

## ZAGADNIENIA BEZROZBIEGOWEGO STARTU WIATRAKOWCA

WIESŁAW KRZYMIEŃ

Instytut Lotnictwa, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Polska, [wkrz@ilot.edu.pl](mailto:wkrz@ilot.edu.pl)

### *Streszczenie*

*Charakterystyczną cechą wiatrakowców, postrzeganą jako ich wadę, jest start z rozbiegiem – podobny do startu samolotu.*

*W ramach realizowanego w Instytucie Lotnictwa Projektu POIG obejmującego zaprojektowanie i badania nowego typu wiatrakowca, wykonano także szereg analiz oraz pewne badania mające na celu zdobycie wiedzy w zakresie skrócenia rozbiegu przy starcie wiatrakowca. Jednym z elementów tego Projektu było zaprojektowanie i wykonanie wiatrakowca-demonstratora (nielotnego), na którym na ziemi wykonano wstępne badania podzespołów pod kątem możliwości bezpiecznego wykonania startu bezrozbiegowego.*

*W artykule przedstawiono problemy związane z konstrukcją i badaniami przeprowadzonymi w celu realizacji bezrozbiegowego startu wiatrakowca (tzw. "jump takeoff").*

*Słowa kluczowe: wiatrakowiec, start bezrozbiegowy, badania naziemne.*

### WPROWADZENIE

W ostatnich latach można zauważyć wzrost zainteresowania wiatrakowcami jako tanimi i bezpiecznymi środkami komunikacji powietrznej, co jest związane z upowszechnieniem nowych materiałów i technologii. Współczesne wiatrakowce rozwijają się w dwóch zasadniczych kierunkach: lekkich konstrukcji 1-4 miejscowych oraz konstrukcji eksperymentalnych – różnego rodzaju hybryd na bazie wiatrakowców [1].

Wiatrakowce o masie startowej 200-300 kg służą głównie do latania rekreacyjnego. Cięższe, o masie 500-700 kg, są wykorzystywane do przelotów pasażerskich na małych odległościach i odpowiadają kategorii lotnictwa cywilnego PATS (Personal Air Transportation Systems).

Start bezrozbiegowy jest wykonywany przez lekkie wiatrakowce (np. [2]), jednak w przypadku większych wiatrakowców bezpieczny start wymaga rozwiązania wielu problemów.

W ramach realizowanego w Instytucie projektu POIG podjęto działania w kierunku realizacji pionowego startu na demonstratorze-wiatrakowcu I-28 A.

Oprócz ustalenia warunków i wymagań wynikających z przepisów lotniczych w zakresie dopuszczenia konstrukcji do lotu, prace obejmowały:

- przygotowanie założeń i warunków startu bezrozbiegowego,
  - skonstruowanie i wykonanie układu napędowego,
  - przygotowanie obiektu do badań,
  - opracowanie zakresu i programu wstępnych badań,
- a także obliczenia symulacyjne startu bezrozbiegowego.



Rys. 1. Demonstrator – wiatrakowiec I-28 A podczas prób [Aut., 2013]

#### PRZEBIEG STARTU WIATRAKOWCA

Start klasycznego wiatrakowca (rys. 2) obejmuje:

- uruchomienie i rozgrzanie silnika a następnie wstępne rozkręcenie wirnika nośnego tzw. prerotacja,
- podczas rozpędzania wiatrakowca następuje dalszy wzrost obrotów wirnika: po osiągnięciu odpowiednich obrotów wirnika oraz prędkości postępowej większej od minimalnej następuje oderwanie,
- dalsze rozpędzanie wiatrakowca i przejście do wznoszenia.



Rys. 2. Typowy profil startu wiatrakowca. 1 – prerotacja, 2 – rozbieg, 3 – oderwanie, 4 – rozpędzanie, 5 – wznoszenie

Stosowane układy prerotacji wirnika wiatrakowca pozwalają na osiągnięcie przez wirnik 40-60% nominalnej prędkości obrotowej tj. prędkości uzyskiwanej podczas lotu wiatrakowca z prędkością przelotową. Dla wirnika dwułopatowego o średnicy 9,4 m i ciężkości łopaty  $c = 0,2$  m wymagana moc to ok. 3-7 kW (krzywa b na rys. 4). Długość rozbiegu wynosi ok. 100 m [3].

Przedmiotem wykonanych analiz (np. [4]) i badań był start wiatrakowca wykorzystujący energię zgromadzoną przez wirnik w trakcie prerotacji. Taki rodzaj startu bezrozbiegowego polega na:

- rozkręceniu wirnika do prędkości o 30-50% większej niż prędkość nominalna przy kącie natarcia łopaty ok.  $-1^\circ$  (tj. przy minimalnym oporze aerodynamicznym),
- odłączeniu napędu wirnika i skierowaniu całej mocy silnika na śmigło,

- przestawianiu kąta natarcia łopat na ok. 6-8° w celu wykorzystania energii wirnika do oderwania i podniesienia wiatrakowca na bezpieczną wysokość,
- po rozpędzaniu wiatrakowca do prędkości minimalnej zmianę kąta natarcia łopat na ok. 2-3° (wielkości typowej dla WN wiatrakowca podczas lotu) i przejściu do normalnego lotu. Profil takiego startu przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Profil bezrozbiegowego startu wiatrakowca. Oznaczenia jak przy rys. 2

## WYMAGANIA PRZEPISÓW

Obecnie wymagania dotyczące lekkich wiatrakowców sprecyzowane są w następujących przepisach:

- amerykańskie ASTM F2352 [5],
- niemieckie BUT [6],
- angielskie CAP-643 [7].

Przepisy definiują wiatrakowiec jako wiropląt o stałym, tj. niezmiennym w czasie lotu, skoku łopat wirnika nośnego.

Układ prerotacji wiatrakowca musi spełniać wiele wymagań, z których najważniejsze to:

- musi być rozłączany po rozkręceniu wirnika,
- ma być bezpieczny podczas lotu, także w przypadku błędnej obsługi.

Konieczność realizacji zmiany skoku ogólnego WN podczas startu bezrozbiegowego wymusza wykonanie specjalnej głowicy. W tej sytuacji głowica, łopaty, układ napędowy oraz sterowania muszą spełniać odpowiednie wymagania stawiane lekkim śmigłowcom (zgodnie z odpowiednimi fragmentami przepisów śmigłowcowych). Wymagania te obejmują:

- zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości konstrukcji wirnika i napędu,
- wykonanie niezbędnych badań naziemnych wg programu uzgodnionego z nadzorem.

Zastosowanie rozwiązań, które wykorzystywane są w technice śmigłowcowej oznacza konieczność spełnienia wymagań odpowiedniej części przepisów dotyczących lekkich śmigłowców.

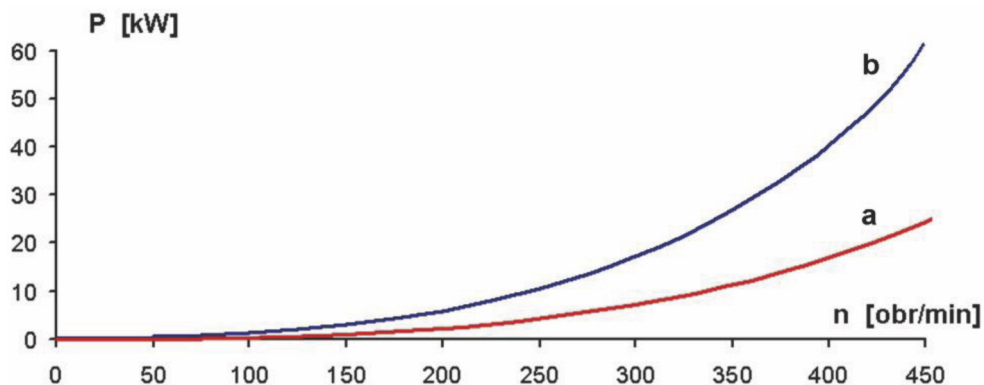
Układ prerotacji wymaga wielu prób udowadniających, że układ prerotacji bezpiecznie się rozłącza i nie załącza się (nawet przypadkowo) podczas lotu [8].

Wykonanie przez pilota prerotacji wirnika powinno być proste i bezpieczne.

## BILANS MOCY

Zapotrzebowanie mocy do rozkręcenia wirnika nośnego (WN) o średnicy 9,4 m i cięciwie 0,2 m do odpowiednich obrotów dla dwóch kątów skoku łopat przedstawiają wykresy na rys. 4. Rozkręcenie wirnika do obrotów nominalnych (ok. 350 obr/min) z łopatami ustawionymi na typowy dla wirnika wiatrakowca kąt natarcia do prędkości obrotów nominalnych wymaga mocy ok. 20-25 kW (krzywa b na rys. 4).

W przypadku rozkręcenia WN do prędkości ok. 450 obr/min, którego łopaty ustawiono na kąt natarcia odpowiadający  $c_z = 0$ , nie jest wymagana większa moc napędu, uwzględniając w tym ok. 20-30% nadmiar mocy.



Rys. 4. Wykres obliczeniowej mocy niezbędnej dla uzyskania obrotów wirnika o średnicy 9,4 m i cięciwie 0,2 m. a – kąt natarcia  $-1^\circ$  (dla  $c_{x,min}$ ), b – kąt natarcia  $+2^\circ$

### MASA PODZESPOŁÓW

Start bezrozbiegowy wymaga zabudowy na wiatrakowcu odpowiednich urządzeń do prerotacji WN oraz źródła energii. Rozwiązanie polegające na wykonaniu prerotacji wirnika przy pomocy zewnętrznego (naziemnego) źródła energii a następnie jego odłączeniu nie jest bezpieczne, a ponadto wymagałoby dodatkowych urządzeń i obsługi naziemnej.

Masa urządzeń podstawowych to:

- przekładni i układu przeniesienia napędu na WN,
- sprzęgła gwarantującego bezpieczne rozłączenie napędu,
- rozbudowanej konstrukcyjnie głowicy WN,
- WN o podwyższonej bezwładności (czyli o większej masie łopat).

W zaprojektowanym i zrealizowanym układzie napędowym (rys. 5) zastosowano:

- przekładnię przy silniku ze sprzęgłem ciernym/kłowym,
- głowica WN o skokowo przestawianym kącie natarcia łopat,
- sprzęgło jednokierunkowe w głowicy WN,
- wał napędowy zakończony przegubami Cardana.

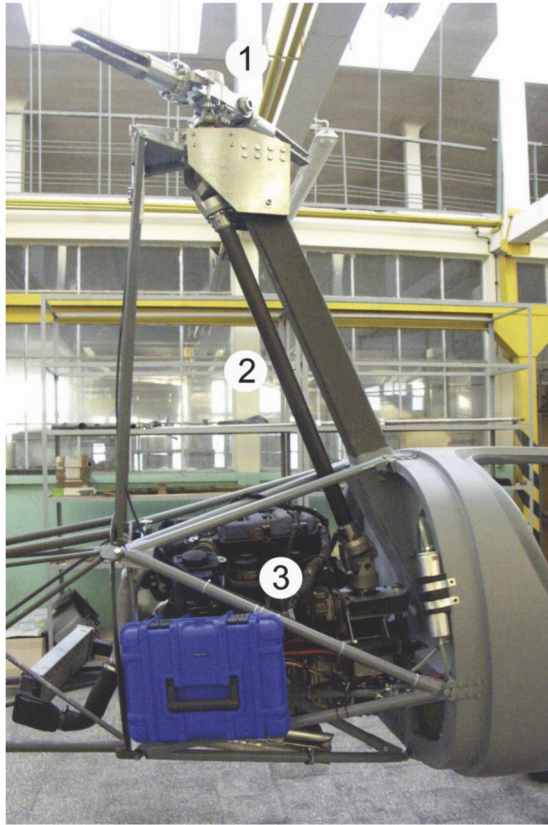
Zaprojektowana przekładnia miała sprzęgło cierne do wstępnego rozkręcenia wirnika (od 0 do kilkudziesięciu obr/min). Po „ruszeniu” wirnika cały moment przenosiło sprzęgło kłowe. W momencie osiągnięcia odpowiednich obrotów wirnika pilot mógł tą samą dźwignią rozłączyć napęd. Wzrost masy przekładni wraz ze sprzęgłem wynosił ok. 10 kg.

Dodatkowym zabezpieczeniem rozdzielającym silnik od wirnika było sprzęgło jednokierunkowe w głowicy.

Głowica [9] miała możliwość zmiany skoku ogólnego wirnika: łopaty miały u nasady przegub osiowy i za pomocą dźwigni można było zmienić ich kąt natarcia. Zastosowane rozwiązanie zwiększyło masę wirnika i układu sterowania o ok. 25 kg w stosunku do konstrukcji powszechnie stosowanej.

Do przeniesienia napędu zastosowano wał z kompozytu węglowego i dwa przeguby Cardana niwelujące niewspółosiowość osi wirnika i osi przekładni. Masa wału wynosiła ok. 15 kg.

Zastosowany układ zastąpił elektryczny system prerotacji, którego masa wynosiła ok. 15 kg (silnik wraz z przewodami i przekładnią). Podano orientacyjne masy poszczególnych podzespołów, gdyż były one zabudowane na demonstratorze do prób naziemnych, a nie na docelowym obiekcie.



Rys. 5. Układ napędowy i prerotacji demonstratora I-28 A. 1 – głowica WN o zmiennym skoku łopat wraz ze sprzęgłem, 2 – wał napędowy zakończony przegubami Cardana, 3 – silnik i przekładnia ze sprzęgłem ciernym/kłowym [Aut., 2013]

Alternatywą dla zastosowanego rozwiązania może być np. napęd hydrauliczny albo reakcyjny. Bilans mocy i wstępne obliczenia wskazywały, że masa zespołu napędu hydraulicznego nie jest mniejsza niż zastosowanego. Podobnie napęd reakcyjny wymaga specjalnej konstrukcji głowicy i łopat a ponadto potrzebne jest źródło energii, które ze względu na sprawność całego układu może mieć masę o podobnej wielkości.



Rys. 6. Zakończenie łopaty laminatowej demonstratora I-28 A [Aut., 2013]

Dodatkową masę stanowi także masa doważająca łopaty, zwiększająca bezwładność WN (w celu zwiększenia energii zgromadzonej w wirniku). Rys. 6. przedstawia końcówkę łopaty WN z trzema otworami – kanałami do wprowadzenia cylindrycznych mas wyważających wykonanych z ołowiu lub wolframu. Pierwszy i trzeci otwór służy do wyważenia łopat (tj. ujednoczenia pary łopat pod kątem masy i położenia środka ciężkości) a także do wyważenia antyflatterowego. Drugi (największy) otwór służy do dociążenia łopaty w celu zwiększenia bezwładności WN. Do prób przewidziano możliwość dociążenia każdej z łopat o ok. 1,5 kg.

## BADANIA NAZIEMNE

Program badań demonstratora I-28 A (rys. 1) obejmował wykonanie badań naziemnych, w zakresie:

1. badania podzespółów:
  - wyważenie łopat oraz całego wirnika,
  - testy eksploatacyjne silnika wraz z przekładnią i głowicą,
  - badania rezonansowe wirnika nośnego na demonstratorze,
2. badania stoiskowe:
  - próby układu napędowego WN,
  - torowanie łopat,
  - kalibracja pomiaru ciągu wirnika na stanowisku oraz skoku łopat,
  - pomiar impulsu ciągu.

Celem badań było sprawdzenie właściwości mechanicznych podzespółów oraz bezpieczne wykonanie pomiarów. Wyniki pomiarów posłużyły do weryfikacji modeli obliczeniowych, w tym symulacji startu bezrozbiegowego.

Rys. 7 przedstawia demonstrator podczas skalowania dwóch torów pomiarowych:

- pomiaru ciągu WN poprzez pomiar zależności wskazań dynamometru zamocowanego do kadłuba w miejscu śmigła oraz zakotwiczonego do podłoża od wielkości siły pionowej na głowicy,
- kąta skoku ogólnego łopat poprzez pomiar przemieszczenia popychacza (przy pomocy czujnika przemieszczeń) i elektronicznego kątomierza zamocowanego do nasady łopaty.

Rys. 8. przedstawia stanowisko pomiarowe podczas prób demonstratora w specjalnym obiekcie do badań wirników. Dla bezpieczeństwa obsługi zastosowano zdalne sterowanie napędem demonstratora oraz przestawianiem skoku ogólnego. Rejestrowano obroty i siłę nośną WN oraz kąt skoku łopat. Celem prób było:

- sprawdzenie procedury startu w zakresie od uruchomienia silnika do momentu oderwania,



Rys. 7. Skalowanie układu do pomiaru impulsu ciągu wirnika [Aut., 2013]

- przetestowanie eksploatacyjnych właściwości konstrukcji układu napędowego,
- rejestracja obrotów silnika i WN oraz impulsu siły nośnej od momentu wysprzężenia napędu i zmiany skoku łopat.

Przez „impuls siły nośnej” należy rozumieć przebieg siły nośnej i obrotów wirnika w funkcji czasu oraz kąta skoku łopat WN. Wyniki pomiarów posłużyły jako dane wejściowe do symulacji bezrozbiegowego startu wiatrakowca.



Rys. 8. Pomiar impulsu siły nośnej wirnika – stanowisko pomiarowe [Aut., 2013]

## WNIOSKI

Ograniczony czas realizacji badań, wymagania przepisów lotniczych jak również problemy techniczne nie pozwoliły doprowadzić do realizacji bezrozbiegowego startu wiatrakowca. Na podstawie analizy rozwiązań prerotacji wirnika wiatrakowca oraz przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

1. Bezrozbiegowy start wymaga specjalnej konstrukcji układu napędowego wiatrakowca oraz sterowania skokiem ogólnym WN.
2. W proponowanym rozwiązaniu układu przeniesienia napędu na WN nie jest wymagana większa moc napędu jednak układ prerotacji musi umożliwić rozkręcenie wirnika od 0 do ok. 400 obr/min, a jednocześnie pozostać wolnym od drgań.
3. Konstrukcja podzespołu prerotacji i sterowania WN wymaga zrealizowania znacznie szerszego zakresu prób (wg przepisów budowy śmigłowców), które powinny zapewnić dostateczne bezpieczeństwo startu.
4. Układ prerotacji WN oraz głowica umożliwiająca start bezrozbiegowy zwiększa istotnie koszt oraz masę wiatrakowca.
5. Konieczne jest opanowanie przez pilota specjalnej procedury startu wiatrakowca – przebieg startu bezrozbiegowego wiatrakowca jest inny jak śmigłowca.

Projekt „Technologia wdrożenia do praktyki gospodarczej nowego typu wiroplátowego statku powietrznego” był finansowany ze środków UE (umowa UDA-POIG.01.03.01-14-074/09).

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Dąbrowska, J., Szczepanik, T., 2009, „Wiatrakowce jako przewidywany kierunek rozwoju wiroplątów w XXI wieku,” *Prace Instytutu Lotnictwa*, **201**, s. 178-186.
- [2] Dick Degraw “Jump Takeoff Gyros”, [www.youtube.com/watch?v=t6xjCUVuUzg&list=PLFE0D7579EE89C6CF](http://www.youtube.com/watch?v=t6xjCUVuUzg&list=PLFE0D7579EE89C6CF).
- [3] Krzymień, W., 2014, „Aspekty krótkiego startu wiatrakowca,” *XVI. Konferencja „Mechanika w Lotnictwie”*, PTMTS, Kazimierz n. W., s. 89-95.
- [4] Cieślak, S., 2011, „Analiza wpływu czynników konstrukcyjnych oraz parametrów sterowania na czas trwania i wysokość bezrozbiegowego startu wiatrakowca,” *Prace Instytutu Lotnictwa*, **219**, s. 39-46.
- [5] Przepisy, *American Society for Testing and Materials (ASTM) F2352 (en)*.
- [6] Przepisy, *Bauvorschriften für Ultraleichte Tragschrauber (BUT) (de)*.
- [7] Przepisy, *British Civil Airworthiness Requirements CAP-643 Section T Light Gyroplanes (en)*.
- [8] Delega, M., Krzymień, W., 2014, „Weryfikacja rozwiązań prerotacji wirnika wiatrakowca,” *Prace Instytut Lotnictwa*, **3(236)**, s. 35-40.
- [9] Delega, M., „Głowica wirnika wiatrakowca o zmiennym skoku,” Zgłoszenie patentowe.
- [10] Sprawozdania wewnętrzne Instytutu Lotnictwa z wykonanych obliczeń i badań wiatrakowca I-28.

## SOME PROBLEMS OF JUMP TAKE-OFF OF THE GYROPLANE

### Abstract

*Gyroplanes have a specific quality similar to helicopters and airplanes – one of them is take-off typical for airplanes. The take-off without run, called "jump takeoff" of an ultralight gyroplane is already known.*

*Within the framework of a project, which was realized in the Institute of Aviation in Warsaw, a new type of a gyroplane was designed and tested, some investigations and analyses were made about the take-off without run of the two-person gyroplane. For this purpose a special gyroplane for the ground tests was prepared with a new main rotor, construction of power system and stand for tests.*

*In the paper are presented some problems with this kind of take-off:*

- *requirements for take-off without run,*
- *preparation of a demo of gyroplane for ground tests,*
- *program of the tests*

*and the requirements of civil air regulations.*

*Keywords: autogyro, gyroplane, jump takeoff, ground tests.*