

NIESTABILNOŚĆ HUŚTAWKOWEGO WIRNIKA NOŚNEGO WIATRAKOWCA DZIAŁAJĄCEGO W OPŁYWIE OSIOWYM

SŁAWOMIR CIEŚLAK

Centrum Nowych Technologii, Zakład Kompozytów, Instytut Lotnictwa,
al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Polska, slawomir.cieslak@ilot.edu.pl

Streszczenie

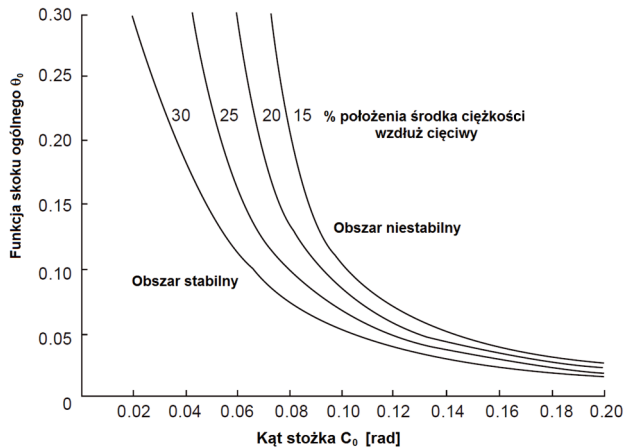
W pracy przedstawiono wyniki obliczeń, mających na celu wstępną identyfikację zjawiska niestabilności łopatek wirnika huśtawkowego pracującego w przepływie osiowym, np. w czasie prerotacji. Określono granicę wystąpienia niepożądanych zjawisk na łopatach w zależności od wielkości kąta skoku ogólnego i konstrukcyjnego kąta stożka. Analizom poddano model łopaty wirnika montowanego na budowanym w Instytucie Lotnictwa wiatrakowcu I-28 w wariancie B.

Słowa kluczowe: wiatrakowiec, wirnik huśtawkowy, niestabilność.

WPROWADZENIE

Wirniki nośne wiroplątów, a w tym wiatrakowców narażone są w trakcie lotów na różnego rodzaju niestabilności aeroelastyczne, wywołane siłami masowymi i aerodynamicznymi zmieniającymi się podczas ruchu obrotowego łopatek. Zjawiska te w zależności od przyczyn je wywołujących oraz charakteru ich przebiegu klasyfikuje się jako: flutter klasyczny, diwergencja, flutter oderwania, flutter ściśliwości, flutter cięciwowy, weaving czy też aeroelastyczny ruch łopatek przy małej częstotliwości obrotów wirnika i ewentualnym wystąpieniu podmuchów wiatru. Każdy z wymienionych rodzajów niestabilności przebiega inaczej w klasycznych wirnikach przegubowych aniżeli w wirnikach ze sztywno zamocowanymi łopatkami, a jeszcze inaczej w wirnikach huśtawkowych.

Szczególnym przypadkiem niestabilności ruchu łopatek jest "weaving", który zgodnie z [1] pojawia się wyłącznie w dwułopatowych wirnikach huśtawkowych, gdzie łopaty są sztywno połączone ze sobą i zawieszono na centralnym przegubie poziomym. Według [1] "weaving" wykazuje te same cechy jak flutter wirnika z tym, że obie łopaty poruszają się jako jedno niemal sztywne ciało. Destabilizacja łopatek przy zjawisku "weaving'u" zależy głównie od konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty (oznaczonego jako C_0) oraz w mniejszym stopniu od kąta skoku ogólnego (oznaczonego jako θ_0), przy czym w odróżnieniu od flatteru, destabilizacja może wystąpić nawet wtedy, kiedy środek ciężkości łopaty mierzony wzdłuż cięciwy zlokalizowany jest na odległości mniejszej niż 25% cięciwy. Na wykresie (rys. 1) przedstawiono rozkłady granic niestabilności w zależności od konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty, funkcji skoku ogólnego oraz od wyważenia łopaty wzdłuż cięciwy wyrażonego w procentach.



Rys. 1. Granice stabilności ruchu łopaty w zjawisku weaving'u [1]

Z wykresu wynika, że przy wzroście kąta stożka znacznie zawęża się obszar stabilnego działania wirnika nośnego (na który wpływają także inne parametry). Zjawisko weaving'u omawiane jest także w [2]. W pracy przedstawiono analizę wpływu większej liczby parametrów konstrukcyjnych wirnika na wystąpienie omawianego rodzaju niestabilności. Analizie poddano wpływ konstrukcji piasty wirnika, charakterystyki masowej łopaty (liczba Lock'a), współczynnika wypełnienia tarczy wirnika, kąta nastawienia łopaty a także położenia środka ciężkości oraz aerodynamicznego środka parcia wzdłuż cięciwy łopaty. W każdym przypadku najbardziej zauważalny wpływ na wystąpienie niestabilności miała wartość konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty, stąd w niniejszej pracy poddano badaniom głównie wpływ tego parametru na niestabilność wirnika.

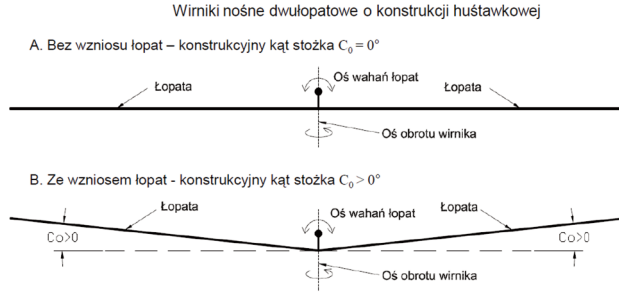
CEL I ZAKRES PRACY

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych, mających na celu wstępną identyfikację zjawiska niestabilności łopaty wirnika huśtawkowego pracującego w opływie osiowym, np. w czasie prerotacji. Wyznaczono granicę wystąpienia niepożądanych zjawisk na łopatach w zależności od wielkości kąta skoku ogólnego i konstrukcyjnego kąta stożka. Analizie poddano model łopaty wirnika zamontowanego na wiatrakowcu I-28 wariant B, powstającego w Instytucie Lotnictwa w ramach projektu „Technologia wdrożenia do praktyki gospodarczej nowego typu wiroplataw statku powietrznego” współfinansowanego ze środków UE w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

PODSTAWOWE CECHY WIRNIKÓW HUŚTAWKOWYCH

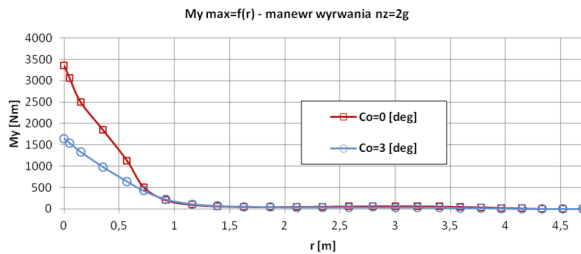
Dwułopatowy, huśtawkowy wirnik nośny z jednym, centralnie umieszczonym przegubem poziomym wykorzystywany jest w większości użytkowanych na świecie wiatrakowców, produkowanych seryjnie przez doświadczonych wytwórców lotniczych jak i w jednostkowych konstrukcjach amatorskich.

W ofertach firm wytwarzających wirniki huśtawkowe pojawiają się zazwyczaj konstrukcje, w których ramiona piasty są prostopadłe do osi obrotu, jak schematycznie pokazano na rys. 2a. Konstrukcje takie znacząco upraszczają proces wytwarzania i pozwalają na zmniejszenie kosztów wykonania. Wiadomo jednak, że zastosowanie konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty większego od 0° (rys. 2b) pozytywnie wpływa na zmniejszenie momentu gnącego łopaty w płaszczyźnie ciągu, szczególnie w strefie nasady łopaty.



Rys. 2. Schemat konstrukcji „huśtawkowego” wirnika nośnego wiatrakowca, A - wirnik bez wzniosu łopat $C_0 = 0$; B - wirnik ze wzniosem łopat $C_0 > 0$ [opracowanie własne]

W celu zilustrowania korzyści wynikających z zastosowania określonego, konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty, na rys. 3 przedstawiono wykresy momentu gnącego w płaszczyźnie ciągu w funkcji promienia łopaty dla wirnika bez konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty oraz dla identycznego wirnika z dodatnim kątem wzniosu łopaty równym 3° . Na wykresach naniesiono wyniki obliczeń obciążeń łopat wirnika nośnego wiatrakowca I-28 w manewrze „wyrwanie” dla dwóch analizowanych wariantów konstrukcji [3].



Rys. 3. Wykres rozkładu momentu gnącego łopatę w płaszczyźnie ciągu w funkcji długości łopaty dla wirnika bez konstrukcyjnego kąta wzniosu oraz dla wirnika z konstrukcyjnym kątem wzniosu $C_0=3^\circ$ [opracowanie własne]

W analizach obciążeń przyjmuje się, że manewr „wyrwanie” w locie wiatrakowca wywołany jest gwałtownym ściągnięciem drążka sterowego, po uprzednim rozpedzaniu wiatrakowca podczas zniżania. Ściągnięcie drążka powoduje wzrost kąta natarcia wirnika, zwiększenie jego częstości obrotów a w konsekwencji wzrost siły ciągu powyżej wartości niezbędnej do ustalonego lotu poziomego. Przy dostatecznym rozpedzeniu wiatrakowca i gwałtownym ściągnięciu drążka możliwe jest osiągnięcie współczynnika przeciążenia na poziomie $n_z \approx 2$.

Z przebiegu wykresów (rys. 3) wynika, że łopata z konstrukcyjnym wzniosem określonym kątem $C_0 = 3^\circ$ obciążona jest momentem gnącym u nasady łopaty mniejszym o około 50% względem łopaty bez wzniosu.

Wprowadzenie konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty, poprzez podjęcie ramion piasty o kilka stopni ku górze może mieć jednak negatywny wpływ na dynamikę wirnika. Wstępne analizy numeryczne działania wirnika huśtawkowego w opływie osiowym wykazały, że zbyt duży kąt wzniosu wpływa destabilizująco na wirujące łopaty. Co więcej, niestabilność nie występuje na wirniku bezprzegubowym z identycznymi łopatami, pracującym w tych samych warunkach.

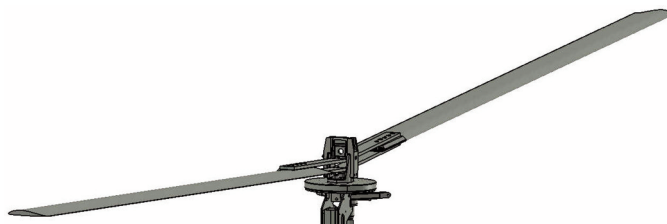
Nie oznacza to, że każdy huśtawkowy wirnik nośny z dodatnim konstrukcyjnym kątem wzniosu obciążony jest ryzykiem wystąpienia niestabilności ruchu łopat, bowiem wpływ na to mają także inne czynniki konstrukcyjne m.in. sztywność skrętna oraz skok ogólny łopat.

PRZEDMIOT ANALIZ - HUŚTAWKOWY WIRNIK WIATRAKOWCA I-28

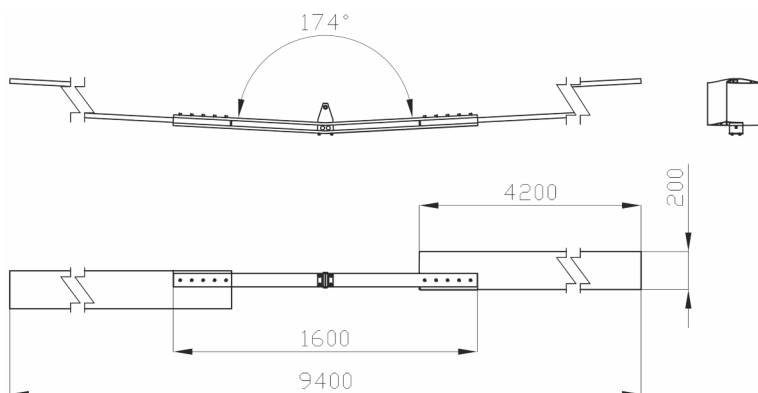
Przedmiotem analizy przedstawionej w niniejszej pracy jest huśtawkowy wirnik nośny wiatrakowca I-28, z dwiema łopatom duralowymi o profilu lotniczym NACA-9-H-12-MOD z cięciwą równą 0,2 m, stałą po długości łopaty. Długość łopaty wynosi 4,2 m, bez skręcenia geometrycznego wzdłuż promienia. Średnica wirnika wiatrakowca równa jest 9,4 m.

Piastę wirnika, tworzy duralowy łącznik obydwu łopat, zbudowany z dwóch płaskowników (obejmujących łopaty z „kieszeniami”) o długości 1,6 m i elementów łączących w ich centralnej części. Ramiona piasty (płaskowniki) są wygięte ku górze w kierunku prostopadłym do płaszczyzny obrotów, co zapewnienia uzyskanie konstrukcyjnego kąta wzniosu każdej łopaty o wartości 3° dla każdego z ramion głowicy (mierzone względem płaszczyzny obrotów wirnika). Piasta zamocowana jest do głowicy wirnika na przegubie sworzniowym, wahliwym umożliwiającym swobodne wahania łącznika z łopatami podczas lotu.

Analizowany wirnik nośny wraz z głowicą przedstawiono na rysunku 4 w widoku perspektywicznym, natomiast rysunek 5 zawiera widoki wirnika bez głowicy w trzech rzutach.



Rys.4. Perspektywiczny widok huśtawkowego wirnika nośnego wiatrakowca I-28, wariant B [opracowanie własne]



Rys. 5. Widoki w trzech rzutach huśtawkowego wirnika nośnego wiatrakowca I-28, wariant B [opracowanie własne]

Każda z łopat wirnika połączona jest z piastą za pomocą tzw. „kieszeni” (przekładki) o długości 30 cm, umieszczonej na końcu łącznika i jednocześnie w początkowej sekcji łopaty, co umożliwia dopasowanie elementów i zapewnienie kąta nastawienia łopat wynoszącego 2° względem płaszczyzny wirowania. Łącznik, łopata i przekładka połączone są ze sobą za pomocą pięciu śrub pasowanych o średnicy 12 mm.

METODYKA SYMULACJI OBLICZENIOWEJ

Symulację obliczeniową – będącą przedmiotem pracy – wykonano przy użyciu będących w posiadaniu Instytutu Lotnictwa programów komputerowych przeznaczonych

do wyznaczania obciążeń i odkształceń łopaty wirnika nośnego, bazujących na analizie modalnej: programu SMOG – dla wirników huśtawkowych, oraz program OBCWN – dla wirników z łopatami zawieszonymi sprężysto (w tym z przegubowo zawieszonymi łopatami). Danymi wejściowymi były parametry geometryczne, masowe, sztywnościowe oraz charakterystyki aerodynamiczne duralowej łopaty wirnika nośnego wiatrakowca I-28, wariant B.

Obliczenia wykonano dla warunków opływu osiowego napędzanego wirnika, czyli dla warunków odzwierciedlających rozpędzanie wirnika w fazie przedstartowej (prerotację wirnika) w przypadku wiatrakowca lub działanie wirnika nośnego wiatrakowca zainstalowanego na stanowisku badawczym.

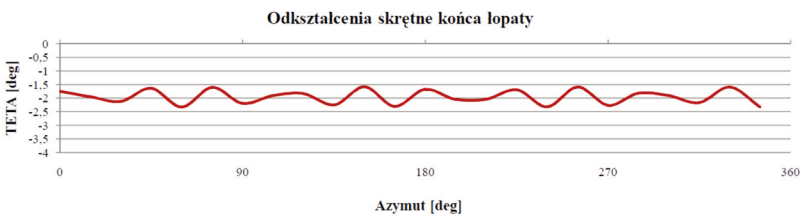
Prędkość kątową wirnika nośnego ustalono na poziomie 42 rad/s (odpowiada to częstości obrotów około 400 obr/min), co jest górną wartością częstości obrotów, jaką osiąga wiatrakowiec I-28 w ustalonym locie poziomym.

Kryteriami oceny wystąpienia lub nie niestabilności ruchu łopat były wartości przemieszczeń końcówki łopaty (giętnych i skrętnych). Przyjęto, że wirnik pracuje stabilnie dopóki amplituda przemieszczeń skrętnych końca łopaty (mierzonych kątem skreślenia) nie przekracza wartości 1° . Jednocześnie dokonywano oceny przemieszczeń giętnych końca łopaty w płaszczyźnie ciągu, które są następstwem przemieszczenia skrętnego.

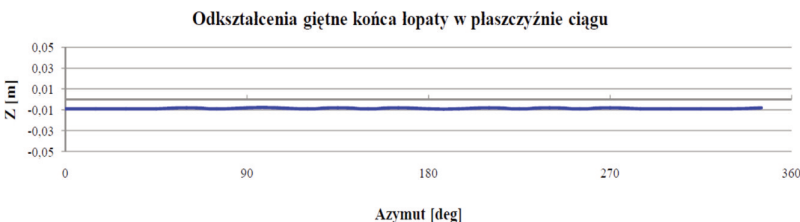
PRZEBIEG SYMULACJI OBLICZENIOWEJ I JEJ WYNIKI

W pierwszym etapie obliczeń przyjęto skok ogólny łopat wirnika nośnego o wartości $\theta_0 = 2^\circ$ oraz wartość konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty równą $C_0 = 0^\circ$, co odpowiadało pierwszemu wariantowi konstrukcji wirnika nośnego wiatrakowca I-28, por. rys. 2a.

Wykonano próbne serie obliczeń obciążeń i przemieszczeń końców łopat wirnika nośnego w celu oceny stabilności pracy łopat. Jak wspomniano wcześniej, do oceny wyników wykorzystano wykresy odkształceń końca łopaty. Na rys. 6 przedstawiono wykres przemieszczenia skrętnego „TETA” końca łopaty w funkcji azymutu dla ostatniego z piętnastu obliczeniowych obrotów wirnika. Podobny wykres sporządzono dla przemieszczenia giętnego końca łopaty w płaszczyźnie ciągu oznaczanego jako wielkość „Z” (rys. 7).



Rys. 6. Zmiana przemieszczeń skrętnych końca łopaty wirnika nośnego w zależności od azymutu dla $\theta_0 = 2^\circ$, $C_0 = 0^\circ$ [opracowanie własne]

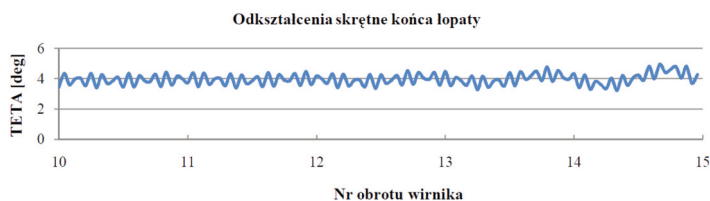


Rys. 7. Zmiana przemieszczeń giętnych końca łopaty wirnika nośnego w zależności od azymutu dla $\theta_0 = 2^\circ$, $C_0 = 0^\circ$ [opracowanie własne]

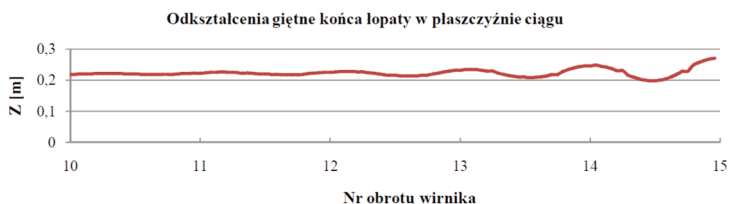
Analiza wykresów odkształceń (rys. 6, rys. 7) wskazuje na stabilne działanie wirnika nośnego o skoku ogólnym łopat $\theta_0 = 2^\circ$ z zerowym konstrukcyjnym kątem wzniosu łopaty, jednakże jak wynika z wykresu (rys. 3) piasta takiego wirnika oraz początkowa sekcja łopaty jest mocno obciążona momentem gnącym.

A zatem w celu zapewnienia zapasu wytrzymałości wirnika w tym wariantcie konieczne jest wprowadzenie odpowiednio dużej grubości płaskowników łącznika łopat oraz większego pola przekroju poprzecznego początkowej sekcji łopaty. Niesie to za sobą zwiększenie masy konstrukcji wirnika, co jest niepożądane. Korzystniejsze wydaje się więc wprowadzenie konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty większego od 0° .

W dalszej kolejności wykonano analogiczne obliczenia obciążeń i przemieszczeń łopaty dla dodatnich wartości kąta C_0 . Obliczenia przeprowadzono zachowując kąt skoku ogólnego $\theta_0 = 2^\circ$, zwiększając natomiast stopniowo konstrukcyjny kąt wzniosu łopaty przy czym wyznaczano wartości przemieszczeń końca łopaty. Cykl obliczeniowy powtarzano aż do momentu, kiedy przy danym kącie stożka C_0 przemieszczenia końca łopaty zaczynały narastać. Stan taki wystąpił przy osiągnięciu wartości $C_0 = 5,1^\circ$. Wtedy stała się zauważalna tendencja do narastania przemieszczeń skrętnych oraz przemieszczeń giętnych końca łopaty w płaszczyźnie ciągu, z każdym kolejnym obrotem wirnika nośnego. Na rys. 8 i rys. 9 przedstawiono wykresy przemieszczeń końca łopaty podczas pięciu ostatnich, obliczeniowych obrotów wirnika nośnego.



Rys. 8. Zmiana przemieszczeń skrętnych końca łopaty wirnika nośnego w zależności od azymutu dla $\theta_0 = 2^\circ$, $C_0 = 5,1^\circ$ [opracowanie własne]



Rys. 9. Zmiana przemieszczeń giętnych końca łopaty wirnika nośnego w zależności od azymutu dla $\theta_0 = 2^\circ$, $C_0 = 5,1^\circ$ [opracowanie własne]

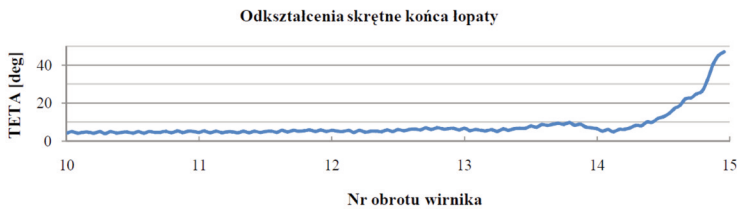
Z przedstawionych wykresów (rys. 8, rys. 9) wynika, że w ostatnim z piętnastu obrotów wirnika amplituda przemieszczeń skrętnych osiąga wartość bliską jednego stopnia a strzałka ugięć w płaszczyźnie małej sztywności łopaty wynosi już kilka centymetrów. Wydaje się, że tendencje te będą narastać w każdym kolejnym obrocie wirnika. Można to utożsamić z destabilizacją łopat działającego wirnika nośnego w przepływie osiowym, co w warunkach rzeczywistych mogłyby z czasem doprowadzić do uszkodzenia wirnika i poważnej awarii wiatrakowca.

Dalsze obliczenia prowadzone przy $C_0 > 5,1^\circ$ potwierdzają nasilenie się tendencji niestabilności i już przy kącie $C_0 = 5,2^\circ$ (dla $\theta_0 = 2^\circ$) występuje mocne zaburzenie pracy

wirnika nośnego, pojawiają się dynamicznie narastające przemieszczenia skrętne i giętne końca łopaty (rys. 10 i rys. 11).



Rys. 10. Zmiana przemieszczeń skrętnych końca łopaty wirnika nośnego w zależności od azymutu dla $\theta_0 = 2^\circ$, $C_0 = 5,2^\circ$ [opracowanie własne]



Rys. 11. Zmiana przemieszczeń giętnych końca łopaty wirnika nośnego w zależności od azymutu dla $\theta_0 = 2^\circ$, $C_0 = 5,2^\circ$ [opracowanie własne]

Wielkości przemieszczeń przedstawionych na wykresach (rys. 10 i 11) osiągnęły znaczne wartości. Oczywiście są to wartości wynikające z algorytmu obliczeń. Przemieszczenia skrętne na poziomie kilkudziesięciu stopni oraz przemieszczenia giętne przekraczające 0,7 m w realnych warunkach prowadziłyby bez wątpienia do zniszczenia wirnika nośnego lub uprzednio zderzenia łopat z innymi elementami wiatrakowca (np. śmigłem lub belką ogonową). W rzeczywistych wirnikach wiatrakowcowych nie stosuje się tak dużych kątów stożka łopat, dlatego też tego typu sytuacje nie występują.

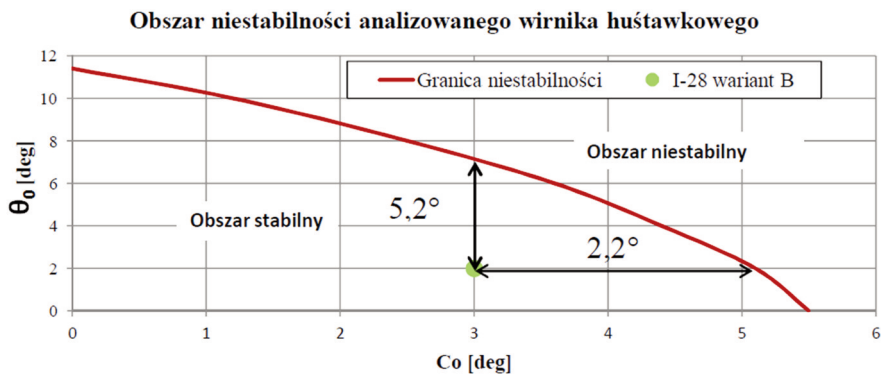
SYMULACJA OBLICZENIOWA WPŁYWU KĄTA SKOKU OGÓLNEGO NA WYSTĄPIENIE NIESTABILNOŚCI

Przedstawione wcześniej obliczenia dotyczyły wirnika nośnego z kątem skoku ogólnego łopat ustawionym na wartość $\theta_0 = 2^\circ$. W celu oceny wpływu zmian tego kąta na wystąpienie niestabilności wykonano obliczenia, w trakcie których zmieniano zarówno konstrukcyjny kąt wzniosu łopaty C_0 jak i kąt skoku ogólnego łopat θ_0 .

Dla poszczególnych wartości kątów θ_0 z przedziału od 0° do 12° wykonywano kolejne obliczenia zwiększając za każdym razem wartość konstrukcyjnego kąta wzniosu łopaty aż do wystąpienia pierwszych oznak niestabilnego działania wirnika. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono wykres granicy niestabilności wirnika huśtawkowego w opływie osiowym (rys. 12). Obszar wykresu położony poniżej krzywej granicznej niestabilności oznacza stabilne działanie wirnika.

Wykres przedstawia krzywą graniczną wystąpienia niestabilności wirnika – linia ciągła. Z przebiegu wykresu wynika, że przy zwiększaniu wartości konstrukcyjnego kąta stożka łopat C_0 zmniejsza się graniczna wartość kąta skoku ogólnego łopat θ_0 , przy której wirnik pracuje stabilnie.

W przypadku wirników nośnych z głowicą nieposiadająca możliwości zmiany skoku ogólnego łopat wartości C_0 i θ_0 muszą być ustalone już na etapie konstruowania wirnika. Wartości tych wielkości powinny być dobierane z wykorzystaniem wykresu (rys. 12).



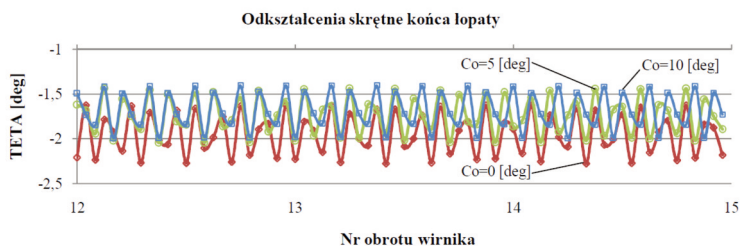
Rys. 12. Granica niestabilności wirnika huśtawkowego w opływie osiowym [opracowanie własne]

Dla przykładu na rys. 12 zaznaczono także wielkość skoku ogólnego i kąta stożka łopat wirnika nośnego wiatrakowca I-28 wariant B (oznaczono kropką). To pokazuje, że wirnik budowanego wiatrakowca pracuje przy bezpiecznych parametrach konstrukcyjnych (poniżej granicy niestabilności). Przy kącie skoku ogólnego $\theta_0=2^\circ$ pozostaje około $2,2^\circ$ zapasu na ewentualne konstrukcyjne zwiększanie kąta stożka i odpowiednio przy konstrukcyjnym kącie stożka $C_0=3^\circ$ zapas na zwiększanie kąta skoku ogólnego wynosi ok. $5,2^\circ$.

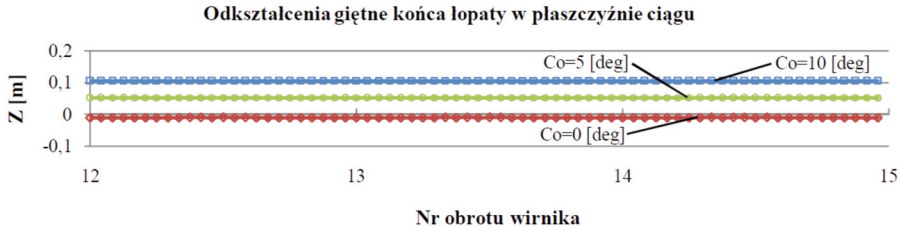
PORÓWNANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH DLA WIRNIKA BEZPRZEGUBOWEGO

Ostatnim etapem pracy było porównanie otrzymanych wyników z wynikami obliczeń dla wirnika bezprzegubowego, gdzie założono nieskończenie dużą wartość sztywności giętej sprężystego utwierdzenia łopaty w płaszczyźnie ciągu i płaszczyźnie obrotów. W wirniku tym zastosowano identyczne łopaty jak w analizowanym przypadku wirnika huśtawkowego. Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego OBCWN przeznaczonego do obliczeń obciążeń łopat wirników nośnych z łopatami zawieszonymi sprężysto (w tym przegubowo zawieszonymi łopatami), gdzie każda łopata, inaczej niż w wirniku huśtawkowym pracuje niezależnie od pozostałych.

Wyniki potwierdziły fakt, że niestabilności występują tylko w przypadku wirnika huśtawkowego przy zwiększonym kącie stożka łopat i określonych kątach skoku ogólnego. Wirnik bezprzegubowy nie wykazuje niestabilności przy zmianach tychże parametrów. Mimo, że występują niewielkie odkształcenia skrętne i giętne łopat to nie mają one tendencji do gwałtownego narastania, jak to zauważono w przypadku wirnika huśtawkowego. Analogiczne wyniki obliczeń wielkości odkształceń łopat tego wirnika przedstawiono na rys. 13 i rys. 14.



Rys. 13. Zmiana przemieszczeń skrętnych końca łopaty bezprzegubowego wirnika nośnego w zależności od azymutu [opracowanie własne]



Rys. 14. Zmiana przemieszczeń giętych końca łopaty bezprzegubowego wirnika nośnego w zależności od azymutu [opracowanie własne]

BADANIA STANOWISKOWE I WERYFIKACJA OBLICZEŃ

Wstępne badania stabilności pracy wirników huśtawkowych produkowanych wiatrakowców odbywają się podczas prób stanowiskowych, w których przeprowadzane jest zarazem torowanie łopat. Po wprowadzeniu wyważenia antyflutterowego łopaty montowane są w piasku, po czym każdy wirnik poddawany jest weryfikacji wyważenia statycznego względem przegubu wahań. Następnie skompletowany zespół wirnika montowany jest na stanowisku badawczym, gdzie jest wprawiany w ruch ze stopniowym zwiększaniem częstości obrotów aż do wystąpienia maksymalnej prędkości obrotowej uzyskiwanej w locie danego typu wiatrakowca. Kolejne etapy zwiększania prędkości obrotowej wirnika w próbach następują pod warunkiem niewystąpienia nadmiernych drgań przy niższych częstościach obrotów.

Ostateczna weryfikacja pracy wirnika dokonywana jest podczas oblotu fabrycznego, poprzedzonego próbami prerotacji wirnika nośnego zamontowanego na docelowym wiatrakowcu.

Oprócz opisanych prób dla wiatrakowca I-28 wariant B wykonano także obliczenia obciążeń łopat wirnika nośnego zarówno w prerotacji jak i w locie poziomym w pełnym zakresie prędkości eksploatacyjnych oraz w manewrze wyrwania, przy którym wirnik nośny osiąga maksymalną prędkość obrotową. Wyniki obliczeń nie ujawniły tendencji do wystąpienia niestabilności, co można uznać za pozytywną weryfikację obliczeń przedstawionych w niniejszej pracy.

WNIOSKI

1. Konstrukcja piasty wirnika huśtawkowego o dodatnim wzniosie łopat pozwala na zmniejszenie obciążeń momentem gnącym. Wprowadzenie konstrukcyjnego kąta wzniosu łopat większego od 0° zmniejsza wielkość momentów gnących w płaszczyźnie ciągu działających na ramiona piasty oraz na nasady łopat.
2. Zwiększanie kąta wzniosu łopat ponad wartość graniczną, pomimo, że pozytywnie wpływa na zmniejszenie obciążeń piasty i łopat, niesie za sobą ryzyko wystąpienia niepożądanych zjawisk objawiających się destabilizacją łopat. W przypadku analizowanego wirnika nośnego przy stałym kącie skoku ogólnego łopat $\theta_0 = 2^\circ$ niestabilności pojawiają się przy zwiększeniu konstrukcyjnego kąta wzniosu do wartości $C_0 = 5,1^\circ$ przy czym zjawisko staje się bardziej wyraźne przy dalszym zwiększaniu kąta C_0 .
3. Iteracyjne poszukiwanie granicy niestabilności analizowanego wirnika nośnego – dla różnych wariantów geometrycznych wirnika – pozwoliło na wyznaczenie obszaru niestabilności w zależności od wartości kąta skoku ogólnego łopat θ_0 oraz konstrukcyjnego kąta wzniosu C_0 , (rys. 12). Z wykresu tego wynika, że wirnik nośny wiatrakowca I-28 w wariantcie B znajduje się w obszarze stabilnej pracy, a zapas do przekroczenia granicy niestabilności jest wystarczająco duży.

4. Porównanie wyników obliczeń obciążeń i przemieszczeń łopat przeprowadzonych dla wirnika huśtawkowego i dla wirnika bezprzegubowego wykazało, że w przypadku wirnika bezprzegubowego niestabilności nie występują, wirniki huśtawkowe narażone są natomiast na wystąpienie niestabilności przy zbyt dużej wartości konstrukcyjnego kąta wzniosu łopat lub kąta skoku ogólnego łopat.

LITERATURA

- [1] Bramwell A. R. S., Done G., Balmford D.: Bramwell's Helicopter Dynamics, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [2] Leishman J. G.: Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge University Press, London, 2008.
- [3] Bielawa R. L.: Rotary Wing Structural Dynamics and Aeroelasticity, AIAA, Washington DC, 1992.
- [4] Obciążenia łopat i głowicy wirnika nośnego wiatrakowca I-28 wariant B – raport wewnętrzny, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 2013.
- [5] Krzymień W.: Właściwości drganiowe wiatrakowca, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 219, Warszawa, 2011.
- [6] Djamel Rezgui, Mark H. Lowenberg, Peter C. Bunniss: Experimental and numerical analysis of the stability of an autogyro teetering rotor, Department of Aerospace Engineering, University of Bristol, Bristol, 2008.
- [7] Bronowicz J.: Symulacja komputerowa ruchu łopaty wirnika śmigłowca w zawisie i podczas manewrów w zawisie śmigłowca, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 149-150, Warszawa, 1997.
- [8] Stalewski W., Zalewski W.: Symulacja pracy wirnika nośnego wiatrakowca w początkowej fazie pionowego startu, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 219, Warszawa, 2011.
- [9] Żerek L.: Wpływ parametrów lotu i niektórych parametrów konstrukcyjnych na flutter łopat wirnika nośnego śmigłowca, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 54, Warszawa, 1973.
- [10] Bronowicz J., Hawrylecki W.: Niestateczność ruchu łopat śmigłowca SW-4 w płaszczyźnie obrotów wirnika na stanowisku do prób naziemnych, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 153-154, Warszawa, 1998.
- [11] Gausz T., Szilagyí D.: Dynamika łopaty wirnika nośnego w manewrze śmigłowca, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 177-178, Warszawa, 2004.
- [12] Szumański K.: Model symulacyjny dynamiki wirnika śmigłowca w granicznych, nieustalonych stanach lotu, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 89, Warszawa, 1982.
- [13] Szumański K.: Start śmigłowca z wykorzystaniem energii kinetycznej inercyjnego układu wirnika nośnego, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 43, Warszawa, 1970.
- [14] Bronowicz J.: Symulacja obciążeń łopaty wirnika nośnego w nieustalonych stanach lotu śmigłowca, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 165-166, Warszawa, 2001.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu „Technologia wdrożenia do praktyki gospodarczej nowego typu wiroplątowego statku powietrznego” współfinansowanego ze środków UU w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, umowa UDA-POIG.01.03.01-14-074/09-00.

INSTABILITY OF THE GYROPLANE TEETERING ROTOR IN AXIAL FLOW

The paper presents the results of calculations aimed at a preliminary identification of the instability phenomenon of the teetering rotor blades operating in axial flow, for example, during the pre-rotation. The limit of adverse effects on the blades, depending on the size of the pitch angle and the design coning angle, was determined. Analyses were performed on a model of a rotor blade mounted in the gyroplane I-28 version B being built in the Institute of Aviation.

Keywords: gyroplane, teetering rotor, instability.