierzchnię skrzydła, w zależności od ciężaru łodzi i zastosowanego profilu. Na tej podstawie otrzymano przybliżoną charakterystykę oporów hydroskrzydła.

3. Zaprojektowany układ przeniesienia napędu

Na podstawie analizy, zdecydowano się na zaprojektowanie podowego układu przeniesienia napędu. Aby zrealizować ten cel, śruba musi znajdować się pod powierzchnią wody podczas gdy kadłub będzie nad lustrem. Obrótowy płuwa sterowa zintegrowana ze śrubą zapewnia zwrotność zarówno w niskich prędkościach dzięki wektorowaniu ciągłemu jak i wysokich dzięki sile nośnej wychylonej pletwy.

Przyjmując dwukrotny nadmiar parametryczny, sprawność układu przeniesienia napędu na poziomie 75% i sprawności silnika na poziomie 90%, przy prędkości 10 m/s dla wyznaczonych oporów układ potrzebowałby mocy ok 4,15 kW przy maksymalnym obciążeniu. Jako napęd dobrano silnik Q80-11M V2 firmy Hacker (rys. 8). Jest to bez szczotkowy silnik prądu stałego, o mocy znamionowej 3,25 kW z możliwością przeciążenia do 4,5 kW z charakterystyką utrzymującą sprawność na poziomie 90% w przedziale prędkości obrotowej $n=2000+5000 \text{ min}^{-1}$. Silnik dobrano ze względu na jego niską masę, łatwą regulację i wysoką sprawność.

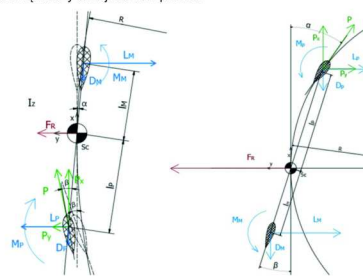
Aby uzyskać zadowalającą sprawność i rozmiary śruby, prędkość obrotową zredukowano za pomocą przekładni Apex-Dyna ABR042 składającej się z przekładni katowej na pierwszym stopniu i planetarnej na drugim o przełożeniu $i=3$. Za wał łączący silnik z przekładnią zaproponowano wałek giętki, pracujący jako sprężyno. Wynika to z faktu podatności układu na odkształcenia pod wpływem sił hydrodynamicznych. Ponieważ zastosowanie katalogowej śruby napędowej wiązałoby się z dużymi stratami na sprawności, określono analitycznie podstawowe parametry następnie zoptymalizowano geometrię śruby za pomocą skryptu OpenProp w programie MatLab.



Charakterystyka i geometria zaprojektowanej śruby

4. Zagadnienie sterowności łodzi w relacji do umieszczenia napędu.

Dokonano analizy sił i momentów działających na wodolot w momencie poruszania się na hydroskrzydłach, podczas brania zakrętu. Pierwotnie zakładany układ, w którym pylon napędowy znajdował się z tyłu, wykazuje cechy łodzi nadsterownej. Aby brać zakręty z mniejszymi stratami energii, napęd z obrotową pletwą sterową należy umiejscowić z przodu.



Układ dynamiczny wodolotu z napędem umieszczonym na rufie. Po prawej stronie układ z napędem przodem. FR - siła odśrodkowa działająca na skręcającą łódź, R - promień skrętu, Sc - środek ciężkości, L - siła nośna wytwarzana przez wychylony pylon, D - opór hydrodynamiczny wychylonego pylonu, P - ciąg pędnika, l - odległość od środka ciężkości, α - kąt przodnego pylonu względem osi x, β - kąt tylnego pylonu, M - moment hydrodynamiczny własny wychylonego pylonu, Iz - moment bezwładności łodzi w osi obrotu, indeksami P przy wielkościach oznaczono pylon napędowy, indeksem M - pylon główny hydroskrzydła

Układ z napędem tylnym opisują równania:

$$\sum F_x = F_R + F_D + F_P - L_M = 0$$

$$\sum M_{Dz} = L_M \cdot l_M \cdot \cos \alpha + D_M \cdot l_M \cdot \sin \alpha - M_M + L_P \cdot l_P \cdot \cos \beta - D_P \cdot l_P \cdot \sin \beta + M_P + F_P \cdot l_P \cdot \cos \beta + F_D \cdot l_P \cdot \sin \beta - \frac{d^2 z}{dt^2} l_z = 0$$

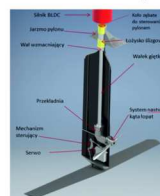
Ponieważ cosinusy niewielkich kątów są bliskie zeru, równanie można uprościć:

$$L_M \cdot l_M + L_P \cdot l_P = \frac{d^2 z}{dt^2} l_z$$

Z równania wynika, że aby spełniona była równość, człon przyspieszenia kątownego nie może być zerowy, tym samym jest to przypadek nadsterowności. Rozpatrzono przypadek umieszczenia układu napędowego z przodu łodzi. Układ opisano równaniami:

$$\sum F_x = F_R - L_P - F_D - L_M$$

$$\sum M_{Dz} = L_M \cdot l_M \cdot \cos \beta + D_M \cdot l_M \cdot \sin \beta + M_M - L_P \cdot l_P \cdot \cos \alpha - D_P \cdot l_P \cdot \sin \alpha + M_P - F_P \cdot l_P \cdot \cos \alpha + F_D \cdot l_P \cdot \sin \alpha - \frac{d^2 z}{dt^2} l_z = 0$$



Rysunek złożony zaprojektowanego układu

Pylon - pylon został zaprojektowany tak, aby w jak największym przekrojach umieścić wszystkie podzespoły. Geometria została oparta na profilach symetrycznych serii NACA. Zaproponowano konstrukcję cienkościenną laminatową z kompozytu węglowo-epoksydowego. Elementy montażowe do podzespołów zostały zaprojektowane tak, aby było możliwe ich wklejenie na etapie laminowania metodą infuzji próżniowej, bądź wklejenie klejem metakrylowym. Śruba i jej mocowanie mają konstrukcję dzieloną, tak aby możliwe było jej wyfrezowanie, w jak najprostszymi operacjach technologicznych, a kąt natarcia łopaty był regulowany.

Pod przekładnią znajduje się senowomechanizm, mający na celu sterowanie kątem natarcia hydroskrzydła pomocniczego.