

## PRÓBY KONSTRUKTORSKIE WIATRAKOWCA I-28 BUDOWANEGO W KATEGORII „SPECJALNY”

MIROŚLAW DELEGA\*, WIESŁAW KRZYMIENÍ\*\*

\*Centrum Nowych Technologii, Zakład Konstrukcji Lotniczych, Instytut Lotnictwa,  
al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Polska, [delega@ilot.edu.pl](mailto:delega@ilot.edu.pl)

\*\*Centrum Nowych Technologii, Zakład Kompozytów, Instytut Lotnictwa,  
al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Polska, [wkrz@ilot.edu.pl](mailto:wkrz@ilot.edu.pl)

### *Streszczenie*

*Wiatrakowiec I-28 został zaprojektowany i wykonany w ramach projektu „Technologia wdrożenia do praktyki gospodarczej nowego typu wiroplátowego statku powietrznego”. Jest to pierwszy wiatrakowiec zbudowany w Instytucie Lotnictwa i jako obiekt doświadczalny został zarejestrowany w kategorii „Specjalny”.*

*Konstrukcja posiada wiele innowacyjnych rozwiązań i na każdym etapie prowadzone były próby weryfikujące przyjęte przez konstruktorów założenia.*

*W artykule przedstawiono wybrane badania i testy, które zostały wykonane poza wymaganymi przez przepisy lotnicze ASTM, a których celem było zwiększenie bezpieczeństwa lotu oraz potwierdzenie założeń i wymagań konstruktorów.*

*Słowa kluczowe: wiatrakowiec, badania wytrzymałościowe, próby konstruktorskie.*

### WPROWADZENIE I CEL BADAŃ

Badania konstruktorskie stanowią obok badań dowodowych bardzo istotny element procesu projektowania i budowy nowej konstrukcji. W ramach realizowanego w ILOT Projektu obejmującego wykonanie nowego typu wiatrakowca przeprowadzono szereg badań elementów, podzespołów jak i samego wiatrakowca. Badania konstruktorskie pozwalają na zdobycie przez konstruktora doświadczenia w obszarze realizowanych rozwiązań jak również bezpieczne sprawdzenie krytycznych elementów przed ich wprowadzeniem do produkcji [2].

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane badania konstruktorskie nowych rozwiązań zespołów wiatrakowca realizowanych w zakresie do obciążeń dopuszczalnych albo niszczących. Ich celem było:

- weryfikacja obliczeń poprzez porównanie ich z wynikami pomiarów,
- sprawdzenie funkcjonalności badanych podzespołów,

a ponadto uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy zaproponowane rozwiązania konstrukcyjne mogą spełnić odpowiednie punkty przepisów lotniczych. Niektóre z przeprowadzonych badań konstruktorskich zostały zaliczone do badań dowodowych zgodnie z przyjętymi dla nadzoru przepisami ASTM F2352-09 [1].

## WYBRANE BADANIA KONSTRUKTORSKIE

W trakcie realizacji badań konstruktorskich dotyczących projektu wiatrakowca I-28 wykonano m.in. następujące próby:

- sztywności i wyważenia łopat,
- wytrzymałości mocowania łopaty,
- wirnika,
- sztywności układów sterowania,
- sztywności podwozia głównego,
- wytrzymałości liścia podwozia chowanego,
- wytrzymałości rury skrętnej i statecznika jako podwozia,
- pracy wału napędowego śmigła

oraz pomiary dodatkowe:

- pomiar ruchu kadłuba po zrzucie,
- pomiar ugięcia kadłuba (w ramach próby obciążenia 3g).

### Badania łopat wiatrakowca I-28

Głównym podzespołem decydującym o bezpieczeństwie lotu wiatrakowca jest wirnik nośny. W ramach Projektu wykonano badania dwóch kompletów łopat: metalowych (duraluminiowych z wyciskanego profilu) i kompozytowych.

Badania konstruktorskie łopat metalowych obejmowały:

- weryfikację obliczeń wytrzymałości i sztywności łopaty,
- badania drgań i torowanie łopat.

Na rys. 1 jest przedstawiona łopata o cięciwie 200 mm wyciskana z duralu 6106T6 podczas prostych prób – doświadczalnego sprawdzenia modelu obliczeniowego MES. Próby polegały na sprawdzeniu ugięcia łopaty pod własnym ciężarem oraz wyznaczenia jej sztywności skrętnej. Pomiary wykazały bardzo dobrą zbieżność z obliczeniami i pozwoliły zastosować przyjęty model masowy i sztywnościowy do obliczeń drgań wirnika i flutteru łopaty [6].



a)



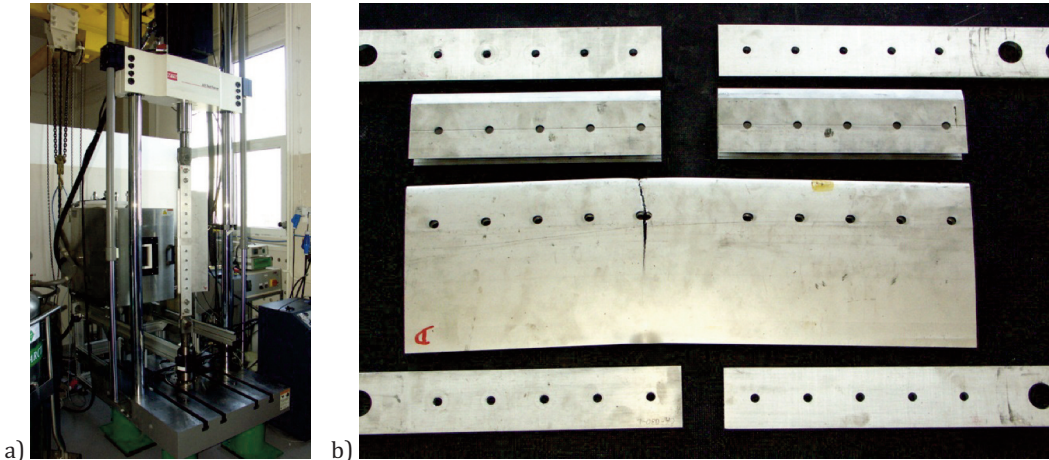
b)

Rys. 1. Łopata wiatrakowca podczas pomiaru: a) sztywności skrętnej, b) ugięcia pod własnym ciężarem mierzonego względem promienia lasera [W. Krzymień 2010]

Masa łopaty z wyważeniem wynosi 12,5 kg. Pomiar ugięcia przeprowadzono poziomicą laserową.

Kolejne badania wytrzymałości łopaty dotyczyło jej mocowania. Wiatrakowiec I-28 posiada wirnik z głowicą typu „huštawka” o stałym kącie zaklinowania łopat. Część ruchomą głowicy stanowi element zawieszenia wirnika i dwa płaskowniki (łącznik) mocujące łopatę poprzez obejmę przy pomocy pięciu śrub M8. Przygotowana próbka zawierała dwa badane połączenia: pozwala na ocenę wytrzymałości na rozciąganie oraz porównanie odkształceń w dwóch połączeniach jednocześnie.

Badanie fragmentu łopaty z łącznikami głowicy przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy MTS typ 3220.



Rys. 2. Fragment łopaty podczas badań na rozciąganie: a) na maszynie wytrzymałościowej, b) rozmontowana próbka po badaniach niszczących [W. Krzymień 2012]

Dla maksymalnych dopuszczalnych obrotów wirnika siła odśrodkowa u nasady łopaty wynosi 93 kN. Próba miała na celu sprawdzenie zachowania się łopaty w miejscu jej mocowania jak owalizacja otworów, pęknięcia na krawędziach itp. Po osiągnięciu siły dopuszczalnej próbkę rozmontowano i sprawdzono stan otworów w łącznikach i fragmencie łopaty. Następnie próbkę zmontowano i poddano dalszej próbie – do zniszczenia. Rys. 2b przedstawia rozmontowaną próbkę łopaty po badaniu niszczącym. Przeprowadzono kilka prób, we wszystkich wynik badania był lepszy od spodziewanego na podstawie obliczeń.

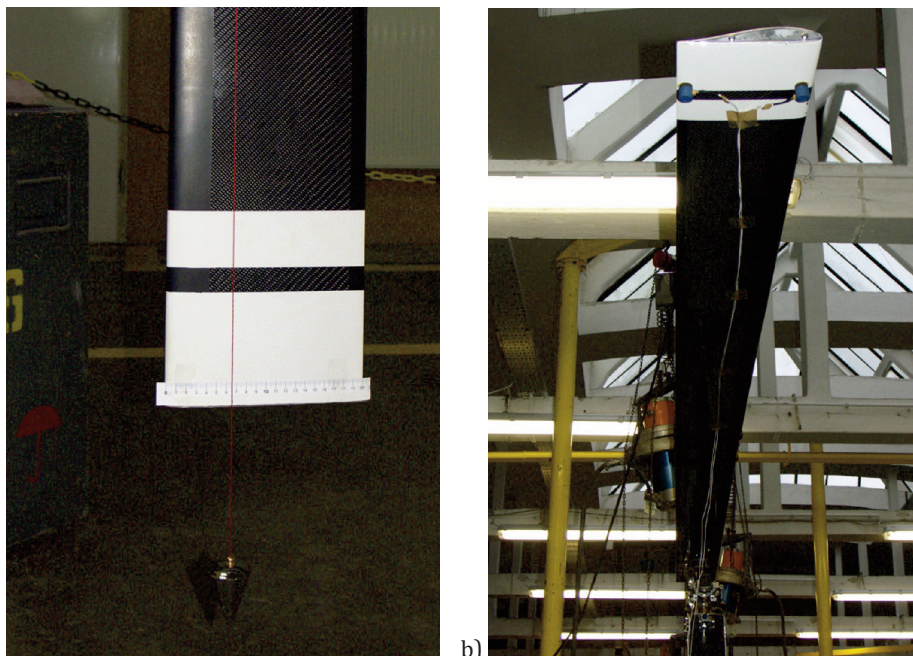
Próbka uległa zniszczeniu przy sile ok. 188,5 kN i wydłużeniu ok. 8,5 mm – zerwanie nastąpiło przy sile 2,02 razy większej od przyjętej za dopuszczalną [7], czym spełniło oczekiwania konstruktora oraz przepisów lotniczych.

Innym badaniom poddane zostały eksperymentalne łopaty laminatowe: badania miały charakter sprawdzenia jakości i poprawności ich wykonania.

Podstawowym badaniem łopat jest sprawdzenie ich wyważenia oraz ich podobieństwo.

Wyważenie łopat wirnika nośnego ma duży wpływ na poziom drgań a tym samym na trwałość i komfort pilotażu wiatrakowca. Wyznaczenie położenia środka ciężkości łopat wzdłuż rozpiętości przeprowadzono na pryzmie. Rys. 3a przedstawia pomiar położenia środka ciężkości wzdłuż cięciwy łopaty: równoległe do zawieszanej pionowo łopaty wisi pion, na podstawie którego można wskazać położenie śc łopaty [8].

Celem badań rezonansowych eksperymentalnego wirnika wiatrakowca (rys. 3b) było doświadczalne wyznaczenie częstotliwości podstawowych postaci drgań skrętnych łopat. Częstotliwości zidentyfikowanych postaci drgań skrętnych okazały się wyższe od częstotliwości przy jakiej pracuje wirnik, co jest korzystnym warunkiem zabezpieczenia przed flutterem łopat [4], [9].



Rys. 3. Badania łopat eksperymentalnego wirnika wiatrakowca I-28 A: a) wyznaczanie środka ciężkości łopaty wzdłuż cięciwy, b) badanie rezonansowe skręcania łopat wirnika [W. Krzymień 2013]

### Badania wirnika wiatrakowca

Na rys. 4 przedstawiono wirnik wiatrakowca I-28 na specjalnym stoisku w Instytucie Lotnictwa. Badaniom podlegał wirnik nośny ze zmodernizowaną głowicą. Badania obejmowały sprawdzenie wytrzymałości i zachowania się wirnika do prędkości obrotowej odpowiadającej obrotom prerotacji wirnika podczas startu oraz torowanie łopat. Badania przeprowadzono na wirniku egzemplarza lotnego wiatrakowca I-28.



Rys. 4. Wirnik wiatrakowca podczas badań stoiskowych [W. Krzymień 2012]

Stoisko do badań wirników wiatrakowca wyposażono w czujniki przyspieszenia w celu kontroli poziomu drgań wirnika. Wirnik był napędzany za pomocą silnika wysokoprężnego poprzez przekładnię i wał ze sprzęgłem jednokierunkowym. Torowanie łopat przeprowadzono przy prędkości 150 obr/min rejestrując ruch końcówek szybką kamerą cyfrową; rozbieżność torów końcówek łopat po regulacji nie przekraczała 2 cm [10].

### Badania aerodynamicznych właściwości kadłuba i wirnika wiatrakowca

Do badań w tunelu aerodynamicznym właściwości kadłuba [11] oraz wirnika zastosowano przebudowane stoisko do badań śmigłowców (rys. 5). Badania modelu wirnika w autorotacji przeprowadzono w ILot po raz pierwszy [12]. W przypadku wiatrakowca oddziaływanie kadłuba na charakterystyki wirnika jest mniejsze niż w przypadku śmigłowców. Dla wiatrakowca I-28 badania miały na celu sprawdzenie stateczności kierunkowej i skuteczności sterów oraz porównanie wyników z obliczeniami symulacyjnymi.

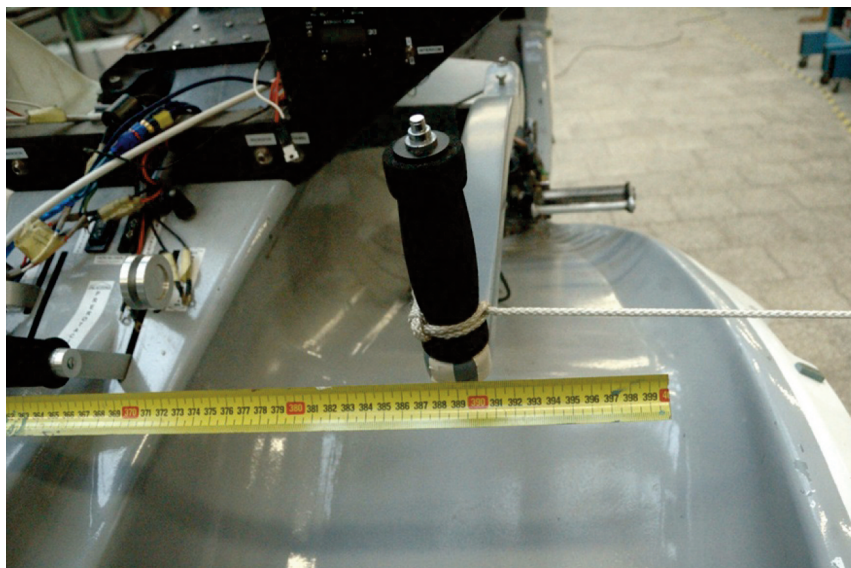


Rys. 5. Model kadłuba wiatrakowca i wirnika nośnego podczas badań w tunelu aerodynamicznym [G. Krysztofiak 2011]

### Badania układów sterowania

Układy sterowania wiatrakowca są podobne jak w śmigłowcu: drążek służy do sterowania pochylaniem i przechylaniem (działając na wirnik), natomiast pedały do sterowania odchyłaniem (sterem kierunku). W zastosowanym układzie motylkowym usterzenia stery pełnią podstawową rolę steru kierunku, natomiast ich wychylenie jako steru wysokości następuje tylko poprzez trymer, w celu utrzymania poziomego ustawienia kadłuba podczas lotu.

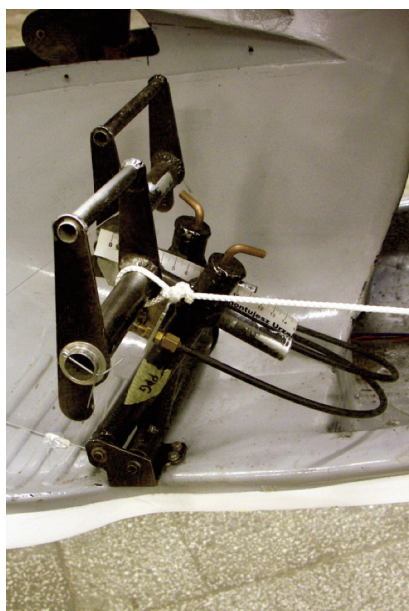
Prócz sprawdzenia właściwości kinematycznych układy sterowania są badane pod kątem sztywności i wytrzymałości. Wszystkie przepisy lotnicze zawierają szczegółowe wymagania dla układów sterowania: obliczenia dotyczą zwykle sił w układzie, kinematyki i stateczności (wyboczenia) jego elementów, lecz na sztywność układu sterowania ma spory wpływ podatność mocowania jego elementów, szczególnie dźwigni kątowych. Pomiar sztywności ciągu sterowania jest więc najlepszym sposobem sprawdzenia jego właściwości.



Rys. 6. Pomiar sztywności układu sterowania przechyleniem [W. Krzymień 2013]

Rys. 6 przedstawia pomiar ugięcia drążka na skutek siły przyłożonej poprzez linę; wirnik został zablokowany w pozycji neutralnej specjalnie przygotowanymi popychaczami.

W trakcie budowy wiatrakowca wykonano układ sterowania sterem kierunku z pedałami zaprojektowanymi wg wzorów konstrukcji ultralekkich. Badania sztywności (rys. 7a) wykazały zbyt dużą podatność tego rozwiązania: dla maksymalnego obciążenia, które zgodnie z [1] wynosiło 540 N, ugięcie sprężyste pedałów wynosiło 75 mm.



a)



b)

Rys. 7. Pomiar sztywności układu sterowania sterem kierunku: a) lekkie pedały metalowe, b) pedały kompozytowe wzmocnione [W. Krzymień 2013]

Zmiana konstrukcji pedałów, zmniejszenie podatności wsporników i luzów poprzez wprowadzenie zmian w układzie mieszacza i trymera poprawiła znacząco sztywność układu sterowania. W trakcie ponownej próby (rys. 7b) dla siły 540 N zarejestrowano maksymalne ugięcie 12 mm [13].

Dla eksperymentalnego usterzenia jakim jest odwrócone usterzenie typu V (Rudlickiego) przy zastosowaniu dużych powierzchni sterowych (70% powierzchni usterzenia) ważne są jego właściwości flutterowe. Dla zapewnienia odpowiednich właściwości dynamicznych niezbędne są: odpowiednie wyważenie steru, dostateczna sztywność jego wychylania i sztywność zginania statecznika-goleni [14]. Każdy ster został zważony oraz sprawdzono położenie środka ciężkości (wzdłuż steru oraz cięciwy) a wyniki porównano z obliczeniami.



Rys. 8. Pomiar sztywności układu wychylania sterów [W. Krzymień 2013]

Na rys. 8 przedstawiono pomiar sztywności układu sterowania dla symetrycznego wychylania sterów. Prawy ster został zablokowany obejmą a do krawędzi spływu lewego poprzez linkę przyłożono siłę wychylającą ster, której wielkość mierzono za pomocą elektronicznego dynamometru. Jednocześnie mierzono wzajemne przemieszczenie się końcówek steru - na podstawie wyniku tego pomiaru oraz pomiaru masy i położenia środka ciężkości steru otrzymano dane do obliczeń flutteru steru. Alternatywnym pomiarem właściwości dynamicznych steru są próby rezonansowe usterzenia.

### **Badania wytrzymałości i ugięcia goleni podwozia tylnego**

Podwozie tylne ma istotny wpływ na bezpieczeństwo lądowania wiatrakowca. Konstrukcja kompozytowego podwozia tylnego składa się z: rury skrętnej (zamocowanej wzdłuż kadłuba) jako elementu sprężystego oraz goleni, która jest jednocześnie dźwigarem statecznika. Do tylnej ścianki dźwigara statecznika mocowany jest ster. Projekt zakładał uzyskanie odpowiedniego ugięcia tylnego podwozia, które jest sumą odkształcenia rury skrętnej i ugięcia goleni: zbyt miękki dźwigar mógłby powodować blokowanie się steru podczas kołowania lub lądowania, natomiast zbyt sztywna rura skrętna groziłaby zahaczeniem śmigła o ziemię podczas lądowania. Badania polegały na pomiarze ugięcia końcówki goleni (statecznika) pod wpływem

siły wprowadzanej przy pomocy ręcznej wciągarki oraz jednoczesnej kontroli, czy ster może się swobodnie wychylać (rys. 9) [15].



Rys. 9. Badania wytrzymałości i sztywności podwozia tylnego: rury skrętnej oraz goleni [J. Milczarczyk 2012]

### Pomiar odkształceń kadłuba

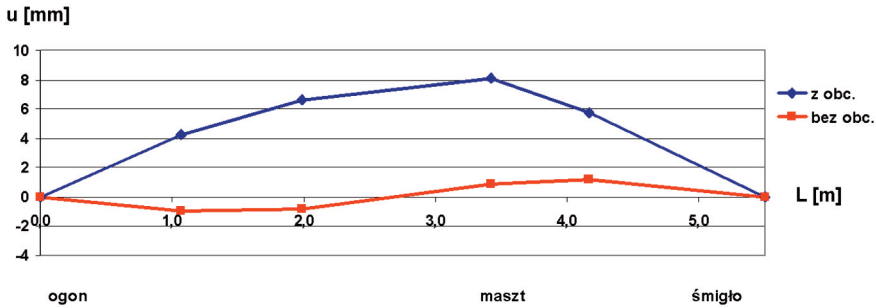
Na rys. 10 przedstawiony jest wiatrakowiec podwieszony na suwnicy za głowicę wirnika. Przyjęta w tej wersji maksymalna masa wiatrakowca wynosiła 650 kg. Wiatrakowiec obciążono w wybranych miejscach dodatkowymi masami odpowiadającymi 2-krotnej masie danego podzespołu tak, aby całkowity ciężar wiatrakowca była trzykrotnie większy. Próba ta odpowiada obciążeniu dopuszczalnemu w trakcie manewru wyrwania o wielkości 3g [16].



Rys. 10. Pomiar ugięcia kadłuba zawieszono wiatrakowca podczas próby „3g” [W. Krzymień 2012]



Na rys. 11 przedstawiono wyniki pomiaru ugięcia kadłuba wiatrakowca przy pomocy niwelatora podczas próby obciążenia kadłuba wiatrakowca równoważnym obciążeniem „3g”. Strzałka ugięcia kadłuba znajdowała się w okolicy masztu i wynosiła ok. 8 mm.

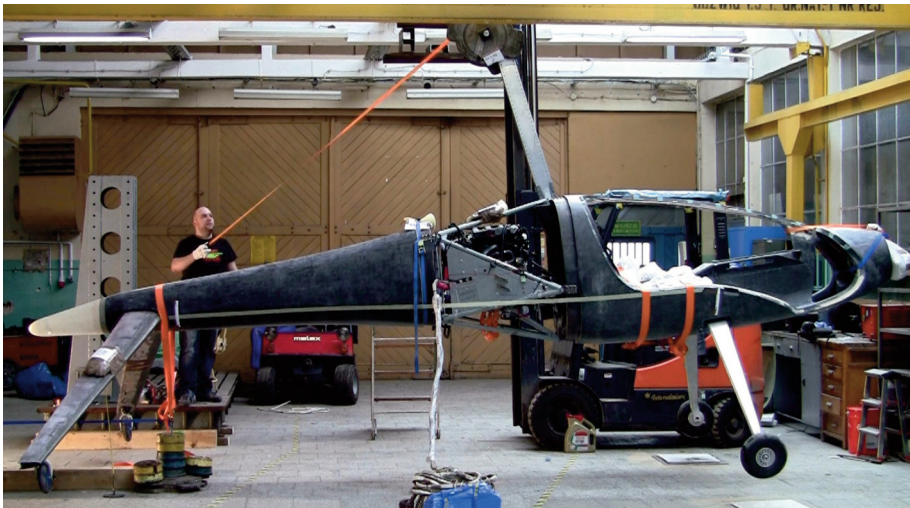


Rys. 11. Wykres ugięcia kadłuba: obciążonego i po odjęciu obciążenia [W. Krzymień 2012]

Wyniki pomiaru ugięcia kadłuba po zdjęciu obciążenia nie wskazywały na jego trwałe odkształcenie. Każdy odczyt pomiaru wykonywano dwukrotnie; błąd pomiaru wynosił ok.  $\pm 0,5$  mm.

### Test zrzutu wiatrakowca

Na rys. 12 przedstawiony jest wiatrakowiec podwieszony na suwnicy poprzez zaczep, który umożliwia jego swobodny zrzut. Celem próby było sprawdzenie wytrzymałości konstrukcji po upadku na cztery koła z wysokości 16,5 cm: czy podwozie i inne elementy wiatrakowca nie uległy uszkodzeniu lub trwałemu odkształceniu.



Rys. 12. Test zrzutu – sprawdzenie wytrzymałości podwozia [W. Krzymień 2012]

W czasie próby zarejestrowano także szybką kamerą ruch kadłuba po zrzucie: pokłatkowa analiza obrazu pozwoliła ocenić stabilność ruchu kadłuba, ugięcie goleni i pochłanianie energii przez podwozie [5], [17].

## PODSUMOWANIE

Badania konstruktorskie stanowią źródło doświadczenia inżynierskiego jego autorów oraz pozwalają szybko poznać istotne cechy nowych rozwiązań. Wyniki badań są podstawą do weryfikacji obliczeń oraz pomyślnego przeprowadzenia badań dowodowych.

Rezultaty niektórych badań były też konsultowane z pilotem-oblatywaczem. Autorzy spodziewają się, że nowe rozwiązania konstrukcyjne, które przebadano, będą wdrożone przez krajowych producentów.

Wykonawcami prezentowanych prób wiatrakowca oraz sprawozdań z przebiegu ich realizacji byli koledzy inżynierowie: Krzysztof Błasiak, Piotr Busz, Sławomir Cieślak, Karol Gołaszewski, Jarosław Milczarczyk, Tomasz Szczepanik, Rafał Szymański, Dawid Ulma oraz autorzy.

## LITERATURA

- [1] Przepisy ASTM F2352-09 Standard Specification for Design and Performance of Light Sport Gyroplane Aircraft.
- [2] Harris, Franklin D. (2011). Introduction to Autogyros, Helicopters, and other V/STOL Aircraft. NASA.
- [3] FAA H-8083-21. (2000). Rotorcraft Flying Handbook.
- [4] Krzymień, W. (2011). Właściwości drganiowe wiatrakowca, *Prace Instytutu Lotnictwa* (nr 219), s. 234-239.
- [5] Skorupka, Z., Tywoniuk, A. (2013). Wybrane zagadnienia konstrukcji podwozia do wiatrakowca I-28, *Prace Instytutu Lotnictwa* (nr 232-233), s. 34-40.
- [6] R13003\_BU-037/10. Dane masowe i sztywnościowe oraz obliczenia właściwości drganiowych łopat i wirnika  $\varnothing 9,4$  m wiatrakowca I-28, sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [7] R13003\_BU-122/12. Próba wytrzymałości mocowania łopaty, sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [8] R13003\_BU-120/12. Pomiar wyważenia łopat kompozytowych, sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [9] R13003\_BU-126/13. Badania rezonansowe łopat wirnika wiatrakowca I-28 wariant A., sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [10] R13003\_BU-099/12. Badania wirnika D 9,4 m na stanowisku, sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [11] R13003\_BA1-041/11. Badania aerodynamiczne modelu kadłuba wiatrakowca I-28 w tunelu  $\varnothing 5$  m bez nadmuchu wirnika, sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [12] R13003\_BA1-042/11. Badania aerodynamiczne modelu wahliwego wirnika nośnego wiatrakowca I-28 w tunelu  $\varnothing 5$  m bez i w obecności kadłuba, sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [13] R13003\_BU-229/12. Sprawozdanie z prób statycznych układów sterowania wiatrakowca I-28 wariant B., sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [14] R13003\_BU-119/12. Próba dowodowa wytrzymałości okuć steru oraz statecznika wiatrakowca I-28 wariant B., sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.

- [15] R13003\_BU-100/12. Wyznaczenie charakterystyki podwozia tylnego wiatrakowca I-28 wariant B., sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [16] R13003\_BU-111/12. Próba statyczna wiatrakowca I-28 wariant B., sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.
- [17] R13003\_BW-110/12. Próba zrzutu wiatrakowca I-28 wariant B., sprawozdanie wewnętrzne Instytutu Lotnictwa.

## **DESIGNER'S TESTS OF AN AUTOGIRO I-28 DEVELOPED IN CATEGORY "SPECIAL"**

### Abstract

*Autogyro I-28 was designed and realized within the framework of the project "Implementation of technology in the practice of a new kind rotary-wing of the aircraft". It is the first autogyro constructed and tested in the Institute of Aviation and as an experimental object was registered in the category "Special". This construction has many innovative solutions and on each stage of development some tests were provided to verify the assumptions made by the constructors.*

*In this paper some selected tests and investigations are presented, which were made beyond some tests required by the civil air regulations, and the goal of which was enhancing the safety of the flight and confirmation of the constructors' assumptions and requirements.*

*Keywords: autogyro, mechanical tests, designer's tests.*