

## WPŁYW GEOMETRII PROFILU LOTNICZEGO ŁOPATY WIRNIKA GŁÓWNEGO NA OSIĄGI WIATRAKOWCA

MATEUSZ PIETROSIŃSKI

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

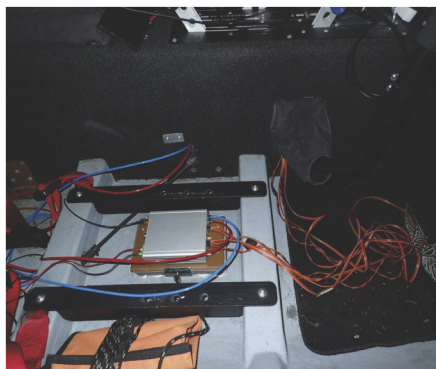
### *Streszczenie*

*Celem pracy jest ocena wpływu geometrii profilu na osiągi wiatrakowca. Pomiaru dokonano podczas prób w locie wirników z łopatomy o profilu N9H12 i IL11. W pracy przedstawiono odczyty z aparatury pomiarowo-rejestrującej zamontowanej na wiatrakowcu Zen-1, miejsca i metodę montażu czujników. Wyniki zestawiono tak, aby porównać osiągi wiatrakowca podczas lotu z łopatomy o danych profilach. Wykazano poprawę osiąggów na wiatrakowcu z łopatomy o profilu IL11.*

*Słowa kluczowe: wiatrakowiec, rejestrator, wirnik.*

### 1. WPROWADZENIE W TEMATYKĘ ZAGADNIENIA

Próby w locie są ostateczną weryfikacją spełnienia założeń przyjętych w projekcie. Przedmiotem badań były łopaty duralowe do wirnika wiatrakowca o profilu IL11 zaprojektowanym w Instytucie lotnictwa. Przed wykonaniem projektu dokonano oceny możliwości poprawy własności osiągowych lekkiego wiatrakowca poprzez modernizację/optymalizację wirnika nośnego oraz ocenę wpływu poszczególnych parametrów konstrukcyjnych wirnika na jego właściwości aerodynamiczne [6]. Dla porównania osiąggów zarejestrowano także dane z lotów na powszechnie stosowanym profilu łopaty NACA9H12. Loty na poszczególnych łopatach wykonywano w niewielkim odstepie czasowym w celu uniknięcia wpływu warunków atmosferycznych na poszczególne odczyty. Aby zapisać osiągi wiatrakowca wykorzystano rejestrator wykonany przy współpracy z ITWL. Zamontowano go na wiatrakowcu Zen-1.



Rys. 1. Rejestrator zamontowany na wiatrakowcu pod siedzeniem pasażera [Aut., 2015]

Projekt nowego profilu łopaty zakładał wzrost prędkości postępowej wiatrakowca. Loty próbne wykonano według następującego planu:

1. Procedura uruchomienia silnika.
2. Kołowanie.
3. Start.
4. Wznoszenie ustalone z najlepszą prędkością wznoszenia, w miarę możliwości do wysokości przynajmniej 100 m bez wykonywania zakrętu.
5. Wytrzymowany lot poziomy na stałej wysokości z prędkością przelotową (przytrzymany drążek i pedały nieruchomo przez około 30 sekund). Pomiar powtórzony trzykrotnie.
6. Ocena reakcji na sterowanie poprzeczne. Z lotu ustalonego wejście w zakręt z przechyleniem  $30^{\circ}$ - $45^{\circ}$ , zakręt o  $90^{\circ}$  i wyprowadzenie do lotu poziomego bez przechylenia. Pomiar powtórzony trzykrotnie dla obu kierunków zakrętu.
7. Uzyskanie prędkości maksymalnej.
8. Swobodne pionowe opadanie autorotacyjne.
9. Ustalone krążenie w lewą i w prawą stronę z kątem przechylenia odpowiednim dla takiego manewru na tym typie wiatrakowca. Pilotowanie z zachowaniem stałego kąta przechylenia, więc w przypadku wiatru znoszenie przez wiatr będzie naturalne. Po trzy okrążenia w każdą stronę.
10. Ocena reakcji na sterowanie podłużne: manewr „górką” w miarę dopuszczalnych możliwości manewrowych wiatrakowca. Pomiar powtórzony trzykrotnie.
11. Rejestracja zniżania z różnym poziomem redukcji obrotów w trzech podejściach:
  - około 2/3 mocy niezbędnej do lotu poziomego z prędkością przelotową,
  - 1/3 mocy niezbędnej do lotu poziomego z prędkością przelotową,
  - obroty minimalne
 w miarę możliwości w locie prostoliniowym (bez przechylenia).
12. Lądowanie.

Następnie pliki z odczytami zapisano w formacie (.TXT) i dokonano analizy wyników. Dla badań szczególne znaczenie miał punkt 5. z planu manewrów gdyż profil łopaty IL11 był projektowany przez aerodynamików z Instytutu Lotnictwa w celu uzyskiwania większych prędkości na wiatrakowcu.

## 2. BUDOWA REJESTRATORA

Do zebrania odczytów parametrów z prób w celu porównania osiągnięć wiatrakowca z łopatomy o profilu NACA9H12 i IL11 wykorzystano aparaturę pomiarowo-rejestrującą, na której należy wyróżnić dwa panele: przedni i tylny, przedstawione na Rys.2 i Rys.3.



Rys. 2. Panel przedni rejestratora [opracowanie własne Grzegorz Mentrak].  
 Złącze zasilania (1), Diody sygnalizujące (2), Gniazdo karty micro SD (3),  
 Złącze portu szeregowego (4), Złącze USB (5), Złącze anteny GPS (6)



Rys. 3. Panel tylny rejestratora [opracowanie własne Grzegorz Mentrak].  
 Wejście ciśnienia statycznego (1), Wejście ciśnienia całkowitego (2),  
 Wejścia czujników obrotów (3), Wejścia cyfrowe (4),  
 Wejścia analogowe (5), Wejścia sygnałów RC (6)



Rys. 4. Otwarty kanał, w którym zamontowano czujniki linkowe [Aut., 2015]

Na wiatrakowcu zamontowano sześć czujników:

- Czujnik linkowy wychYLENIA steru kierunku, przymocowany do belki mechanizmu dźwigniowego odchodzącego od pedału.
- Czujnik linkowy PRZECHYLENIA wirnika (prawo-lewo), przymocowany do belki mechanizmu dźwigniowego drążka.
- Czujnik linkowy POCHYLENIA wirnika (przód-tył), przymocowany do belki mechanizmu dźwigniowego drążka.
- Czujnik obrotów silnika (czujnik magnetyczny).
- Czujnik obrotów wirnika nośnego (czujnik magnetyczny).
- Rurka Pitota.

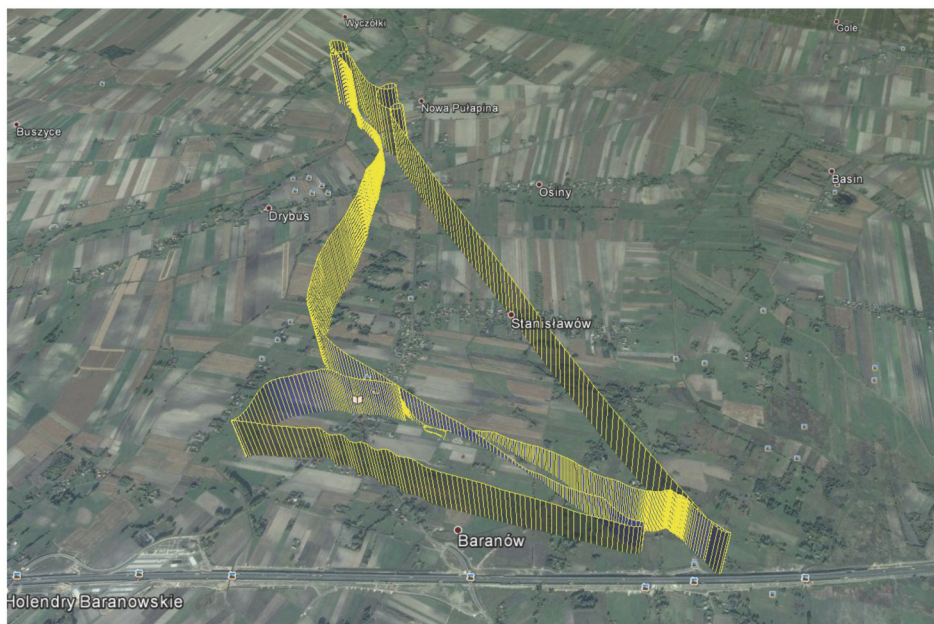


Rys. 5. Czujnik obrotów wirnika i rurka Pitota [Aut., 2015]

Ponadto rejestrator posiada system nawigacji satelitarnej GPS. Kable łączące rejestrator z czujnikami zostały przeprowadzone przez kanał centralny, otworem wywierconym przy fotelu tak, aby nie przeszkadzały podczas lotu. Na kabel dochodzący od czujnika obrotów założono osłonę ze względu na występowanie podwyższonej temperatury w obszarze jej zamontowania, magnes przymocowano przy kole napędowym śmigła pchającego. Czujniki linkowe (od drążka) zostały zamontowane do przegubów sterowych przy pomocy wyciętej płytki ze śrubami. Czujnik wychyleń pedałów odpowiedzialny za wychylenie sterów kierunku przymocowano w kabinie przy nosie wiatrakowca. Czujnik magnetyczny obrotów wirnika umieszczono na płycie przymocowanej do kostki nad bowdenem. Rurka Pitota przymocowana jest do masztu za pomocą metalowej płytki z gumową podkładką.

Odczyty z rejestratora przed zamontowaniem na wiatrakowcu weryfikowane były z prędkościomierzami i GPS, zamontowanym na rowerze i w samochodzie. Rejestrator na wiatrakowcu skalowano na ziemi wychylając maksymalnie drążek i stery kierunku, a także sprawdzając, wartość przeciążenia. Natomiast podczas lotu nagrywano odczyty z aparatury pokładowej i porównywano z odczytami rejestratora [2], [3], [5].

Trajektorię lotu wiatrakowca (Rys. 6) wyznaczono korzystając z szerokości, długości i wysokości geograficznej wyznaczonej przez system GPS.



Rys. 6. Trajektoria lotu wiatrakowca podczas jednej z prób [4]

### 3. DANE TECHNICZNE ŁOPAT I OSIĄGI WIATRAKOWCA



ZEN-1	
Szerokość kabiny	1.25 m
Szerokość	2.2 m
Długość (kadłub z ogonem)	4.9 m
Wysokość	2.8 m
Średnica kół	350 mm
Masa pustego statku	285 kg
Maksymalna masa ładunku (wraz z pasażerami)	240 kg
Maksymalna masa startowa	560 kg
Silnik	CA 912 ULT (RST)
Układ silnika	Boxer 4 cylindry 4T
Moc	122hp/ 135hp
Rozrusznik	Elektryczny
Układ dolotowy	2 Gaźniki + układ turbo
Ciąg statyczny	280 kg
Pojemność baków paliwa	2 X 60 l
Śmigło	Kaspar KA-2/3
Średnica śmigła	1740 mm
Wirnik	Trendak & Son aluminium
Średnica wirnika	8.4 m / 8.6 m / 8.8 m
Powierzchnia dysku wirnika	55.38 m <sup>2</sup> / 58 m <sup>2</sup> / 60 m <sup>2</sup>

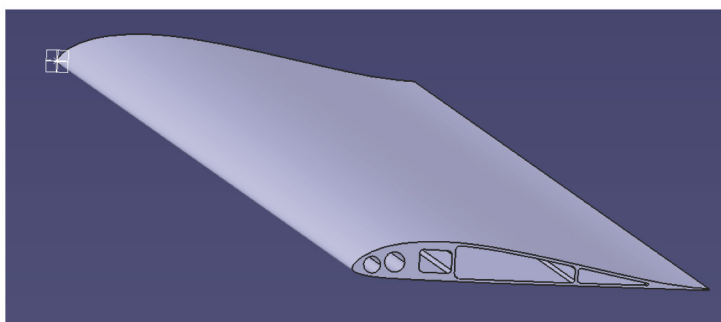
Rys. 7. Wiatrakowiec ZEN-1/dane techniczne [Aut., 2015], [9]

Osiągi	
Prędkość minimalna	50 km/h
Prędkość przelotowa	140 km/h
Prędkość maksymalna	175 km/h
Prędkość nieprzekraczalna	210 km/h
Prędkość wznoszenia	6,1 m/s
Doskonałość	01-mar
Minimalna długość rozbiegu	100 m
Minimalna długość dobiegu	0 - 5 m
Pułap	4500 m
Zużycie paliwa	20 l/h
Długość trwania lotu	6h
Maksymalny teoretyczny zasięg	800 km
Zakresy urządzeń sterowych	
Pochylenie głowicy WN-przód	$2^{\circ} \pm 1$
Pochylenie głowicy WN-tył	$19^{\circ} \pm 1$
Przechylenie głowicy WN	$8^{\circ} \pm 1$
Wychylenie steru kierunku WN-prawo,lewo	$20^{\circ} - 25^{\circ}$
Położenie neutralne steru kierunku	2° w prawo

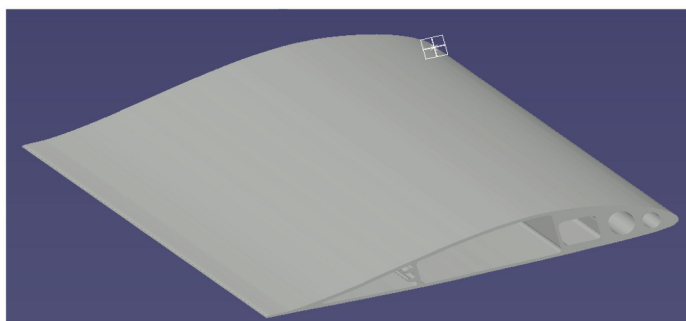


Rys. 8. Osiągi i zakres urządzeń sterowych [9], [Aut., 2015]

Łopaty poddane próbom (Rys. 9, Rys. 10) w locie zostały wykonane z duraluminium o stałej cięciwie 220 mm bez skręcenia geometrycznego. Średnica obydwu badanych wirników wynosi 8,4 m. Konstrukcja wirnika nośnego jest typowa dla lekkich wiatrakowców. Wykonany jest w układzie dwułopatowego wirnika wahliwego. Skok ogólny łopat jest stały, nie ma sterowania skokiem cyklicznym. Sterowanie odbywa się poprzez pochylenie i przechylenie wirnika.



Rys. 9. Łopata o profilu IL11 – model 3D [opracowanie własne Mirosław Delega]



Rys. 10. Łopata o profilu NACA9H12 – model 3D [opracowanie własne Mirosław Delega]

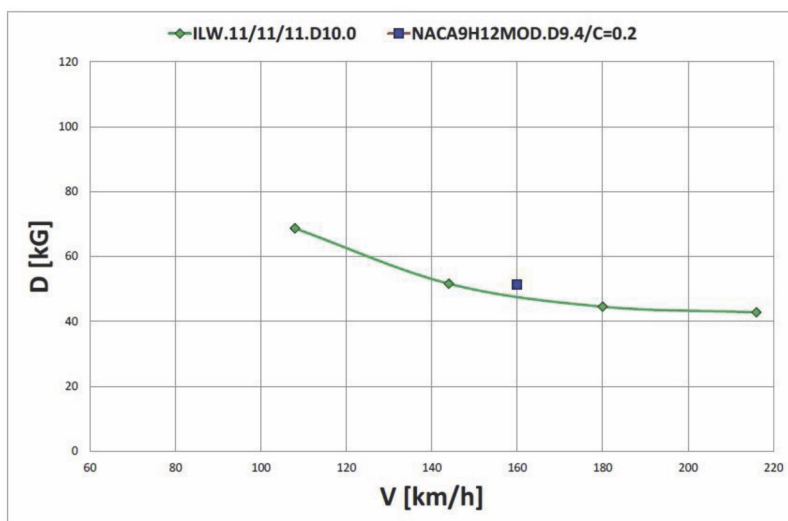
Profillem wyjściowym podczas projektowania rodziny alternatywnych profili był powszechnie stosowany NACA9H12. Na bazie tego profilu pracownicy Instytutu starali się uzyskać profil o lepszych osiągnięciach.

Do realizacji tego zadania wyznaczono charakterystyki aerodynamiczne wirnika lecącego z prędkością przelotową, na drodze numerycznej symulacji, którą wykonano za pomocą programu FLUENT z modułem Virtual Blade Model. Moduł VBM przeznaczony jest do uproszczonego modelowania efektów przepływowych generowanych przez obracający się wirnik. W takim podejściu wirnik zastąpiony jest dyskiem – strefą komórek siatki obliczeniowej w której umieszczone są źródła pędu. Natężenie tych źródeł wyznacza się w oparciu o Teorię Elementu Łopaty, wykorzystując bazę dwuwymiarowych charakterystyk profili łopat wirnika.

Jako kryterium decydujące o wyborze profilu do zastosowania na wirniku wiatrakowca przyjęto wartość maksymalnej doskonałości aerodynamicznej osiąganą przez dany wirnik w warunkach lotu poziomego, ustalonego przy zadanej prędkości lotu 160 km/h. Jest to wartość większa o 20 km/h od prędkości osiągalnej przez wiatrakowca bazowy i taką wartość różnicy prędkości bazowej uważa się za znaczącą modyfikację osiągnięć wiatrakowca [8].

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW

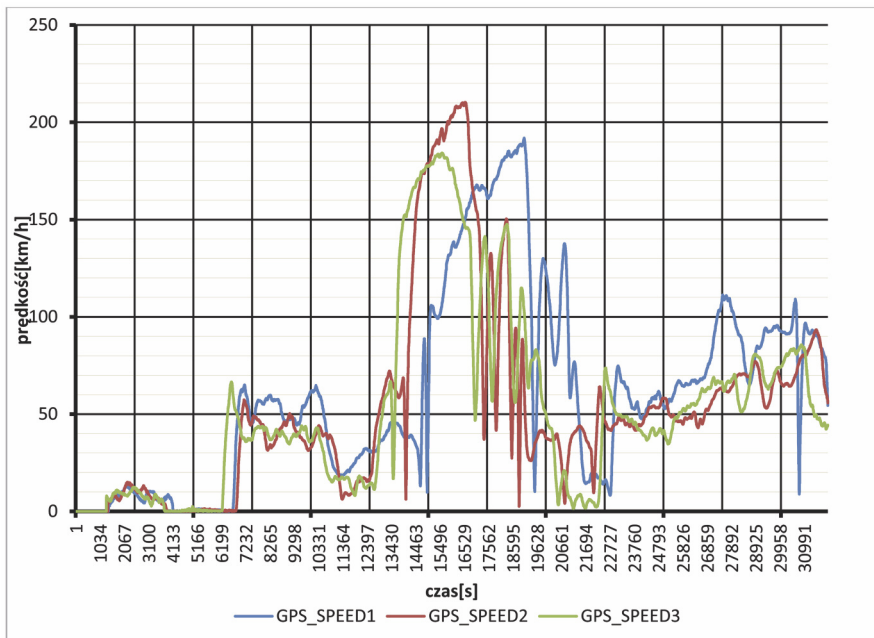
Po optymalizacji i zaprojektowaniu profilu i łopaty dokonano analizy aerodynamicznej w programie Fluent z wykorzystaniem modułu Virtual Blade Model. Badania wykazały, że przy prędkości 160 km/h i ciężarze wiatrakowca 600 kg wirnik ILW.11/11/11.D10 charakteryzuje się 7,5% redukcją oporu w stosunku do wirnika NACA9H12MOD.D9.4/ $c=0,2$  [6].



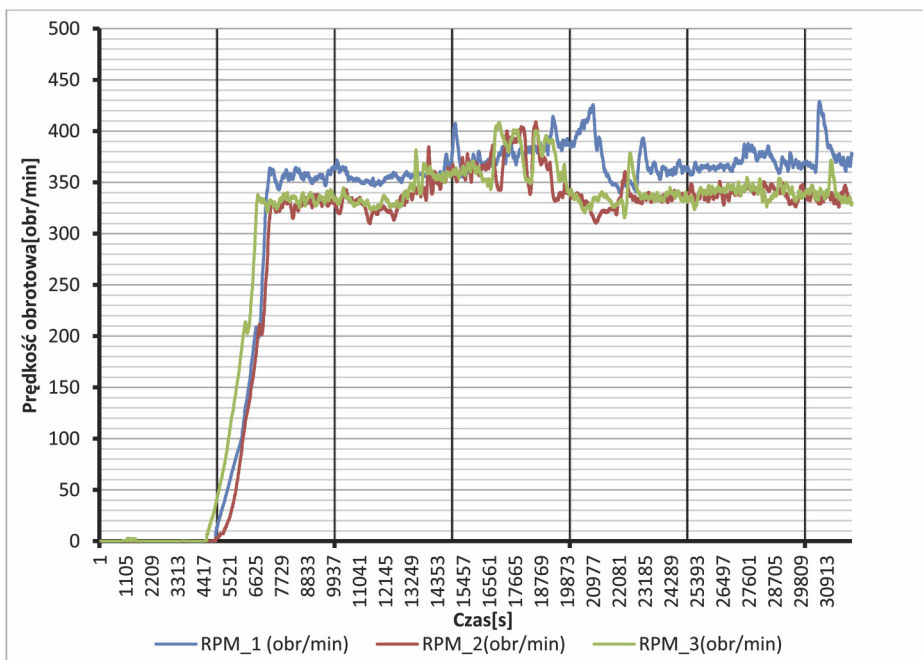
Rys. 11. Siła oporu w stosunku do prędkości [6]

Następne wykresy przedstawiają wyniki z lotów wiatrakowcem z rejestratorem.

Na wykresie (Rys. 12) przedstawiono prędkości postępowe wiatrakowca w funkcji czasu. Największą prędkością postępową udało się osiągnąć w locie z łopatami o profilu IL11 (zaznaczonymi czerwonym kolorem). Maksymalna prędkość lotu jaką udało się uzyskać na łopacie wykonanej w Instytucie Lotnictwa równała się prędkości nieprzekraczalnej (210 km/h) dla wiatrakowca Zen-1. Na pozostałych wirnikach maksymalnie udało się uzyskać prędkość 190 km/h.

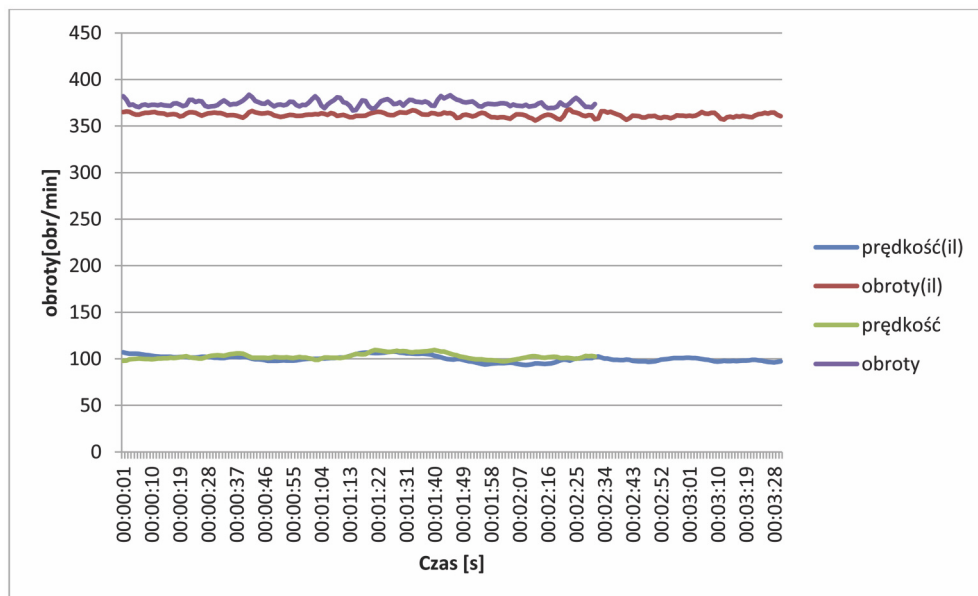


Rys. 12. Prędkość lotu wiatrakowca w funkcji czasu [4]



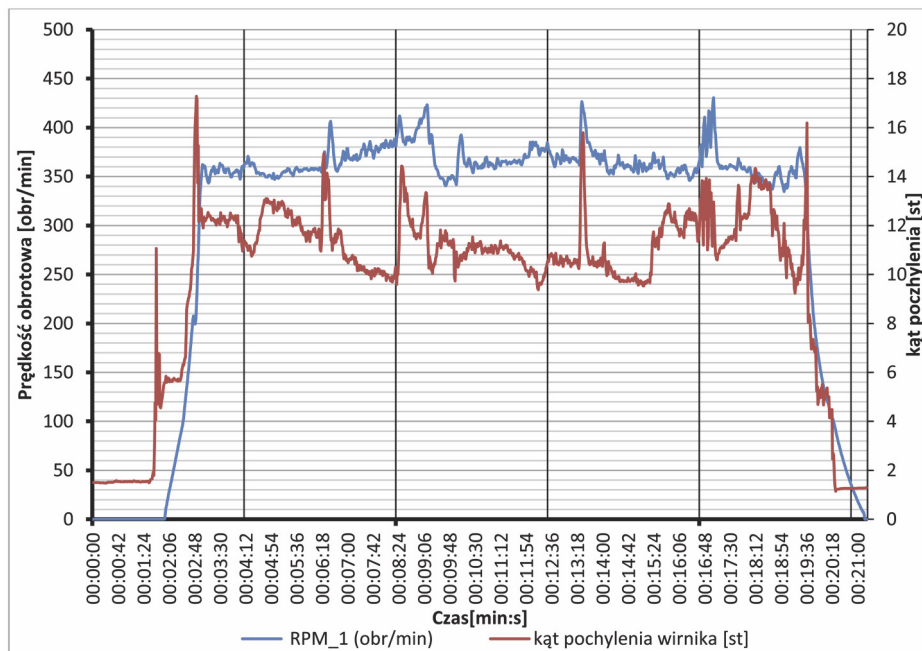
Rys. 13. Prędkość obrotowa wirników z różnymi łopatomy w funkcji czasu [4]





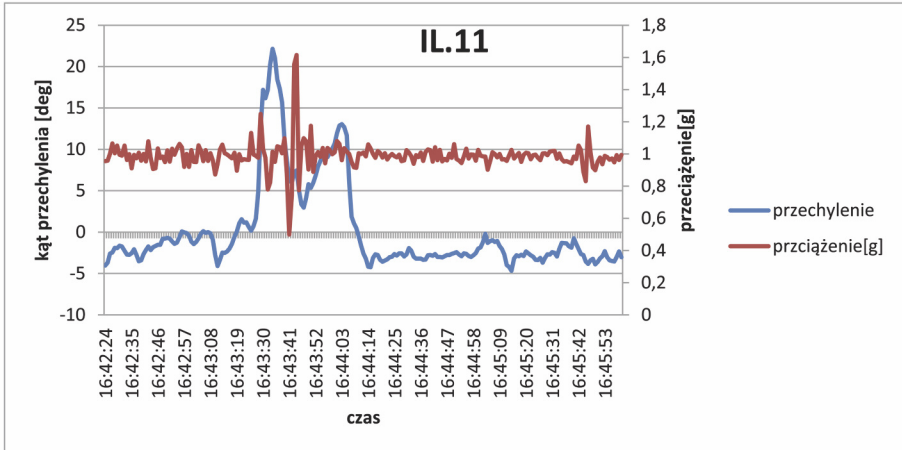
Rys. 14. Prędkość obrotowa wirników przy stałej prędkości postępowej w funkcji czasu [Aut., 2015]

Na wykresie (Rys. 13) można zauważyć, że podczas całego lotu średnia prędkość obrotowa wirnika z łopatkami o profilu IL11 była mniejsza w stosunku do wirników z łopatkami o innych profilach. Fragment lotu ze stałą prędkością (Rys. 14) 100 km/h w przypadku obydwu wirników wykazuje średnie obroty wirnika IL11 mniejsze o ok. 16 obr/min.

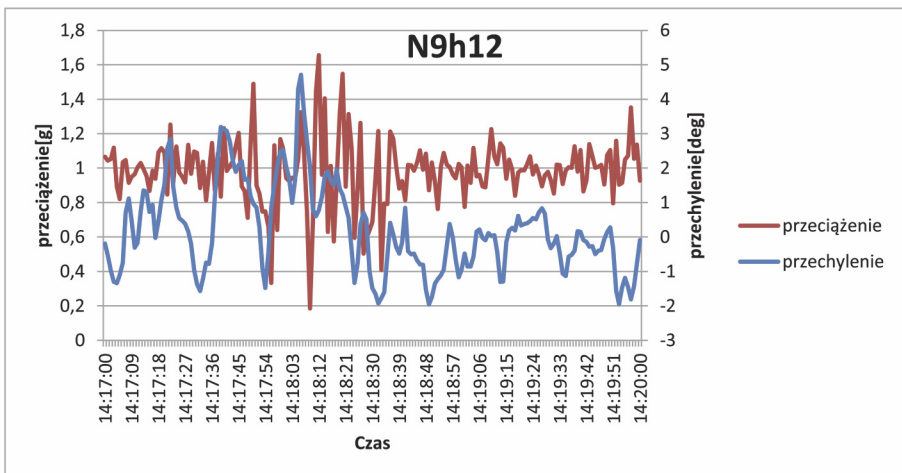


Rys. 15. Kąt pochyleń wirnika nośnego oraz jego obroty w funkcji czasu [4]

Na wykresie (Rys. 15) widać jak podczas wykonywania poszczególnych manewrów zmieniają się obroty wirnika głównego. Jedynym manewrem w którym wzrastają obroty przy pochylonym do przodu wirniku jest rozpedzanie do maksymalnej prędkości. W pozostałych manewrach (start, autorotacja) wirnik zwiększa swoją prędkość obrotową po przechyleniu do tyłu, a więc wtedy gdy powietrze przepływa przez wirnik z dołu do góry.



Rys. 16. Przeciążenia wirnika o profilu IL11 w zakrętach [Aut., 2015]



Rys. 17. Przeciążenia wirnika o profilu NACA9H12 w zakrętach [Aut., 2015]

W zakrętach nie wykazano znaczących różnic w przeciążeniu pomiędzy badanymi wirnikami.

## 5. PODSUMOWANIE

Cel jakim było zaprojektowanie profilu, dzięki któremu można polepszyć osiągi wiatrakowca, został osiągnięty. Wiatrakowiec z łopatom o profilu IL11 osiągnął większą prędkość maksymalną o ok. 20 km/h. Wirnik IL11 obracał się wolniej o ok. 16 obr/min przy stałej prędkości 100 km/h. Mniejsze obroty w stosunku do wirnika o profilu NACA 9H12 uzyskane podczas obrotu na wiatrakowcu ZEN-1 dobrze rokują ze względu na to, iż wirnik przeznaczony

jest do wiatrakowca osiągającego większe prędkości i, co za tym idzie, większą prędkość obrotową wirnika. Po zamontowaniu go na dedykowanym wiatrakowcu będzie można uzyskać korzystny zapas do prędkości obrotowej powodującej niechciane zjawiska w postaci drgań.

Z drugiej strony mała prędkość obrotowa wirnika wiąże się z mniejszą energią kinetyczną zakumulowaną w inercyjnym układzie wirnika i przy ujemnych przeciążeniach (i tak zakazanych na wiatrakowcu) mogłaby szybciej powodować utratę sterowności.

Mniejsze obroty podczas oblotu były także spowodowane założonym dużym kątem skoku ogólnego (4,5°) ze względu na podatność skrętną. W wiatrakowcach osiągających mniejsze prędkości należało będzie zmniejszyć kąt skoku ogólnego.

Czas wznoszenia podczas startu ze 100-200 m był krótszy w większości lotów o ok. 10 s. Geometria profilu nie wpłynęła znacznie na przeciążenia w zakrętach. Mniejsze obroty wirnika o profilu IL11 zapewniają mniejszą o około 8 m/s prędkość końcówki łopaty, a co za tym idzie znacznie redukuje się poziom generowanego hałasu [1].

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Cieślak, S., 2008, „Analiza możliwości zwiększenia prędkości przelotowej i zmniejszenia hałasu na wiatrakowcu,” Prace Instytutu Lotnictwa, **219**, s. 31-39.
- [2] Dąbrowski, W., Popowski, S., i Rybaniec, R., 2011, „System do pomiaru i rejestracji wybranych parametrów pilotażowo nawigacyjnych wiatrakowca,” Prace Instytutu Lotnictwa, **219**, s. 47-58.
- [3] Dąbrowski, W., Popowski, S., i Rybaniec, R., 2011, „Wyniki badań systemu pomiarowo-rejestracyjnego wiatrakowca,” Prace Instytutu Lotnictwa, **219**, s. 47-58.
- [4] Pietrosiński, M., 2015, „Oblot wirników o różnych profilach z rejestratorem,” Raport nr R13026\_CNTL67/2015, Lotnisko – Jaktorów.
- [5] Pruter, I., Duda, H., 2010, “A New Flight Training Device for Modern Lightweight Gyroplanes,” German Aerospace Center DLR, Institute of Flight Systems, Braunschweig.
- [6] Stalewski, W., 2016, “Aerodynamic Design of Gyroplane Main Rotors,” Transactions of the Institute of Aviation, **1**(242), pp. 80-93.
- [7] Stalewski, W., 2014, “Obliczeniowa analiza własności aerodynamicznych profili łopat nowoczesnych wirników autorotacyjnych,” Raport nr R13026\_BA2-24/2014.
- [8] Stalewski, W., 2008, „Symulacja startu wiatrakowca w oparciu o program Fluent z modelem VBM,” Prace Instytutu Lotnictwa, **211**, s. 155-170.
- [9] Aviation Artur Trendak & Son, [http://trendak.eu/models/tercel/tech\\_data](http://trendak.eu/models/tercel/tech_data).

## THE INFLUENCE OF THE MAIN ROTOR BLADE AEROFOIL GEOMETRY ON THE GYROPLANE PERFORMANCE

### Abstract

*The aim of the study was to evaluate the effect of profile geometry on the performance of the gyroplane. The measurements were performed during flight testing rotors with blades profile N9H12 and IL11. The paper presents the results from registrar which was mounted on the gyroplane Zen-1. Article shows place and method to installed sensors of registrar. The results are summarized so, compare the performance of the gyroplane during the flight with blades of data profiles. It has been shown to improve performance on the gyroplane with blades profile IL11.*

*Keywords: gyroplane, registrar, rotor.*