

## WŁAŚCIWOŚCI DRGANIOWE WIATRAKOWCA

WIESŁAW KRZYMIEN

*Instytut Lotnictwa*

### Streszczenie

*W artykule przedstawiono charakterystyczne cechy drganiowe wiatrakowca oraz wyniki obliczeń symulacyjnych przeprowadzonych dla demonstratora technologii – wiatrakowca konstruowanego obecnie w Instytucie Lotnictwa i oznaczonego I-28. Obliczenia obejmują:*

- analizę drgań własnych wirnika,
- drgania wiatrakowca jako bryły na podwoziu, także podczas startu, oraz
- podstawowe postacie drgań własnych kadłuba.

*Wyniki obliczeń będą wkrótce weryfikowane badaniami na gotowym obiekcie.*

### 1. CECHY KONSTRUKCJI WIATRAKOWCA

Opierając się na wieloletnich doświadczeniach z badań rezonansowych różnych konstrukcji przeprowadzonych w Instytucie Lotnictwa podjęto próbę oszacowania właściwości drganiowych obiektu jakim jest wiatrakowiec (dotychczas nie badanego w ILot).

Bazując na właściwościach śmigłowców o układzie klasycznym, można wskazać te charakterystyczne cechy typowych wiatrakowców, które mają wpływ na ich właściwości drganiowe:

#### 1. Kadłub:

- przy przednim napędzie: w układzie zbliżonym do lekkiego samolotu;
  - przy tylnym napędzie (pchającym): bardzo krótki, część ogonowa często w układzie tandemu, co oznacza, że podstawowe drgania kadłuba typu zginanie i skręcanie wystąpią przy wyższych częstotliwościach jak w przypadku samolotu.
2. Jedno lub dwu (rzadko cztero) osobowe kabiny – niewielkie, zwarte, często otwarte, powodują, że spodziewane są postacie drgań typu deformacja kabiny – ich częstotliwości będą charakteryzować sztywność tej części kadłuba.
  3. Brak śmigła ogonowego oznacza brak wymuszenia – źródła drgań na końcu kadłuba.
  4. Usterzenie pracujące w opływie strumienia zaśmigłowego oznacza silne oddziaływanie turbulencji, a tym samym drgania powierzchni usterzenia o niskich częstotliwościach.
  5. Maszt wirnika nośnego jest lekki a także mniej sztywny od wału przekładni śmigłowcowej.
  6. Konieczność umieszczenia wirnika nośnego dostatecznie wysoko nad kadłubem (aby wirnik nie zawadził o kadłub) powoduje obniżenie częstotliwości drgań wirnika, a także zmniejszenie przenoszenia drgań wirnika na kadłub.
  7. Typowe wirniki wiatrakowcowe:

- dwułopatowe, z głowicą typu „huśtawka”, nie posiadają przegubu pionowego przez co zmniejsza się poziom drgań w płaszczyźnie wirowania oraz eliminuje rezonans naziemny;
  - zwykle nie posiadają tarczy sterującej (brak sterowania cyklicznego; sterowanie przez pochylenie/przechylenie wirnika), co zmniejsza drgania przenoszone z wirnika na kadłub.
8. Zabudowany w kadłubie pojedynczy silnik tłokowy (zwykle mocniejszy w stosunku do masy startowej od samolotu) - jest źródłem drgań kadłuba i hałasu.
9. Napęd śmigłowy – to główne źródło drgań o wyższych częstotliwościach i hałasu.
10. Prerotacja wirnika przed startem osiąga 20-40% nominalnej prędkości obrotowej – w tej fazie wirnik nie jest istotnym źródłem drgań.

Nowatorska konstrukcja i kształt demonstratora technologii – wiatrakowca I-28 posiada kilka charakterystycznych cech, które mogą odmiennie kształtować jego właściwości drganiowe, a mianowicie:

- dwu-osobowa kabina: zwarta, lecz z dużym wycięciem na drzwi;
- tylna część kadłuba: lekka i sztywna, o opływowym kształcie – powinna zapewnić opływ bez oderwań w szerokim zakresie prędkości i kątów;
- stosunkowo wysoko umieszczony wirnik nośny;
- maszt (duraluminiowy profil typu „podwójne H”) mocowany do wręgi głównej;
- pojedynczy silnik zabudowany w pobliżu środka ciężkości;
- napęd: śmigło 3-łopatowe umieszczone z przodu (ciągnące);
- usterzenie motylkowe – częściowo pracujące w opływie strumienia zaśmigłowego;
- podwozie czteropunktowe;
- prerotacja wirnika przed startem na poziomie do 120% nominalnej prędkości obrotowej.

## 2. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

Na etapie projektu wstępnego wykonano podstawowe obliczenia właściwości drganiowych wiatrakowca. Obliczenia obejmowały:

- drgania wiatrakowca jako bryły na podwoziu (o charakterystykach sprężystych odpowiadających dobranym pneumatykom), także podczas startu (koła zahamowane, swobodne oraz 4, 3 i 2 punktowy kontakt z podłożem);
- podstawowe postacie drgań własnych kadłuba – jak w locie;
- analizę drgań własnych wirnika – oddzielnie (bez kadłuba), jednak podpartego w sposób symulujący sztywność masztu i masę kadłuba.

Poniżej przedstawiono i zilustrowano przykładowe wyniki obliczeń [2], [3].

W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń – podstawowe postacie i częstotliwości drgań kadłuba na podwoziu i samego kadłuba („w locie”). Obliczenia przeprowadzono na uproszczonym modelu zawierającego elementy o właściwościach odpowiadających rzeczywistej konstrukcji jak i elementy zastępcze (np. skupione masy: pilota, wirnika i silnika, elementy pokrycia o przybliżonych właściwościach). Model obliczeniowy przedstawia rysunek 1.

Na rysunku 2. przedstawiono przykładową postać drgań wirnika: symetryczne II. pionowe zginanie łopat.

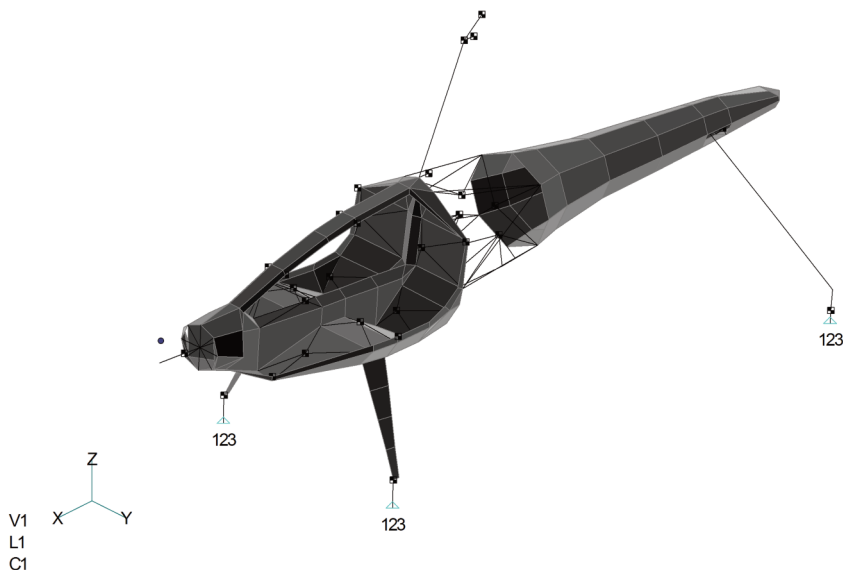
Tabela 2 zawiera podstawowe postacie i częstotliwości drgań wirnika w stanie spoczynku. „Zamocowanie” modelu wirnika odpowiada sztywności masztu wiatrakowca.

Rysunek 3 przedstawia wyniki obliczeń – wykresy zmiany częstotliwości podstawowych postaci drgań wirnika w zależności od prędkości obrotowej wirnika [4].

Z obliczeń aerodynamicznych wynika, że charakterystycznymi obrotami, a tym samym podstawowymi częstotliwościami drgań wirnika wiatrakowca są:

- ok. 6 obr/s – obroty wirnika przy prędkości przelotowej,

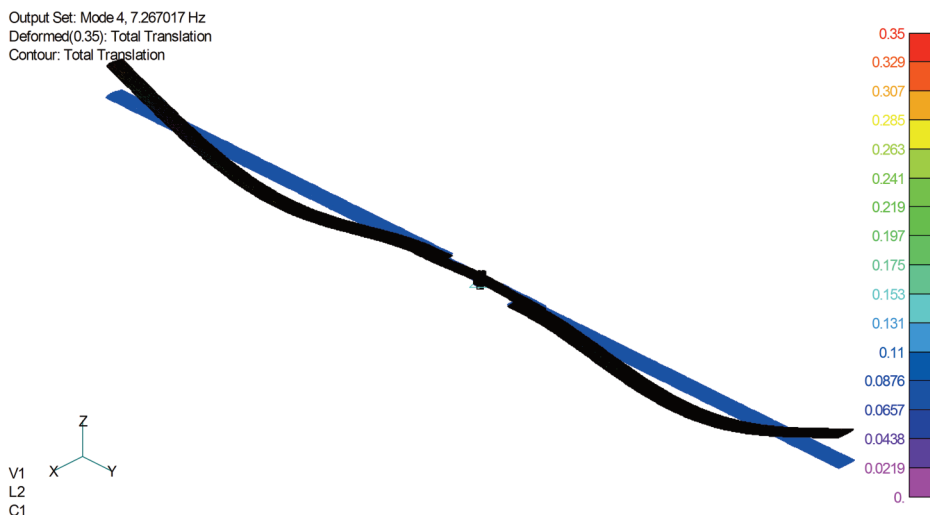
- 8 obr/s – maksymalna możliwa prędkość obrotowa wirnika spowodowana istotnym wzrostem sił oporu (prędkość na końcu łopat wirnika odpowiada  $Ma = 0,7$ ).
- Ponadto charakterystycznymi częstotliwościami drgań układu napędowego są:
- dla pracy jałowej silnika: ok. 13,5 obr/s (obroty silnika) i ok. 8,5 obr/s (obroty śmigła),
- dla prędkości przelotowej (odpowiednio): ok. 67 obr/s i ok. 42 obr/s.



Rys. 1. Model obliczeniowy do analizy drgań wiatrakowca

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń – podstawowych postaci i częstotliwości drgań własnych dla wersji o maksymalnej masie startowej

Lp.	Postać	na 4 kołach zaham.	na 3 kołach zaham.	na 4 kołach	na 2 kołach	w locie
1.	Wahania poprzeczne	1,85	1,18	1,77	1,77	-
2.	Wahania wzdłużne z pochyleniem	2,15	1,87	-	-	-
3.	Przechylenie – maszt zgodnie	2,85	2,67	2,61	2,27	-
4.	Wahania pionowe	3,18	3,11	2,90	2,90	-
5.	Odchylenie	4,94	4,01	4,24	1,97	-
6.	Pochylenie – maszt zgodnie	5,23	5,00	4,05	3,72	-
7.	Pochylenie – maszt przeciwnie	7,16	6,23	6,85	6,22	6,18
8.	Przechylenie – maszt przeciwnie	9,30	7,65	9,25	6,08	4,96
9.	S. zginanie usterzenia/podw.	20,4	19,8	18,7	8,19	8,15
10.	Pion. zginanie kadłuba	26,3	26,3	26,2	26,0	26,0
11.	Poz. zginanie kadłuba	40,4	40,1	40,0	39,6	39,5

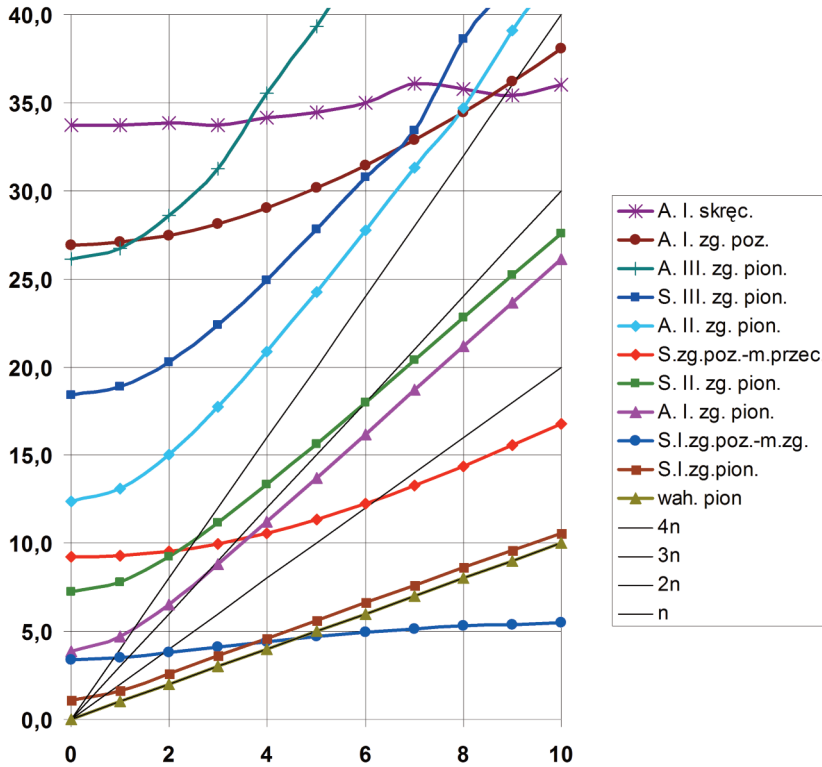


Rys. 2. S. II. pionowe zginanie łopat

Tabela 2. Podstawowe postacie i częstotliwości drgań wirnika w stanie spoczynku

Lp.	Postać	Częstotliwość [Hz]
1.	S. I. zginanie pionowe	1,1
2.	A. I. zginanie pionowe	3,9
3.	S. II. zginanie pionowe	7,3
4.	S. I. zginanie poziome	9,2
5.	A. II. zginanie pionowe	12,4
6.	S. III. zginanie pionowe	18,4
7.	A. III. zginanie pionowe	26,1
8.	A. I. zginanie poziome	26,9
9.	S. I. skręcanie	29,1
10.	A. I. skręcanie	33,2

Błędy wyznaczonych częstotliwości drgań własnych zależą od przyjętego modelu obliczeniowego oraz dokładności danych masowych i sztywnościowych. Obydwa przedstawione modele zostały zweryfikowane obliczeniowo i poprawione w zakresie posiadanych danych: pomiarowych (sztywność skrętna i giętna łopaty), przyjętych charakterystyk sztywnościowych (amortyzatorów, pneumatyków, materiałów) oraz mas elementów i podzespołów (w tym: położenie środków ciężkości). Błąd sztywności istotnych elementów ocenia się na 10-15%, a masy elementów do 7% co oznacza, że spodziewany błąd częstotliwości drgań własnych będzie mniejszy jak 10%.



Rys. 3. Zmiany częstotliwości podstawowych postaci drgań własnych wirnika w zależności od jego prędkości obrotowej

### 3. WNIOSKI

Realizacja Projektu pozwala zespołowi inżynierów Instytutu Lotnictwa zapoznać się z problemami współczesnego wiroplata – wiatrakowca, posiadającego klasyczne jak i nowatorskie rozwiązania.

Wyniki obliczeń zwracają uwagę na częstotliwości, które mogą:

- spowodować większe amplitudy drgań podczas startu (prerotacji) ok. 2 Hz i ok. 3 Hz, jednak „sztywny” wirnik (brak przegubu pionowego i brak sterowania cyklicznego) nie spowoduje niebezpiecznego rezonansu naziemnego,
- pogorszyć komfort lotu – spodziewany jest wzrost poziomu drgań w kabinie o częstotliwości ok. 35 Hz.

Wszystkie rozwiązania konstrukcyjne oraz obliczenia będą poddane weryfikacji podczas badań demonstratora technologii (badania rezonansowe, badania naziemne statyczne i dynamiczne – wg [1]), w tym także właściwości drganiowych podczas jego eksploatacji – na ziemi oraz w locie.

### BIBLIOGRAFIA

[1] Przepisy ASTM F2352 – 09.

[2] Krzymień W., Wiśniowski W.: *Wybrane zagadnienia badań rezonansowych śmigłowców*, I. Krajowe Forum Śmigłowcowe, Warszawa, 1995.

[3] Krzymień W.: *Ocena wpływu sztywności podwozia na wyniki badań rezonansowych śmigłowca*, III. Krajowe Forum Śmigłowcowe, Warszawa, 1999.

[4] Praca zbiorowa: *Wstęp do konstrukcji śmigłowców*, WKiŁ, Warszawa, 1995.

oraz wybrane sprawozdania i raporty wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.

Projekt „Technologia wdrożenia do praktyki gospodarczej nowego typu wiroplátowego statku powietrznego” jest współfinansowany ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, umowa UDA-POIG.01.03.01-14-074/09-00.

WIESŁAW KRZYMIEN

## VIBRATION PROPERTIES OF THE GYROCOPTER

### Abstract

*This paper presents the typical properties of the autogiro and some results of calculations made for the autogiro I-28 which is at present constructed in the Institute of Aviation.*

*The calculations included:*

- *eigenvalue shapes and frequencies of vibrations of the main rotor,*
- *eigenvalue vibrations of the fuselage as a rigid body on the gear and during the take-off,*
- *typical shapes of vibrations of the airframe.*

*The results of the calculations will be soon verified by the GVT of the prototype.*

The whole project is financed by the EU funds under the Operational Programme Innovative Economy.