

# ANALIZA WPŁYWU CZYNNIKÓW KONSTRUKCYJNYCH ORAZ PARAMETRÓW STEROWANIA NA CZAS TRWANIA I WYSOKOŚĆ BEZROZBIEGOWEGO STARTU WIATRAKOWCA

SŁAWOMIR CIEŚLAK

*Instytut Lotnictwa*

## Streszczenie

*W pracy zaprezentowano porównanie wyników obliczeń parametrów bezrozbiegowego startu wiatrakowca dla kilku wariantów zastosowanego wirnika nośnego przy nieziennej masie startowej statku powietrznego. Zbadano wpływ średnicy wirnika, jego momentu bezwładności, prędkości prerotacji a także sposobu sterowania kątem skoku ogólnego łopat na efektywność omawianego manewru. Oceniono głównie wysokość wyskoku a także czas jej osiągnięcia od chwili rozprzęgnięcia układu przeniesienia napędu na wirnik nośny.*

## 1. WPROWADZENIE

Możliwość wykonania bezrozbiegowego startu pozwala na użytkowanie wiatrakowców niezależnie od sieci infrastruktury lotniskowej, szczególnie w trudnodostępnym obszarze zabudowanym a także przy występowaniu naturalnych przeszkód ukształtowania terenu. Posiadanie tej cechy czyni statki powietrzne uniwersalnymi środkami transportu oraz konkurencyjnymi w swojej dziedzinie.

Bezrozbiegowy start („jump-start”) jest metodą szybkiego poderwania wiatrakowca z powierzchni lądowiska, różniącą się od typowego manewru śmigłowcowego, lecz dającą podobny efekt. W śmigłowcach odbywa się ciągła transmisja mocy z silnika, przez przekładnię, na wirnik nośny. Wiatrakowiec natomiast wykorzystuje akumulator energii kinetycznej ruchu obrotowego, jakim jest inercyjny układ wirnika. Energia ta zostaje zgromadzona tuż przed startem przez wykorzystanie sprzężenia z silnikiem, zazwyczaj poprzez prostą przekładnię pasową.

Manewr startu bezrozbiegowego można podzielić na cztery umowne etapy.

W pierwszej fazie następuje prerotacja, czyli zwiększanie prędkości obrotowej wirnika nośnego. Podczas tego etapu wirnik nośny sprzężony jest mechanicznie z silnikiem a także ze śmigłem, które zwiększa swój ciąg w miarę nabierania wyższych obrotów. Podwozie wiatrakowca zostaje zahamowane w celu zrównoważenia momentu reakcyjnego pochodzącego od wirnika oraz siły ciągu śmigła. Kąt nastawienia łopat wirnika nośnego ustawiony jest na wartość bliską zeru, odpowiadającą minimalnemu oporowi profilowemu, bez wytwarzania siły ciągu. Pozwala to na uzyskanie wysokich prędkości obrotowych, od których w drugiej potędze uzależniona jest wartość gromadzonej energii kinetycznej.

W drugim stadium, kiedy prędkość obrotowa osiągnie możliwie najwyższą wartość (zwykle około 0,74 Ma na końcach łopat) następuje rozprężnięcie wirnika nośnego od układu napędowego, gwałtowne ściągnięcie drążka skoku ogólnego i zwolnienie hamulców. Wiatrakowiec rozpoczyna start.

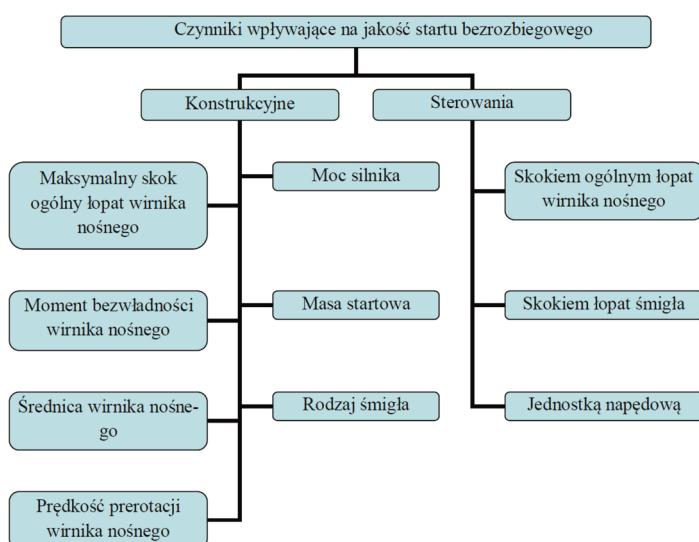
Trzecia faza – wznoszenie przebiega przy wytracaniu prędkości obrotowej wirnika, a więc spadku zakumulowanej w nim energii kinetycznej. Pilot musi kontrolować nastawienia skoku ogólnego, a tym samym wartość ciągu, dobraną według założonej procedury startu. Rośnie osiągnięta przez obiekt wysokość, a w wyniku działania poziomego ciągu śmigła zwiększa się prędkość lotu postępowego.

Podczas gdy wiatrakowiec znajdzie się w najwyższym punkcie wznoszenia zdeterminowaną minimalną wartością prędkości kątowej następuje zakończenie procedury startu. Wirnik nośny przy mniejszych obrotach nie jest w stanie wygenerować ciągu pozwalającego na dalszy wzrost wysokości i w celu kontynuacji lotu autożyro musi poruszać się już z prędkością postępową umożliwiającą rozwinięcie się zjawiska autorotacji.

## 2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA EFEKTYWNOŚĆ STARTU

Wielkości fizyczne stanowiące o jakości bezrozbiegowego startu wiatrakowca będą zależeć od wielu aspektów związanych zarówno z konstrukcją statku powietrznego oraz jej ograniczeniami jak i z procedurą wykonania tego manewru. Na pierwszą grupę czynników, takich jak: maksymalny skok ogólny, średnica i moment bezwładności wirnika nośnego, dopuszczalna prędkość końca łopat, masa startowa, moc silnika czy rodzaj śmigła decydujący wpływ mają głównie konstruktorzy przy uwzględnieniu barier stawianych przez własności aerodynamiczne oraz wytrzymałościowe elementów struktury. Druga grupa natomiast jest zdeterminowana przez samego użytkownika, jego umiejętności pilotażowe i doświadczenie z danym typem wiatrakowca. Od pilota, bowiem zależy sposób i tempo sterowania skokiem ogólnym łopat wirnika nośnego, łopat śmigła czy też samej jednostki napędowej.

Podział czynników wpływających na efektywność startu bezrozbiegowego przedstawia schemat zamieszczony na rysunku 1.



Rys. 1. Czynniki wpływające na efektywność startu bezrozbiegowego

W pracy przeanalizowano wpływ czterech z wymienionych czynników, dotyczących jedynie wirnika nośnego wiatrakowca, a mianowicie: średnicy, momentu bezwładności, prędkości pre-rotacji oraz tempa sterowania skokiem ogólnym łopat.

Ocena jakości startu polegać będzie na prześledzeniu parametrów opisujących stan wiatrakowca w danych interesujących chwilach czasowych. Z punktu widzenia mechaniki lotu można tutaj rozpatrywać przemieszczenia liniowe (dystans wzdłuż linii horyzontu, wysokość wznoszenia) i ich pierwsze oraz drugie pochodne po czasie (prędkość lotu, prędkość wznoszenia, przyspieszenie poziome oraz pionowe), prędkość obrotową wirnika nośnego i tempo jej spadku, a także zależności energetyczne (kinetyczna energia układu wirującego, energia potencjalna wysokości) oraz bilans mocy rozporządzalnej i niezbędnej.

Najważniejszymi jednak wyników wielkościami fizycznymi, interesującymi potencjalnego użytkownika będzie wysokość wznoszenia „z” oraz czas jego trwania „t”. Te właśnie dwa parametry są poddane ocenie w niniejszej pracy.

Oczywiste jest, że wiatrakowiec podczas startu bezrozbiegowego powinien wznieść się możliwie najwyżej, choćby ze względu na wystąpienie przeszkód w pobliżu lądowiska, np. zabudowa, zalesienie, zmienne ukształtowanie terenu.

Czas trwania wznoszenia powinien być natomiast na tyle długi, aby wiatrakowiec był w stanie rozpędzić się do minimalnej prędkości zapewniającej stały napływ powietrza na łopaty wirnika nośnego, co jest niezbędne do zaistnienia na nim zjawiska autorotacji, utrzymania jego obrotów i wytworzenie siły ciągu równoważącej ciężar w locie poziomym.

### 3. METODYKA I ZAKRES OBLICZEŃ

Parametry startu bezrozbiegowego wiatrakowca wyznaczyć można za pomocą metody symulacyjnej [3], [4], polegającej na obliczaniu poszczególnych wielkości zmieniających się w stałych, określonych przedziałach czasowych. Bazując na teoretycznych wzorach z zakresu teorii strumieniowej oraz mechaniki ogólnej z dużą dokładnością odtwarza się krok po kroku wartości opisujące stan lotu autożyry w dowolnej chwili jego trwania.

Istotne w wykorzystanej metodyce są m.in. równania pozwalające obliczyć tempo spadku prędkości obrotowej (1) oraz zależność pomiędzy ciągiem wirnika nośnego a skokiem ogólnym łopat (2):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_w}{I \cdot \omega}, \quad (1)$$

$$T = \frac{(\theta_0 t_{w3} - t_{w2} \lambda_0) \rho \omega^2 R^3 a k_w b}{8}, \quad (2)$$

gdzie:

$\omega$  – prędkość kątowna wirnika nośnego (WN),

$P_w$  – moc niezbędna WN,

$I$  – masowy moment bezwładności WN względem osi obrotu,

$T$  – ciąg WN,

$\theta_0$  – skok ogólny łopat WN,

$t_{w3}$  i  $t_{w2}$  – współczynniki charakteryzujące geometrie łopaty,

$\lambda_0$  – względny przepływ przez WN,

$\rho$  – gęstość powietrza,

- $R$  – promień WN,  
 $a$  – gradient siły nośnej profilu łopaty,  
 $k_w$  – ilość łopat,  
 $b$  – cięciwa łopaty.

W pracy wykonano analizy pozwalającej na porównanie startu z wysokiemi wiatrakowca o stałej masie z trzema wariantami wirnika nośnego, zbudowanego z tych samych łopat. Wyszczególniono tu cztery, opisane poniżej przypadki obliczeniowe.

1. Pierwszy wirnik nośny ma średnicę  $D = 8,8$  m i moment bezwładności względem osi obrotu  $I = 217$  kgm<sup>2</sup>. Prędkość prerotacji wynosi  $n = 550,8$  obr/min, co odpowiada około 0,74 Ma na końcu łopat.

2. Średnica drugiego wirnika nośnego została powiększona do  $D = 9,4$  m przez zastosowanie dłuższych ramion głowicy, ale tych samych łopat jak poprzedni rotor. Jego moment bezwładności z racji oddalenia od osi obrotu wzrósł do wartości  $I = 261$  kgm<sup>2</sup>. Prędkość prerotacji wynosi  $n = 515,7$  obr/min (ok. 0,74 Ma na końcu łopat).

3. W trzecim wirniku o średnicy  $D = 9,4$  m umieszczono dodatkowe obciążniki na końcach łopat, każdy o ciężarze  $m_d = 1$  kg w celu zwiększenia masowego momentu bezwładności do wartości  $I = 311$  kgm<sup>2</sup>. Prędkość prerotacji wynosi  $n = 515,7$  obr/min (ok. 0,74 Ma na końcu łopat).

4. W tym przypadku wirnik nośny jest identyczny jak w punkcie 3, jednak prerotacja odbywa się z obniżoną prędkością wynoszącą  $n = 483,6$  obr/min (ok. 0,70 Ma na końcu łopat).

Głównym kryterium dla porównania wyników wymienionych przypadków obliczeniowych będzie osiągnięcie przez wiatrakowca minimalnej prędkości poziomego ustalonego lotu autorotacyjnego, która według [6] wynosi około 50 km/h dla wiatrakowca o masie startowej 600 kg przy skoku ogólnym łopat  $\theta_0 = 2^\circ$ . Czas rozprędkowania statku powietrznego będzie zależał od przyjętego modelu śmigła i wytwarzanego przez nie ciągu  $T_s$ . W pracy posłużono się modelem [2], gdzie ciąg statyczny  $T_s$  wynosi 299 kG i maleje liniowo wraz z prędkością lotu osiągając przy  $V = 50$  km/h wartość  $T_s = 270$  kG.

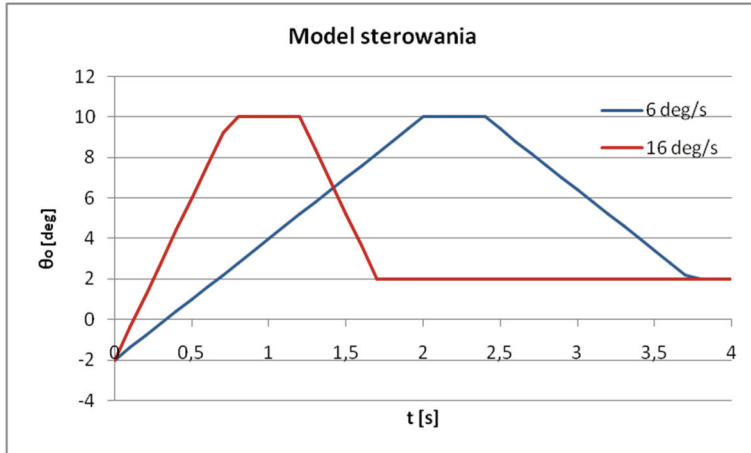
Dla tak przyjętego modelu śmigła wiatrakowca osiągnie prędkość lotu poziomego  $V_{x_{min}} = 50$  km/h po czasie  $t_{min} = 3$  s. Będzie to pierwsze kryterium oceny wyników.

Drugim kryterium poddanym analizie jest prędkość kątowna wirnika nośnego, która w czasie wznoszenia nie może zmaleć poniżej wartości 33 rad/s dla wirnika o średnicy  $D = 9,4$  m (prędkość kątowna dla ustalonej autorotacji wg [1]) oraz odpowiadającej jej pod względem zbliżonej prędkości końca łopat wielkości 35 rad/s dla mniejszego wirnika o średnicy  $D = 8,8$  m.

Aby start był uznany za prawidłowy muszą więc być jednocześnie spełnione warunki:

- czas wznoszenia  $t \geq 3$  s,
- po czasie  $t = 3$  s prędkość kątowna wirnika  $\omega \geq 33$  rad/s dla wirnika o średnicy  $D = 9,4$  m oraz  $\omega \geq 35$  rad/s dla wirnika nośnego  $D = 8,8$  m.

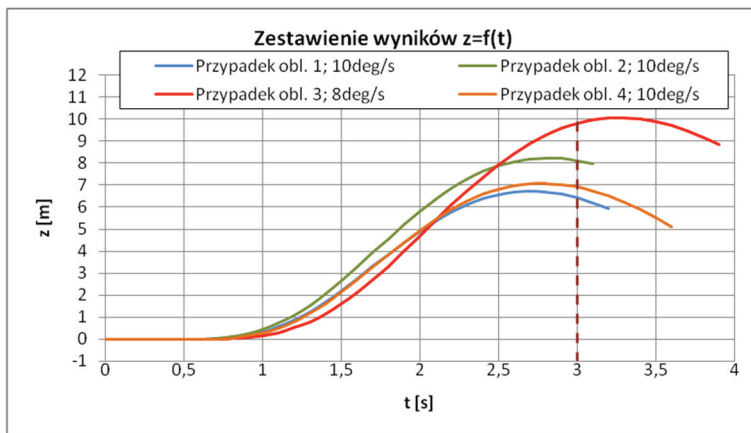
Zauważalny wpływ na wyniki obliczeń będzie miał sposób sterowania skokiem ogólnym łopat wirnika nośnego. Założono model sterowania, w którym pilot w określonym tempie ( $d\theta_0/dt$ ) zwiększa skok ogólny od  $\theta_0 = -2^\circ$  (wielkość dla zerowej siły nośnej profilu, zgodnie z [5]) aż do osiągnięcia wartości  $\theta_0 = 10^\circ$ . Następnie kąt taki utrzymywany jest na stałym poziomie w ciągu 0,5 s, po czym skok ogólny zmniejsza się do przelotowej wartości  $\theta_0 = 2^\circ$  z takim samym tempem sterowania jak przy wzroście kąta  $\theta_0$ . Założono kilka wariantów z następującym tempem sterowania  $d\theta_0/dt$ : 6 deg/s, 8 deg/s, 10 deg/s, 12 deg/s, 14 deg/s oraz 16 deg/s. Przykładowe, z wykorzystanych modeli sterowania skokiem ogólnym w czasie przedstawia wykres na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowe modele sterowania skokiem ogólnym w czasie (6 deg/s oraz 16 deg/s)

#### 4. INTERPRETACJA WYNIKÓW

Dla porównania wyników obliczeń startu bezrozbiegowego zestawiono wykresy zależności przemieszczenia pionowego „z” w funkcji czasu wznoszenia dla wcześniej wymienionych przypadków obliczeniowych od 1 do 4 przy najkorzystniejszym tempie sterowania – rysunek 3.



Rys. 3. Porównanie wyników startu bezrozbiegowego dla przypadków obliczeniowych „1-4”

Z rysunku 2 wynika, że wiatrakowiec z wirnikiem nośnym o średnicy  $D = 8,8$  m (przypadek 1) w czasie  $t = 3$  s znajduje się na wysokości 6,41 m. Powiększenie tego samego wirnika nośnego do średnicy  $D = 9,4$  m (przypadek 2) pozwala na uzyskanie w tym samym czasie wysokości 8,11 m.

Poprzez dodatkowe dociążenie końców łopatek wirnika o średnicy  $D = 9,4$  m, a tym samym zwiększenie masowego momentu bezwładności (przypadek 3), wiatrakowiec po czasie  $t = 3$  s osiąga wartość  $z = 9,8$  m ciągle się wznosząc, aby po kolejnych 0,3 s znaleźć się na wysokości maksymalnej równej 10,04 m. Tempo sterowania w tym manewrze wynosi 8 deg/s i jest to najlepszy wynik otrzymany we wszystkich przedstawionych analizach.

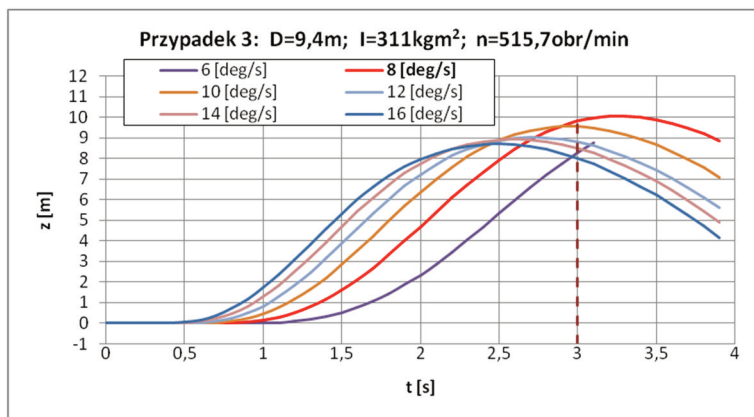
Ogromny wpływ na wysokość wysoku ma prędkość prerotacji wirnika nośnego. Obliczenia wykazały, że zmniejszenie tej wielkości z początkowej  $n = 515,7$  obr/m do 483,6 obr/min powoduje spadek wysokości wznoszenia o około 3 m (30%). Ważne jest więc, aby przekrój łopaty był profilem, którego praca możliwa jest w zakresie prędkości zbliżonych do 0,75 Ma.

W tabeli 1 sporządzono zestawienie porównawcze dla największych uzyskanych wysokości wznoszenia po czasie  $t = 3$  s w analizowanych przypadkach obliczeniowych.

Tabela 1. Wysokości wysoku uzyskiwane po czasie  $t = 3$  s dla poszczególnych przypadków obliczeniowych

Numer przypadku obliczeniowego	$D$ [m]	$I$ [kgm <sup>2</sup> ]	$n$ [obr/min]	$d\theta_0/dt$ [rad/s]	$z$ [m]
1	8,8	217	550,8	10	6,41
2	9,4	261	515,7	10	8,11
3	9,4	311	515,7	8	9,80
4	9,4	311	483,6	10	6,91

Rysunek 4 zawiera wykresy wysokości wznoszenia w funkcji czasu przy różnych wariantach tempa sterowania dla przykładowego przypadku obliczeniowego.



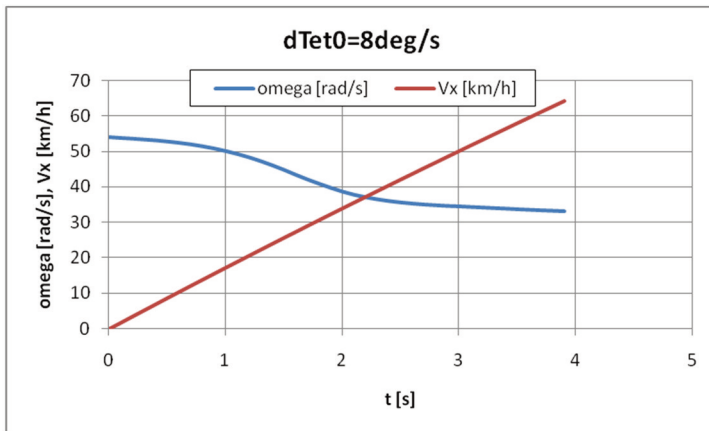
Rys. 4. Wysokość wysoku wiatrakowca w funkcji czasu wznoszenia dla obliczeniowego przypadku „3” w zależności od tempa sterowania skokiem ogólnym łopat

Analizując rysunek 4 można zauważyć, że ważną kwestią jest tempo sterowania skokiem ogólnym łopat wirnika nośnego. Zbyt wolne ściągnięcie dźwigni kąta skoku ogólnego powoduje bardzo późny wzrost ciągu, odwlekając oderwanie się wiatrakowca od podłoża. Zanim to nastąpi, w wyniku oporów aerodynamicznych łopat znacznie spada prędkość obrotowa wirnika nośnego, a tym samym zbyt wcześnie wytracana jest energia kinetyczna układu wirującego. Skracza to znacznie czas i wysokość wysoku. Przy najniższym (spośród zadanych) tempie sterowania 6 deg/s jedynie w przypadku wirnika o zwiększonym masowym momencie bezwładności wiatrakowiec przekroczył czas wznoszenia 3 s, pozwalający na uzyskanie minimalnej prędkości postępowej.

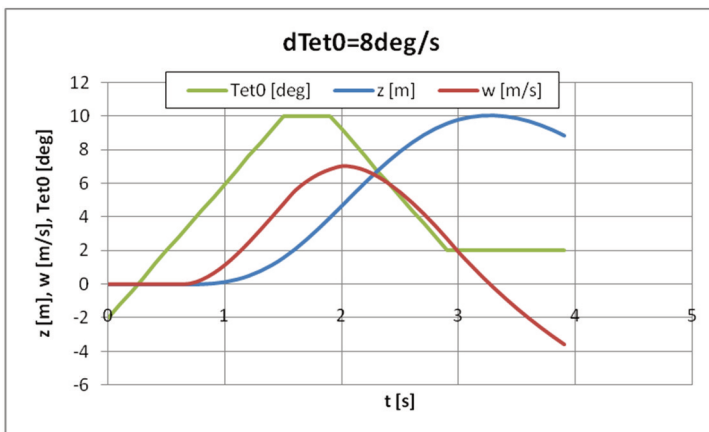
Zbyt szybkie zasterowanie skokiem ogólnym sprawia, że manewr jest bardziej dynamiczny, wznoszenie odbywa się w krótszym czasie, ale szybko wytracana jest też prędkość obrotowa

wirnika nośnego, przez co faza opadania zaczyna się wcześniej. W rezultacie przy tempie sterowania 16 deg/s wiatrakowiec po czasie  $t = 3$  s znajduje się niżej niż podczas startu z szybkością zmiany skoku ogólnego 8 deg/s czy 10 deg/s. Optymalnym tempem sterowania jest 10 deg/s dla przypadków obliczeniowych 1, 2 i 4, natomiast 8 deg/s dla przypadku 3.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wykresy pozwalające prześledzić zmienność podstawowych wielkości informujących o stanie lotu wiatrakowca w czasie manewru startu bezrozbiegowego dla przykładowego przypadku obliczeniowego.



Rys. 5. Zmiany wartości prędkości kątowej wirnika nośnego oraz prędkości lotu w czasie startu bezrozbiegowego – przypadek obliczeniowy „3”



Rys. 6. Zmiany wartości skoku ogólnego łopaty oraz wysokości i prędkości wznoszenia wiatrakowca w czasie startu bezrozbiegowego – przypadek obliczeniowy „3”

## 5. PODSUMOWANIE

Wyniki obliczeń metodą symulacyjną pozwoliły na analizę wpływu parametrów sterowania oraz czynników konstrukcyjnych na wysokość bezrozbiegowego startu wiatrakowca oraz czas jego trwania.

W modelu symulacyjnym wykorzystanym do obliczeń analizuje się jedynie start z wytworzeniem siły ciągu przez wstępnie rozpedzony wirnik za pomocą układu napędowego.

Model nie uwzględnia pojawiania się zjawiska autorotacji, generującego cząstkowy ciąg już przy mniejszych prędkościach napływu niż 50 km/h. Uwzględnienie tego faktu w obliczeniach mogłoby nieznacznie wpłynąć na uzyskane wyniki.

Mimo wszystko wykorzystany model symulacyjny może posłużyć do porównawczych analiz optymalizacji techniki bezrozbiegowego startu oraz parametrów konstrukcyjnych wiatrakowca I-28.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bronowicz J.: *Obliczenia stateczności statycznej wiatrakowca I-28* – opracowanie JB-18/2011/1, Świdnik, kwiecień 2011.
- [2] Cieślak S.: *Model obliczeniowy ciągu śmigła w zależności od prędkości lotu* – arkusz kalkulacyjny, Warszawa, 2011.
- [3] Cieślak S.: *Model symulacyjny bezrozbiegowego startu wiatrakowca* – arkusz kalkulacyjny, Warszawa, 2011.
- [4] Cieślak S.: *Projekt koncepcyjny autożyra nowej generacji o poszerzonych własnościach osiągowych* – Magisterska praca dyplomowa, Politechnika Lubelska, 2010.
- [5] Grzegorzczak K., Żółtak J.: *Obliczeniowe stacjonarne charakterystyki aerodynamiczne profilu NACA-9-H-12-MOD*, część 1, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 2010.
- [6] Stalewski W., Zalewski W.: *Analiza własności aerodynamicznych wirnika nośnego o średnicy 9,4 m i zakresu maksymalnych osiągalnych przeciążeń w eksploatacyjnych warunkach lotu wiatrakowca – R13003\_BA2-038/11*, edycja 2, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 2011.

SŁAWOMIR CIEŚLAK

## **ANALYSIS OF THE IMPACT OF DESIGN FACTORS AND CONTROL PARAMETERS ON DURATION AND HEIGHT OF AUTOGIRO'S JUMP START**

### Abstract

*The article presents the results of comparison of autogiro's jump start parameters calculation methods for few variants of applied rotor with invariable take-off weight of the aircraft. The impact of the rotor's diameter, its moment of inertia, prerotation speed, as well as method of blade's general pitch steering on manoeuvre's effectiveness were examined. The assessment contained the height of climb and the time of its achievement, starting from the moment of uncoupling of the power transmission system to rotor.*

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