

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZWIĘKSZENIA PRĘDKOŚCI PRZELOTOWEJ I ZMNIEJSZENIA POZIOMU HAŁASU WIATRAKOWCA

SŁAWOMIR CIEŚLAK

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Praca zawiera wstępną analizę możliwości zwiększenia prędkości przelotowej wiatrakowca oraz redukcji emisji hałasu. Wykonano obliczenia numeryczne mające na celu sprawdzenie, czy możliwa jest autorotacyjna praca wirnika nośnego przy stosunkowo wysokiej wartości względnej prędkości lotu (μ).

1. WPROWADZENIE

Powszechnie produkowane i użytkowane na świecie wiatrakowce są zazwyczaj maszynami prostymi w konstrukcji, łatwymi w obsłudze oraz niedrogimi zarówno w procesie wytwarzania jak i eksploatacji. Jednocześnie nie zaskakują swoimi możliwościami manewrowymi, a także nadzwyczajnymi osiągnięciami.

Współczesne kierunki rozwoju tego typu wiroplątów narzucają jednak konieczność projektowania wiatrakowców, dorównujących swoimi lotnymi możliwościami nawet nowoczesnym śmigłowcom, a jednocześnie będących ekonomicznymi i szybkimi środkami transportu dalekiego zasięgu.

Zwiększenie prędkości lotu autożyra może jednak spowodować wzrost emisji hałasu, szczególnie wywołanego dużą wartością liczby Macha przy opływie końcówki łopaty nacierającej. Zjawisko to byłoby z pewnością dokuczliwe dla mieszkańców terenów, w pobliżu których wiatrakowce te mogłyby być użytkowane. Dlatego rozważa się loty z prędkością obrotową wirnika nośnego zmniejszoną w stosunku do wartości nominalnych obrotów, przy których zwykle użytkowane są wiropląty. Należy jednak sprawdzić możliwości uzyskania zjawiska autorotacji na wolno obracającym się wirniku wiatrakowca poruszającego się ze stosunkowo dużą, jak dla wiroplątów, prędkością lotu.

W niniejszej pracy dokonano analizy możliwości zwiększenia prędkości lotu z jednoczesnym zmniejszeniem poziomu emitowanego hałasu wiatrakowca wyposażonego w trójłopatowy wirnik nośny zaadaptowany od niewielkiego śmigłowca klasy lekkiej.

2. DANE WEJŚCIOWE I ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

W analizach przedstawionych w pracy zakłada się, że prędkość łopaty nacierającej nie może przekraczać wartości 0,75 Macha przy prędkości lotu równej 500 km/h. Prędkość kątową wirnika nośnego przy takich warunkach określa się wyrażeniem:

$$\Omega = \frac{Ma_k \cdot a_d - V}{R}, \quad (1)$$

gdzie:

Ma_k – liczba macha końca łopaty nacierającej,

a_d – prędkość dźwięku,

V – prędkość lotu [m/s],

R – promień wirnika nośnego [m].

Natomiast współczynnik prędkości (względna bezwymiarowa prędkość lotu):

$$\mu = \frac{V}{\Omega \cdot R}. \quad (2)$$

Zestawienie podstawowych danych wiatrakowca oraz parametrów lotu obliczonych według powyższych zależności przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Podstawowe dane oraz parametry lotu omawianego autożyra

Promień wirnika	R	3,75 m
Liczba łopat wirnika	n	3
Prędkość lotu	V	500 km/h
Ma końca łopaty	Ma_k	0,75
Prędkość kątowa wirnika	Ω	31 rad/s
Prędkość względna	μ	1,2
Masa startowa	m	798 kg

3. ZASTOSOWANIE SKRZYDŁA POMOCNICZEGO

Wirnik obracający się z mniejszą prędkością, zgodnie z zależnością 5 zdolny jest do wygenerowania mniejszej siły nośnej niż przy nominalnej prędkości obrotowej. Konieczne może się okazać zabudowanie dodatkowo skrzydła pomocniczego odciążającego rotor przy wysokiej prędkości postępowej. Zakłada się, że taki element nośny wytwarzałby nawet do 70% składowej siły potrzebnej na zrównoważenie ciężaru autożyra.

4. OGRANICZENIE EMISJI HAŁASU

Dla oceny wpływu zmniejszenia prędkości obrotowej wirnika nośnego na ograniczenie emisji hałasu dokonano obliczeń jego poziomu w [dB] na podstawie wzorów zawartych w [4], opracowanych przez Dawidson'a i Hargest'a (wzór 3) oraz Stuckey'a i Goddard'a (wzór 4).

$$SPL_{150} = 10 \log[(\Omega R)^6 A_b (C_T / \sigma)^2] - 36,7 \text{ dB}, \quad (3) \text{ zgodnie z [4]}$$

$$SPL_{150} = 10 \log[(\Omega R)^6 A_b (C_T / \sigma)^2] - 36,7 \text{ dB}, \quad (4) \text{ zgodnie z [4]}$$

gdzie:

Ω – prędkość kątowna wirnika,

A_b – powierzchnia łopat wirnika,

$$C_T \text{ – współczynnik ciągu: } C_T = \frac{T}{\rho A (\Omega R)^2}, \quad (5) \text{ zgodnie z [4]}$$

σ – wypełnienie tarczy wirnika.

W tabeli 2 przedstawiono porównanie wyników obliczeń hałasu wolno obracającego się wirnika ($\Omega = 31$ rad/s) oraz pracującego w zakresie obrotów nominalnych $\Omega_{nom} = 50$ rad/s. Obliczenia wykonane zostały w trzech wariantach wartości siły ciągu wirnika:

- całkowite zrównoważenie masy wiatrakowca przez wirnik,
- wirnik równoważy 70% ciężaru wiatrakowca (30% przejmuje skrzydło),
- wirnik równoważy 30% ciężaru wiatrakowca (70% przejmuje skrzydło).

Tabela 2. Porównanie wyników obliczeń hałasu dwiema metodami dla dwóch wartości prędkości obrotowej wirnika nośnego i trzech wartości siły ciągu

Metoda	$\Omega = 31$ [rad/s]		$\Omega = 50$ [rad/s]	
	Wzór D/H [dB]	Wzór S/G [dB]	Wzór D/H [dB]	Wzór S/G [dB]
Ciąg wirnika				
100% masy autożyra	77	76	81	82
70% masy autożyra	74	74		
30% masy autożyra	67	68		

Obydwa przedstawione wzory dają zbliżone wyniki. Zauważalne jest potwierdzenie tezy, iż zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika nośnego powoduje obniżenie poziomu hałasu. Przy jednoczesnym zmniejszeniu wymaganej siły ciągu wytwarzanej przez wirnik, dla przyjętych danych otrzymuje się redukcję poziomu hałasu aż o 14 dB.

Drugim istotnym źródłem hałasu wiatrakowca jest niewątpliwie śmigło wytwarzające ciąg poziomy, nadające możliwość ruchu postępowego. Podobnie jak dla wirników nośnych skutecznym sposobem wyciszenia tego elementu jest zmniejszenie prędkości końców łopat. Bezpośrednią realizacją tego zagadnienia może być zwiększenie ich ilości. Zgodnie z [3] taki zabieg przynosi pozytywne efekty w przypadku śmigła ogonowego śmigłowców. Dodatkową korzyścią zastosowania wielołopatowego pędnika w wiatrakowcu (np. 8 łopat) umożliwi jednocześnie uzyskanie odpowiednio wysokiej wartości siły ciągu, niezbędnej do pokonania oporów aerodynamicznych statku powietrznego przy zakładanej prędkości lotu rzędu 500 km/h.

5. ANALIZA LOTU AUTOROTACYJNEGO Z DUŻĄ PRĘDKOŚCIĄ POSTĘPOWĄ

5.1. Metoda i narzędzie obliczeniowe

Dla sprawdzenia możliwości wykonania lotu autorotacyjnego przy dużych prędkościach postępowych dokonano obliczeń numerycznych. Jako narzędzie robocze posłużył opracowany w Instytucie Lotnictwa program komputerowy służący do obliczania obciążeń wirnika nośnego – OBCWN. Danymi wejściowymi były parametry konstrukcyjne „wirtualnego autożyra” z trójkątopatowym wirnikiem nośnym.

5.2. Zakres obliczeń

Obliczenia zostały podzielone na trzy grupy ze względu na wielkość odciążenia wirnika nośnego przez skrzydło pomocnicze (jak dla obliczeń hałasu):

- brak odciążenia – wirnik wytwarza całkowitą siłę nośną potrzebną do zrównoważenia ciężaru wiatrakowca w locie poziomym,
- odciążenie wirnika w 30% – wirnik wytwarza 70% siły nośnej potrzebnej do zrównoważenia ciężaru wiatrakowca w locie poziomym,
- odciążenie wirnika w 70% – wirnik wytwarza 30% siły nośnej potrzebnej do zrównoważenia ciężaru wiatrakowca w locie poziomym.

W praktyce odciążenie wirnika zostało zrealizowane przez wprowadzenie do programu mniejszej wartości ciężaru wiatrakowca.

5.3. Dane sterowania i kryteria oceny wyników

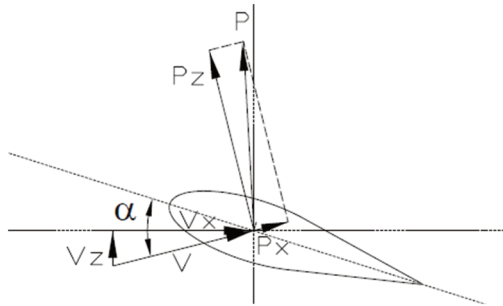
Poszczególne warianty autorotacyjnego lotu poziomego zadawane są przez zmiany parametrów sterowania: ALFW (kąt pochylenia wału wirnika), FIO (skok ogólny łopaty), TETAY (pochylenie tarczy sterującej). Kombinacje tych wielkości muszą być dobrane w taki sposób, aby uzyskać zbliżoną do zera moc na wale wirnika nośnego. Zaistnienie takiej sytuacji będzie oznaczało, że na rotor nie jest podawana moc z silnika, a równocześnie wirnik nie przekazuje mocy do układu napędowego – cała energia przejęta przez łopaty od strug opływającego je powietrza przy wykorzystaniu zjawiska autorotacji jest użytkowana na pracę wirnika nośnego: wytworzenie ciągu i pokonanie oporów.

Zgodnie z powyższymi założeniami dla lotu poziomego, siła TZO (składowa ciągu w układzie związanym z ziemią) musi równoważyć ciężar wiatrakowca przy poszczególnych wariantach obliczeniowych (100% masy, 70% masy i 30% masy wiatrakowca).

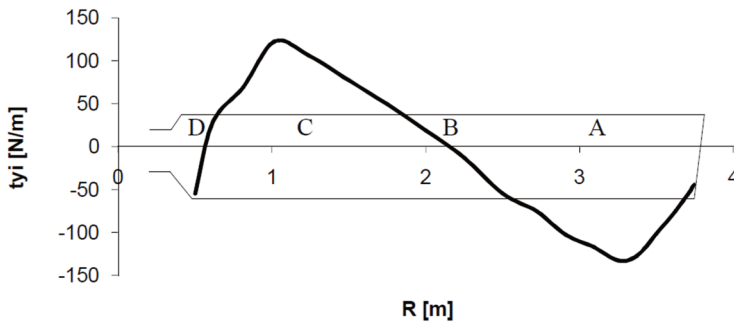
Optymalna wartość siły TXO (składowa oporu z układzie związanym z ziemią) musi być możliwie najmniejsza przy zachowaniu pozostałych parametrów wymaganych dla pożądanego stanu lotu.

Warunkiem wprowadzenia wirnika w stan autorotacji jest uzyskanie na pewnych segmentach łopaty siły aerodynamicznej (wypadkowej siły nośnej i oporu profilowego), której rzut na płaszczyznę obrotów będzie skierowany zgodnie z kierunkiem obracającej się łopaty. Będzie to siła pozwalająca utrzymać obroty wirnika nośnego, bez konieczności dostarczania mocy z silnika. Wystąpienie takiej sytuacji uwarunkowane jest wartością kąta natarcia elementu łopaty, który z kolei zależy od zmiennych sterowania, azymutu i prędkości lotu. Elementarny przykład powstawania takiego zjawiska zobrazowany na przekroju łopaty przedstawia rysunek 1.

Program OBCWN umożliwia obliczenie siły działającej w płaszczyźnie obrotów (TYI) wzdłuż całej długości łopaty w pełnym zakresie azymutu. Przykładowy wykres takiego rozkładu wzdłuż promienia przedstawia rysunek 2.

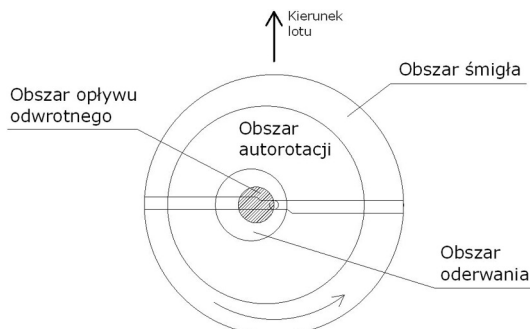


Rys. 1. Przykład mechanizmu powstawania zjawiska autorotacji, zgodnie z [1]



Rys. 2. Przykładowy rozkład siły działającej na łopate w płaszczyźnie obrotów wzdłuż promienia łopaty podczas autorotacji, zgodnie z [2]

Na wykresie (rys. 2) widać, że obszar A, zwany obszarem śmigła, jest strefą hamującą obroty wirnika, gdyż siła TYI ma zwrot przeciwny do kierunku ruchu łopaty. Punkt B jest punktem równowagi o zerowej składowej siły działającej w płaszczyźnie wirnika. Strefa C jest obszarem napędowym (autorotacji), ponieważ siła TYI powoduje przyspieszenie prędkości obrotowej wirnika. W punkcie D występuje podobna sytuacja jak w punkcie B. Analizując rozkłady wartości siły TYI wzdłuż promienia łopaty znajdującej się na kolejnych azymutach w czasie jednego obrotu można wykreślić wykres powierzchniowy przedstawiający podział dysku wirnika na charakterystyczne obszary pracy, zdeterminowane wystąpieniem dodatniej lub ujemnej siły działającej na łopate w płaszczyźnie obrotu. Teoretyczny diagram przedstawiający taki podział dla poziomego, autorotacyjnego lotu typowego wiatrakowca pokazuje rysunek 3.



Rys. 3. Podział dysku wirnika na obszary charakterystyczne podczas lotu autorotacyjnego ze składową prędkością postępową (zgodnie z [1])

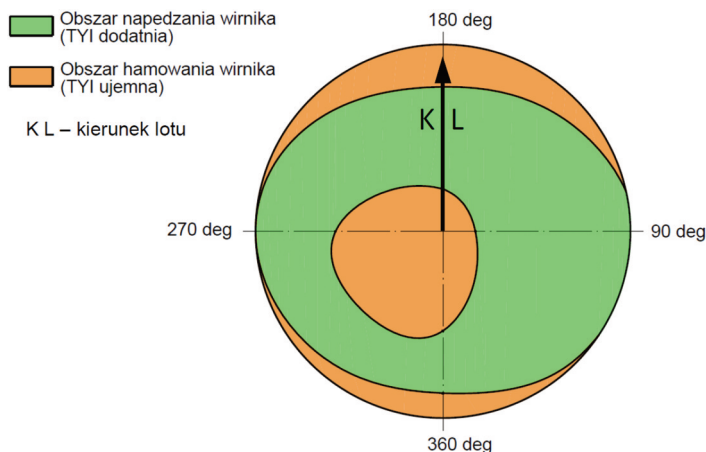
5.4. Wyniki obliczeń dla lotu z dużą prędkością postępową

Przy użyciu programu OBCWN wyznaczono kilka przypadków lotu autorotacyjnego z wartością względnej prędkości lotu $\mu = 1,2$ przy prędkości postępowej $V = 500$ km/h. Bliską zeru moc na wale udało się uzyskać zarówno dla wirnika w pełni dociążonego masą wiatrakowca jak i odciążonego przez skrzydło pomocnicze w 30% oraz 70% wartości ciężaru statku powietrznego. W tabeli 3 przedstawiono nastawy zmiennych sterowania oraz wartości otrzymanych wielkości obciążeń wirnika poddanych ocenie przy analizie wyników dla trzech wybranych stanów lotu.

Tabela 3. Dane sterowania i wyniki podstawowych obciążeń wirnika w przykładowych stanach lotu autorotacyjnego ($V = 500$ km/h)

Ciąg wirnika	ALFW	FIO	TETAY	N	TZO	TXO
[% masy]	[°]	[°]	[°]	[kW]	[N]	[N]
100	6,5	3,400	6,7	-0,05	7829	-874
70	3,5	3,557	6,3	0	5490	-529
30	0,5	5,9	3,62	0,04	2348	-336

Dla przedstawionych stanów poziomego lotu autorotacyjnego dokonano analizy rozkładu siły działającej na łopatę w płaszczyźnie obrotów wzdłuż promienia i w zależności od azymutu. Wykreślono „mapki” przedstawiające dodatnie i ujemne wartości siły TYI na powierzchni tarczy wirnika nośnego. Jako że docelowym założeniem koncepcji nowoczesnego autożyra jest uzyskanie jak największego odciążenia wirnika przez skrzydło pomocnicze przy dużych prędkościach lotu, w niniejszym opracowaniu poddaje się ocenie rozkład siły TYI dla lotu z ciągiem wirnika o wartości 30% ciężaru wiatrakowca. Powierzchniowy wykres obszarów hamujących i napędzających rotor przedstawiony jest na rysunku 4.



Rys. 4. Rozkład obszarów siły hamującej i napędzającej wirnik nośny

Na powyższym wykresie (rys.4) kolorem zielonym zaznaczono obszary dysku wirnika, gdzie występują dodatnie siły działające na łopatę w płaszczyźnie jej obrotu, kolorem pomarańczowym natomiast – obszary siły ujemnej.

Na powierzchniowej „mapce” (rys. 4) widać analogię do wykresu (rys. 2), na którym przedstawiono przykładowy rozkład siły działającej na łopatę w płaszczyźnie obrotów dla wybranego azymutu podczas lotu autorotacyjnego.

W pobliżu końców łopat uwidacznia się strefa hamowania obrotów, która jest spowodowana wystąpieniem tzw. obszaru śmigła, a także możliwością nakładania się strefy strat brzegowych. Ujemna siła działająca na łopatę w płaszczyźnie obrotu występuje także przy nasadzie łopat, gdzie tworzy się obszar oderwania łączący się ze strefą opływu odwrotnego w pobliżu azymutu 270° . W centralnej części łopat zaznacza się obszar napędzania wirnika (pole koloru zielonego) będący strefą autorotacyjnej pracy wirnika, odpowiedzialną za utrzymanie jego prędkości obrotowej.

6. PODSUMOWANIE

Na podstawie rozważań przedstawionych w niniejszej pracy, można wywnioskować, że chcąc uzyskać wysokie prędkości przelotowe autożyra, a jednocześnie niski poziom hałasu, wymagane będzie obniżenie prędkości końców łopat, a więc spowolnienie prędkości obrotowej wirnika. Skutkiem tego będą przeloty ze stosunkowo wysoką wartością współczynnika prędkości μ .

Numeryczne obliczenia wykonane za pomocą programu komputerowego do oceny obciążeń wirnika nośnego OBCWN wykazują, że możliwe są loty wiatrakowca z dużą prędkością postępową rzędu 500 km/h. Zarówno dla wiroplata o masie 798 kg jak i odciążonego przez skrzydło pomocnicze wirnika nośnego utrzymuje się stan autorotacji przy odpowiednio zadanych parametrach sterowania.

Dla wszystkich uzyskanych stanów lotu moc na wale jest równa lub bliska zero, co świadczy, że wirnik nie pobiera mocy z silnika, a także nie przekazuje jej na układ napędowy. Oznacza to, że cała energia pobrana ze strumienia powietrza jest wykorzystana do utrzymania lotu. Zakłada się, że przy sile TZO zbliżonej wartością do ciężaru autożyra obiekt będzie poruszał się poziomo.

Istnieje zauważalna zależność siły oporu wirnika TXO od zadanych parametrów sterowania. Obserwacja zmiany tej wielkości pozwala stwierdzić, iż korzystniejsze są przeloty z małymi nastawieniami kąta ustawienia wału ALFW. Taka konfiguracja pozwala na uzyskanie niskich wartości oporów wirnika nośnego.

Analiza siły działającej na łopatę w płaszczyźnie obrotów TYI dla poszczególnych azymutów umożliwiła wykreślenie rozkładu obszarów hamujących oraz napędzających wirnik. Im większe są strefy dodatnich wartości siły działających w płaszczyźnie obrotu, tym lepszy jakościowo jest lot autorotacyjny. Na mapkach rozkładu widać podobieństwo do teoretycznych założeń (rys. 3). Świadczy to o prawidłowości przebiegu zjawiska autorotacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cieślak S.: *Projekt koncepcyjny autożyra nowej generacji o poszerzonych własnościach osiągowych*, Magisterska praca dyplomowa, Politechnika Lubelska, Lublin, 2010.
- [2] Cieślak S.: *Analiza porównawcza lotu autorotacyjnego śmigłowca i wiatrakowca*, Praca przejściowa nr 2, Politechnika Lubelska, Lublin, 2009.
- [3] Golon G.: *Analiza możliwości zmniejszenia hałasu śmigłowca na przykładzie PZLW3 „Sokół”*, PZL Świdnik, Świdnik, 2008.
- [4] Johnson W.: *Helicopter Theory*, Princeton University Press, Princeton, 1980.

SŁAWOMIR CIEŚLAK

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF INCREASING CRUISE SPEED AND REDUCE AUTOGIRO'S NOISE

Abstract

The article contains a preliminary analysis of the possibility of increasing autogiro cruise speed and noise reduction. Numerical calculations were performed which aim were to verify if rotor autorotation operation is possible at a comparatively high value of the relative speed of flight (μ).