

INFORMACJE TECHNICZNE DLA ENTUZJASTÓW BUDOWY WIATRAKOWCÓW

Opracowane przez Jeana Fourcade

(Jean Fourcade pracuje dla French Space Agency przy obliczaniu trajektorii satelity. Jego hobby to latające wiatrakowce na południowym-zachodzie Francji. Od pięciu lat studiuje mechanikę i aerodynamikę lotu wiatrakowca.)

Stateczność podłużna wiatrakowca

Stateczność podłużna wiatrakowca zawsze była pasjonującym tematem debat pomiędzy pilotami. Zjawiska z nią związane, takie jak PIO (Pilot Induced Oscillation – oscylacje wywołane przez pilota) i PPO (Power Push Over – nagła utrata mocy), zostały omówione w kilku artykułach magazynu „Rotorcraft” i w kilku klasycznych książkach dotyczących wiatrakowców.

Dlatego też Uniwersytet w Glasgow opracował niedawno kompletne studium matematyczne dotyczące tego problemu. Praca ta była prowadzona przez brytyjski Urząd Lotnictwa Cywilnego (UK Civil Aviation Authority) i przedstawia parametryczne studium stateczności podłużnej wiatrakowca.

Stwierdzono w niej: „stateczność podłużna wiatrakowca jest w niewielkim stopniu zależna od szerokiego zakresu charakterystyk projektowych.”

„Jako wyjątek zostało określone pionowe położenie linii działania ciągu śmigła w stosunku do środka ciężkości.”

Stateczność lub niestateczność konfiguracji może być określona w zależności od położenia linii działania ciągu śmigła.

Całkowite studium stateczności podłużnej wiatrakowca wykracza poza możliwości tego artykułu. Jednak kilka prostych rozważań przedstawiono, tak aby każdy mógł zrozumieć podstawy stateczności i jej oddziaływanie na konstrukcję wiatrakowca.

Istnieją dwie drogi studium stateczności w przedmiocie statków powietrznych: stateczność statyczna i stateczność dynamiczna.

Stateczność statyczna, jak sama nazwa sugeruje, nie jest związana z charakterystykami bezwładnościowymi statku powietrznego. Jest tylko kryterium geometrycznym.

Stateczność dynamiczna jest najpełniejszym studium stateczności, lecz jednocześnie najbardziej złożonym. Wymaga ona pisania równań ruchu wytrimowanego (wyważonego) statku powietrznego i obserwacji, jak statek powietrzny reaguje na dowolne zaburzenia (zakłócenia). Stateczność dynamiczna wiatrakowca nie różni się zbytnio od stateczności innych statków latających.

Podobnie jak dla samolotów i śmigłowców, w przypadku wiatrakowców również istnieją dwa tryby oscylacji: tryb krótkookresowy i tryb długookresowy (zwany także trybem fugoidalnym - phugoid mode). Tryb krótkookresowy jest oscylacją pochylania statku powietrznego, głównie przy stałej prędkości, podczas gdy tryb fugoidalny jest oscylacją pochylania głównie przy stałym kącie natarcia.

Elementem odróżniającym wiatrakowce od innych statków powietrznych (nawet od śmigłowców) jest to, że posiadają o jeden stopień swobody więcej, którym jest prędkość wirnika. Istnieje powiązanie pomiędzy tą prędkością a trybem fugoidalnym, które wskazuje na potencjalne problemy z prowadzeniem wiatrakowca wynikające z niestateczności trybu fugoidalnego.

Celem tego artykułu jest omówienie wyłącznie zagadnienia stateczności statycznej. Zagadnienie to ma ogromne znaczenie przy zrozumieniu poprawnego umiejscowienia CG (środku ciężkości) względem sił występujących w ruch podłużnym. Jednocześnie pojęcie stateczności statycznej nie wymaga znajomości rozległych podstaw matematycznych.

Przeanalizujemy definicje stateczności statycznej.

W inżynierskiej praktyce, gdy chcemy analizować stateczność względem podanego parametru, rysujemy krzywą: współrzędna x reprezentuje dany parametr, a współrzędna y przyspieszenie lub coś proporcjonalnego do tego parametru.

Ruch podłużny wiatrakowca jest opisany przez pięć parametrów: prędkość, kąt natarcia kadłuba, orientację pochylania, prędkość kątową pochylania i prędkość wirnika. Stateczność statyczna może być analizowa-

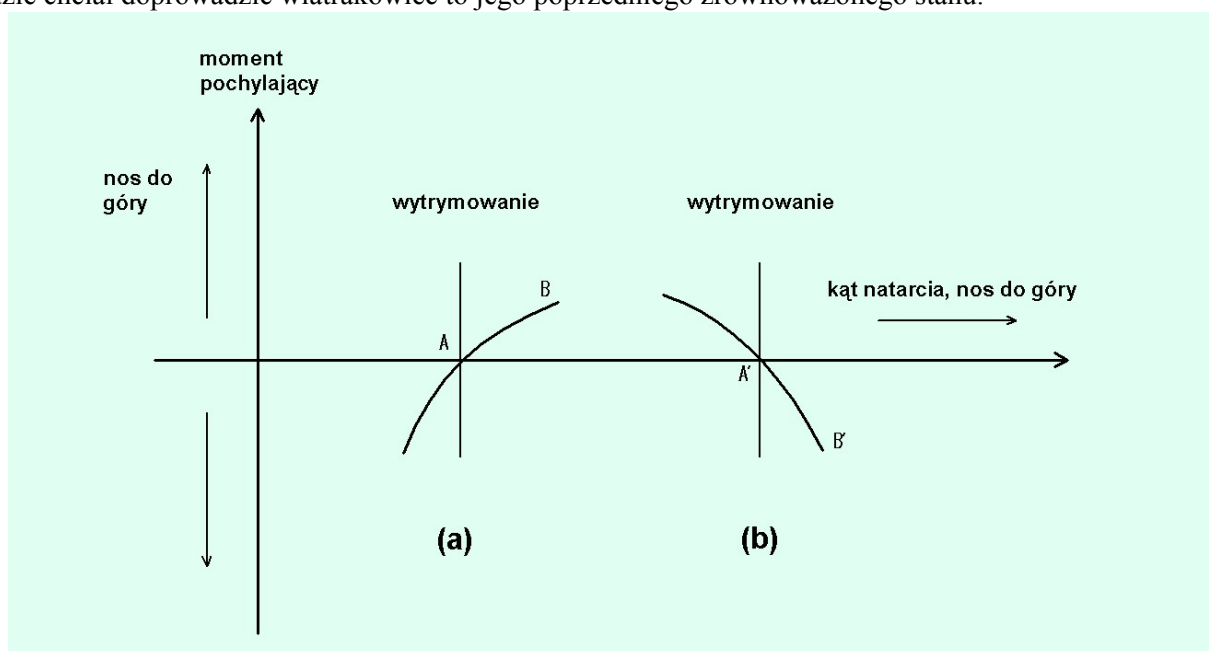
na pod kątem każdego z nich. W tym studium uwzględnimy tylko kąt natarcia kadłuba, który jest jednym z najważniejszych parametrów.

Pochylenie w ruchu podłużnym wiatrakowca zależy wyłącznie od momentów pochodzących od sił działających w płaszczyźnie podłużnej. Dlatego też, w celu przeprowadzenia analizy stateczności statycznej względem kąta natarcia, musimy narysować momenty pochylające względem kąta natarcia i zobaczyć, jak te momenty się zmieniają.

Konwencja znaków jest następująca: kąt natarcia zmienia się na dodatni (od stanu równowagi), kiedy dziób idzie do góry i odpowiednio dodatnim momentem pochylającym jest moment zadzierający dziób do góry.

Oczywiste jest, że aby lecieć lotem ustalonym, pochylenie musi być stałe i dlatego moment całkowity (wypadkowy), obliczony dla wszystkich występujących sił, musi być równy zero. Dlatego też, zrównoważone punkty leżą na osi x .

Definicja stateczności statycznej może być wyrażona następująco: powiemy, że wiatrakowiec jest statycznie stateczny przy danym kącie natarcia, kiedy wahania ustawionego kąta natarcia wywołają moment, który będzie chciał doprowadzić wiatrakowiec to jego poprzedniego zrównoważonego stanu.



Rys. 1. Moment pochylający w funkcji kąta natarcia.

Przeanalizujmy przypadek (a) przedstawiony na rys. 1. Punkt A jest punktem równowagi. Rozważmy zaburzenie zwiększające kąt natarcia do punktu B (na przykład pionowy podmuch). Po zmianie kąta natarcia, moment pochylający przestaje być równy zero. Widać na rysunku, że punkt B nie jest punktem równowagi, ponieważ nie leży na osi x . Jeśli nachylenie krzywej, jak w tym przypadku, jest dodatnie, dodatni moment pochylający, zwiększając pochylenie wiatrakowca, zwiększa kąt natarcia. Przypadek (a) jest niestateczny, co oznacza, że kiedy zaburzenie zwiększa kąt natarcia, reakcja wiatrakowca potęguje to zjawisko.

Natomiast przypadek (b) jest stateczny. Kiedy zaburzenie zwiększa kąt natarcia do punktu B', powstający moment pochylający jest ujemny i działa w kierunku redukcji kąta natarcia, do czasu powrotu wiatrakowca do jego poprzedniego stanu równowagi (punkt A').

Z analizy wynika, że stateczność statyczna zależy od nachylenia krzywej, w punktach leżących na osi x lub, inaczej mówiąc, od znaku pochodnej momentu pochylającego dla danego kąta natarcia. Warunkiem stateczności statycznej jest ujemna pochodna.

Zastosujmy te reguły do sił działających na wiatrakowiec. Są cztery główne siły podłużne działające na wiatrakowiec:

- 1 - ciąg śmigła
- 2 - siła pochodząca od poziomego statecznika (siła nośna i opór)
- 3 - opór kadłuba
- 4 - ciąg wirnika (siła nośna i opór)

Aby określić wpływ na stateczność przez każdą z tych sił, musimy określić ich pochodne względem momentu pochylającego i zobaczyć jakie położenie CG jest najlepsze, aby te pochodne były ujemne.

1) Ciąg śmigła

Dla danych obrotów silnika ciąg śmigła zależy od prędkości wiatrakowca i nie jest zbyt czuły na zmianę kąta natarcia. Założmy, że moment pochodzący od ciągu śmigła jest niezależny od kąta natarcia, co pozwala nam przyjąć pochodną względem tego momentu za równą zero. Wobec tego ciąg śmigła sam w sobie, jako że nie zależy on od kąta natarcia, nie ma wpływu na stateczność podłużną (możemy powiedzieć, że w tym przypadku wyważenie jest obojętne). CG może być nad lub pod linią działania ciągu oraz przed lub za śmigłem. Powróćmy do tych rozważań później.

2) Statecznik poziomy

Wiadomo, że statecznik poziomy musi się znajdować na ogonie statku powietrznego. Właściwie można powiedzieć, że pochodna względem momentu pochylającego jest ujemna, kiedy środek parcia (punkt, gdzie są przyłożone opór i siła nośna) jest z tyłu CG. Dlatego też statecznik poziomy dodaje stateczności. Sprawność statecznika jest większa, kiedy ramię momentu jest dłuższe i kiedy aerodynamiczna siła nośna jest większa. Aby zwiększyć ramię momentu musimy umiejscowić statecznik dalej za CG, natomiast zwiększenie siły nośnej osiągniemy poprzez zwiększenie powierzchni statecznika.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż siła nośna jest proporcjonalna do kwadratu prędkości lotu i tylko proporcjonalna do kąta natarcia. Ze względu na te zależności preferowane jest umieszczanie statecznika w strumieniu zaśmigłowym, aby wykorzystać strumień powietrza o większej prędkości. Jest to szczególnie ważne w wiatrakowcach, jako że maszyny te nie latają zbyt szybko.

3) Opór kadłuba:

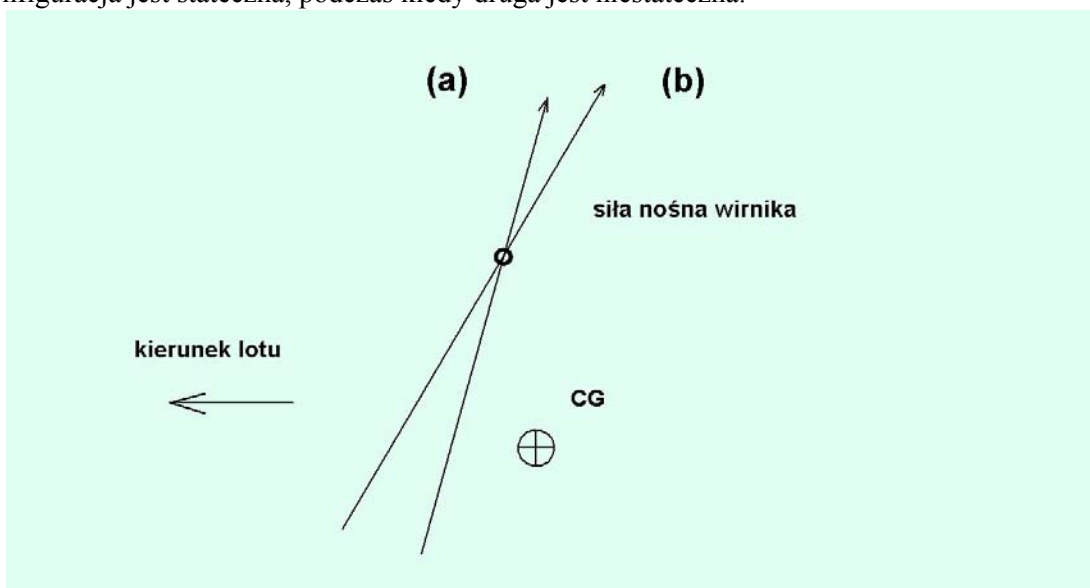
Opór kadłuba jest siłą aerodynamiczną. Tak jak dla poziomego statecznika środek parcia musi być z tyłu CG, aby pochodna względem momentu była ujemna. Obliczanie pochodnej względem momentu pochylającego nie jest więc proste w praktyce, jako że środek parcia mocno zmienia się wraz z kątem natarcia. Doświadczenie pokazuje (jest to szczególnie istotne przy całkowicie obudowanych maszynach), że pochodna względem momentu, dla zmieniającego się (czytaj zwiększającego się) kąta natarcia, ma tendencje do przybierania wartości dodatnich. Udział siły pochodzącej od kadłuba jest więc destabilizujący.

4) Ciąg wirnika

Jest to najważniejsza siła, ponieważ zasadnicze różnice w budowie wiatrakowców pochodzą właśnie od poziomego umiejscowienia CG względem linii działania siły ciągu wirnika.

Związane z tym zjawisko nosi nazwę „niestateczności wirnika względem kąta natarcia” i jest dobrze znane w słownictwie śmigłowcowym.

Aby szczegółowo wyjaśnić to zjawisko musimy przestudiować dwa przypadki: pierwszy, gdy CG jest położony przed linią ciągu, oraz przypadek drugi, gdy CG jest z tyłu za linią ciągu. Przekonamy się, że pierwsza konfiguracja jest stateczna, podczas kiedy druga jest niestateczna.



Rys. 2. Przypadek, gdy środek ciężkości leży z tyłu w stosunku do linii działania siły nośnej wirnika.

Przeanalizujemy rys. 2, gdzie CG wiatrakowca znajduje się za linią ciągu wirnika.

W punkcie równowagi wektor ciągu wirnika jest oznaczony na rysunku przez (a). Przypuśćmy, że nastąpił podmuch, który zwiększył kąt natarcia. Wzrost kąta natarcia wirnika zwiększy ciąg wirnika. Zwiększy to również różnicę ciągu pomiędzy łopata nacierającą i łopata powracającą, a to w konsekwencji zwiększy cykliczny kąt wahań łopat. Jeśli w pierwszym momencie ciąg wirnika jest prostopadły do płaszczyzny wirowania końcówek łopat, to wzrost cyklicznego kąta wahań obróci linię ciągu do tyłu. Linia działania ciągu wirnika jest reprezentowana na rysunku 2 poprzez wektor (b).

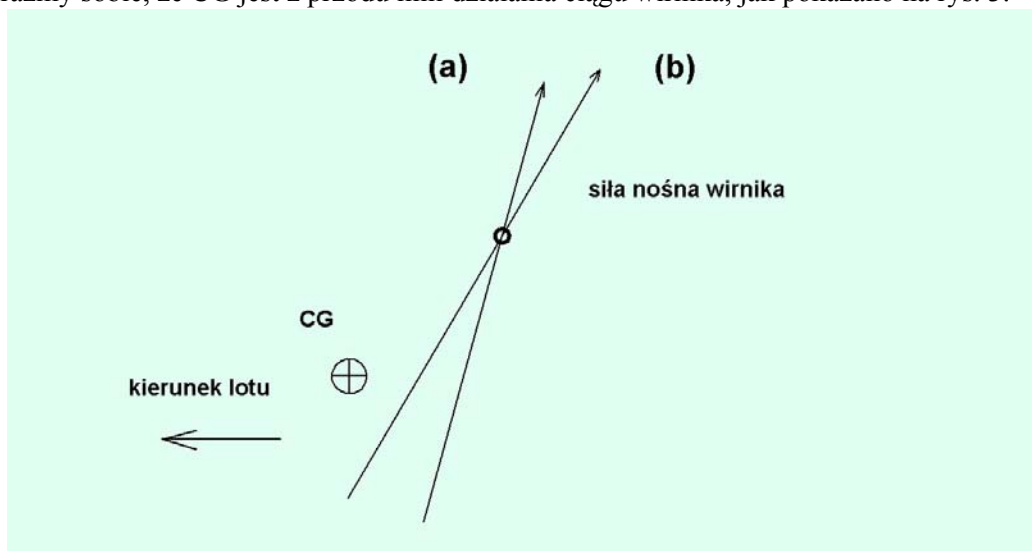
Jakie są konsekwencje działania momentu pochylającego wirnika?

Jeśli CG jest z tyłu za linią ciągu wirnika, moment pochylający wywołany przez wirnik jest dodatni (dziób do góry). Wzrost ciągu zwiększa moment, spowoduje też, że kierunek działania siły ciągu odchyli się do tyłu, co zwiększy ramię momentu, a tym samym i moment. Obydwa czynniki działają w tym samym kierunku: wzrost kąta natarcia zwiększa moment. Dlatego też pochodna momentu względem kąta natarcia jest dodatnia. Ta konfiguracja jest niestabilna.

Podsumowanie położenia CG z tyłu za linią działania ciągu wirnika:

wzrost kąta natarcia kadłuba \Rightarrow wzrost ciągu wirnika i wahań łopat \Rightarrow obydwa zjawiska zwiększają moment \Rightarrow zwiększenie kąta natarcia kadłuba = niestateczność.

Wyobraźmy sobie, że CG jest z przodu linii działania ciągu wirnika, jak pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Przypadek, gdy środek ciężkości leży z przodu w stosunku do linii działania siły nośnej wirnika.

Tym razem wirnik powoduje ujemny moment pochylający (dziób do dołu). Kiedy podmuch zwiększa kąt natarcia, wirnik reaguje w ten sam sposób co w poprzednim punkcie. Mamy zwiększony ciąg i kąt cyklicznego wahań łopat.

Lecz jakie jest działanie momentu pochylającego?

Wzrost ciągu spowoduje wzrost bezwzględnej wartości momentu (zwiększenie pochyleń dzioba). Ponieważ pochodna względem momentu jest ujemna, zmniejszy on cały moment pochylający kadłub.

Zwiększony kąt cyklicznych wahań łopat zmniejszy długość ramienia momentu pochodzącego od ciągu (jak to pokazano na rys. 3), a tym samym zmniejszy absolutną wartość tego momentu. Tym razem, te dwa zjawiska nie działają w tym samym kierunku, ale można wykazać, że wahań (zmiennosc) ciągu wirnika jest zjawiskiem ważniejszym.

W tym wypadku wzrost kąta natarcia wirnika zmniejszy moment pochylający kadłub. Pochodna jest więc ujemna i taka konfiguracja staje się stateczna (stabilna).

Podsumowanie położenia CG przed linią działania ciągu wirnika:

wzrost kąta natarcia kadłuba \Rightarrow wzrost ciągu wirnika i wahań \Rightarrow zmniejszenie całkowitego momentu pochylającego \Rightarrow zmniejszenie kąta natarcia kadłuba = stateczność (stabilność).

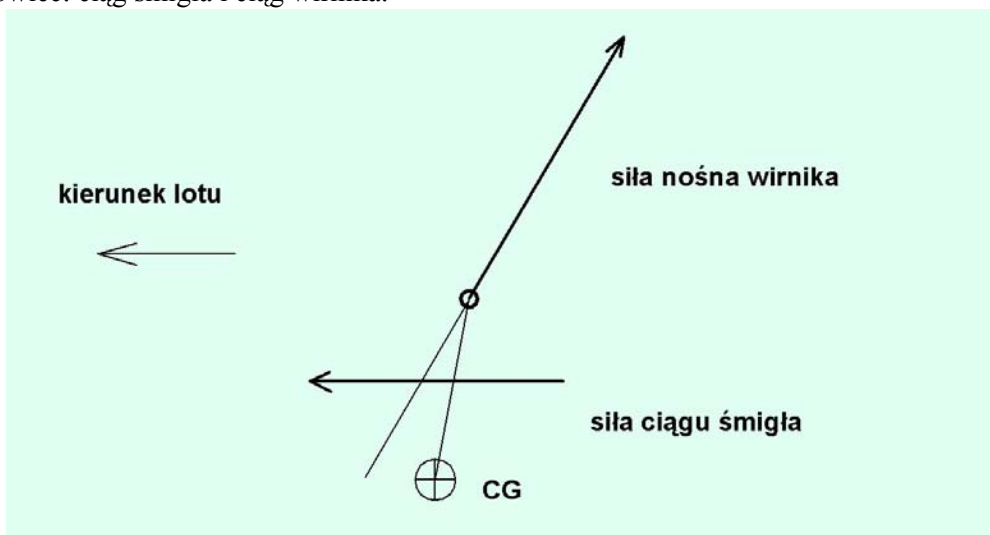
Wynika z tego, że warunkiem stateczności dla wirnika jest wyłącznie ujemny moment pochylający. Co więcej, stateczność wzrasta kiedy moment maleje.

Ciąg wirnika jest najważniejszą siłą działającą na wiatrakowiec, tak więc jego wartość oraz pochylenie linii działania (pochodna) należą do z najważniejszych parametrów. Jak widać, poprawne umiejscowienie CG względem linii ciągu wirnika ma zasadnicze znaczenie.

Powstaje pytanie, jak zaprojektować wiatrakowiec, aby moment pochodzący od jego wirnika był ujemny?

Spełnienie tego warunku zależy od pionowego umiejscowienia CG względem linii ciągu śmigła i od tego, jak dochodzi do zrównoważenia wiatrakowca.

Załóżmy dla uproszczenia, że wiatrakowiec nie ma poziomego statecznika, i że moment pochylający pochodzący od kadłuba jest pomijalny (powrócimy do tego później). W związku z tym tylko dwie siły działają na wiatrakowiec: ciąg śmigła i ciąg wirnika.



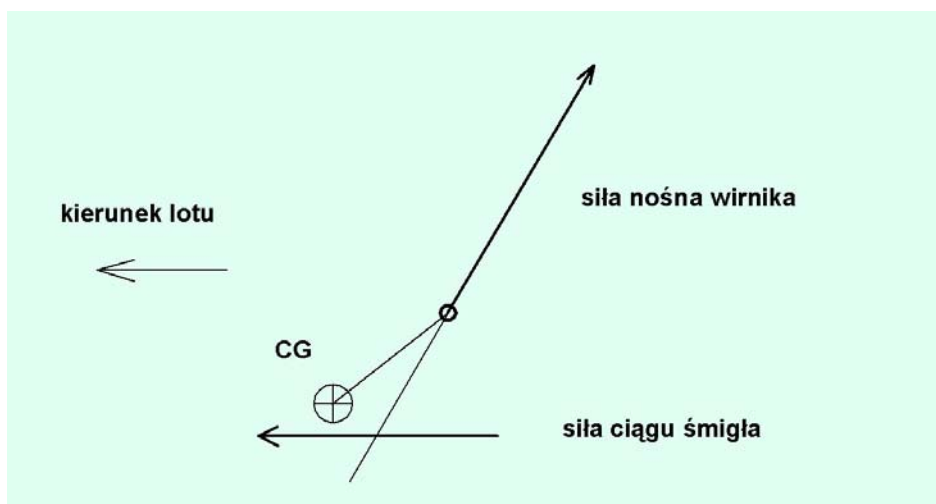
Rys. 4. Wiatrakowiec „niskoprofilowy”.

Przeanalizujmy rys. 4. Przedstawia on sytuację, gdy CG jest poniżej linii ciągu śmigła, jak ma to miejsce w większości wiatrakowców pochodzących od Bensena (low profile gyro) – wiatrakowiec niskoprofilowy.

Z analizy rysunku wynika, że ciąg silnika wywołuje moment pochylający dziób.

Aby wiatrakowiec był w równowadze, wirnik musi wywoływać moment pochylający dodatni (dziób do góry) i dlatego CG musi być z tyłu linii działania ciągu wirnika. **Taki wiatrakowiec jest niestateczny w sensie kąta natarcia kadłuba.**

Inaczej jest, gdy CG jest umiejscowiony powyżej linii ciągu śmigła – jak pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Wiatrakowiec „wysokoprofilowy”.

Moment pochodzący od śmigła jest momentem dodatnim (zadzierającym dziób do góry) i, aby zrównoważyć wiatrakowiec, wirnik musi wywoływać moment pochylający dziób. Aby to nastąpiło, CG musi być przed linią działania ciągu wirnika. **Taki wiatrakowiec jest stateczny w sensie kąta natarcia kadłuba.**

Taka konstrukcja nazywa się konstrukcją symetrycznego ciągu (high profile gyro) – wiatrakowiec wysokoprofilowy. Linia ciągu śmigła jest bardzo blisko, lecz zawsze poniżej CG.

Charakterystyki lotne takiego wiatrakowca różnią się od tradycyjnych maszyn niskoprofilowych.

W przeciwieństwie do wiatrakowców niskoprofilowych, ten rodzaj konstrukcji prawidłowo reaguje na zmiany otwarcia przepustnicy. W momencie dodania gazu pojawia się większy dodatni moment pochylający (dziób do góry), który jest zgodny z naszymi oczekiwaniami, kiedy chcemy uzyskać wyższy pułap lotu. Podobne rozumowanie można przeprowadzić kiedy zmniejszamy gaz.

Powstaje pytanie czy taki wiatrakowiec jest niebezpieczny w przypadku awarii napędu?

Testy w locie dowodzą, że nie jest. W momencie awarii silnika w wiatrakowcach niskoprofilowych musimy gwałtownie przesunąć drążek do przodu, aby uniknąć zmniejszenia prędkości i pochylić wiatrakowiec do dołu. W wiatrakowcach wysokoprofilowych zanikający w momencie awarii silnika moment zadzierający dziób do góry, spowoduje pochylenie maszyny w dół. Trzeba tylko pewnie trzymać drążek.

W naszym poprzednim rozumowaniu, przy obliczaniu wyrównowazenia, pominęliśmy moment pochodzący od oporu stawianego przez konstrukcję. Wartość tego momentu zależy od pionowego położenia środka oporu względem CG. Jak już wcześniej zauważyliśmy tendencją tego momentu jest pochylenie dziobu i destabilizacja. Oczywiście jest, że moment ten, pochylając dziób pomniejsza stateczność, ponieważ aby wyrównoważyć lot wymusza on zwiększenie momentu od wirnika nośnego. To zjawisko jest bardzo niekorzystne przy dużych prędkościach. Aby temu przeciwdziałać musimy dodać statecznik poziomy z wstępnym ujemnym kątem natarcia, aby moment pochodzący od statecznika zadzierał dziób do góry wraz ze wzrostem prędkości. Statecznik będzie niwelował moment pochylający dziób pochodzący od oporu, a tym samym ewentualny brak stateczności.

Teraz zajmiemy się zależnościami pomiędzy dotychczasowymi rozważaniami, a PIO (oscylacje wywołane przez pilota) oraz PPO (nagła utrata mocy).

Sam termin (PIO) sugeruje, że jedyną przyczyną oscylacji jest pilot, i że są one całkowicie niezależne od maszyny. Nie jest to zgodne z prawdą. Za oscylacje w głównej mierze odpowiedzialne są charakterystyki statyczne wiatrakowca. Pilot te oscylacje potęguje. Z mojego punktu widzenia, powinno się mówić o stateczności lub niestateczności. PIO powinno być rozważane jako brak stateczności.

Dotychczasowe rozważania powinny przekonać pilotów, że wysokoprofilowe wiatrakowce z poziomym statecznikiem są mniej skłonne do PIO niż wiatrakowce innych konstrukcji.

Teraz chciałbym dodać kilka słów o PPO.

PPO różni się zasadniczo od PIO. Nawet konstrukcja, która ma skłonności do PIO, może być pilotowana poprawnie dzięki należytemu treningowi. Natomiast PPO zdarza się nagle, podczas lotów w wietrznych warunkach. Fakt, że to zjawisko zdarza się bez żadnego ostrzeżenia, czyni je jednym z najgroźniejszych.

Jeśli lataasz na niskoprofilowym wiatrakowcu bez poziomego statecznika, musisz się liczyć z tym, że w chwili wystąpienia pionowego podmuchu do dołu, łopaty wirnika zostają odciążone. Z powodu braku ciągu wirnika, bardzo duży moment pochylający dziób, pochodzący od silnika, wywróci wiatrakowiec.

Jest możliwe obliczenie czasu obrotu takiego wiatrakowca o 180 stopni. Rozważmy na przykład jednomiejscowy wiatrakowiec, który waży około 330 pounds (150 kg). Zakładamy, że CG jest 25 cm poniżej linii ciągu śmigła, i że ciąg wynosi około 200 pounds (90 kg). Do całkowitego odciążenia łopat wirnika potrzebny jest podmuch w dół o wartości około 40 feet per second (12 m/s = 43 km/h). Jest to silny podmuch, lecz takie sytuacje się zdarzają. Jeśli pilot nie zareaguje natychmiast redukując gaz, to w ciągu niecałej sekundy nastąpi obrót o 180 stopni. Każdy potrafi zrozumieć niebezpieczeństwo tej sytuacji.

Co możemy zrobić aby tego uniknąć ?

Po pierwsze: musimy dodać statecznik poziomy. W stosunku do podmuchu w dół, statecznik wywoła przeciwny moment, nie dopuszczając do wywrotki.

Po drugie: musimy unikać takich konstrukcji, w których ciąg śmigła powoduje pochylenie dziobu w momencie odciążenia wirnika. Dlatego też musimy tak umieszczać śmigło, aby linia działania ciągu tego śmigła była bardzo blisko, lecz poniżej CG, tak aby ciąg śmigła powodował moment zadzierający dziób do góry. Moment zadzierający nos do góry zwiększy kąt natarcia wirnika, a tym samym dociąży łopaty.

Rozwiązania do uniknięcia PPO są takie same, jak do redukcji PIO - wiatrakowiec wysokoprofilowy.

Na zakończenie, kilka moich przemyśleń na temat wiatrakowców ze śmigłem pchającym.

Uważam że:

Wiatrakowce niskoprofilowe - najbardziej popularne, bez poziomego statecznika - są bardziej skłonne do PIO z powodu braku stateczności, ponadto są **NIEBEZPIECZNE** z punktu widzenia PPO. Ten rodzaj

wiatrakowców nie może być użytkowany w bardzo wietrznych warunkach i przy dużej prędkości lotu. **Z mojego punktu widzenia, ten rodzaj wiatrakowców w ogóle nie powinien być użytkowany.**

Wiatrakowce niskoprofilowe z prawdziwym statecznikiem poziomym, przez prawdziwy statecznik rozumieć wystarczającą powierzchnię ogona oraz odpowiedni profil lotniczy. Statecznik poziomy, w celu poprawienia jego efektywności, należy umieścić – jeśli to możliwe – w strumieniu zaśmigłowym. **Wiatrakowce te, nie są najlepsze, ale także nie najgorsze.**

Wiatrakowce wysokoprofilowe z prawdziwym statecznikiem poziomym, są mniej podatne na PIO a PPO nie stanowi dla nich problemu. **Wiatrakowce te są najlepszym i najbezpieczniejszym rozwiązaniem.**

Na niestatecznej konstrukcji można latać, ale nie każdy to potrafi. Nawet dla bardzo dobrego pilota niestabilna konstrukcja jest bardziej niebezpieczna niż konstrukcja stabilna.

Tłumaczył Robert Busz, opracowanie Jan Romaniak