ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: MECHANIKA z. 107 Nr kol. 1154

Wiesław Łucjanek, Janusz Narkiewicz
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechnika Warszawska

MODELOWANIE UKŁADÓW STEROWANIA WIROPŁATÓW
(referat przeglądowy)

Streszczenie. W referacie są omówione sposoby sterowania lotem wiropłatów oraz modele fizyczne i matematyczne stosowane do analizy układów sterowania. W uzupełnieniu referatu jest przewidziany pokaz filmu video przedstawiającego historię rozwoju wiropłatów.

Резюме. В реферате представлены методы управления полетом винтокрылов и физические модели, употребляемые для анализа систем управления. Дополнением реферата будет проекция фильма видео об исстории развития винтокрылов.

Summary. In the paper are discussed the rotorcraft flight control schemes as well as physical and mathematical models applied for analysis of control systems. In addition to the paper, a video--presentation of rotorcraft development history is provided.

1. WSTĘP

Wiropłatami są nazywane statki powietrzne, w których siła nośna, a zazwyczaj także siła napędowa i siły sterujące, są wytwarzane przez ruch obrotowy powierzchni nośnych (łopat wirnika) względem kadłuba.

Wiropłaty można podzielić na:

- wiroszybowce,
- autogira,
- śmigłowce,
- pionowzloty w których siła nośna w zawisie jest wytwarzana przez jeden lub kilka wirników nośnych.

Latanie ciał cięższych od powietrza dzięki sile nośnej wytwarzanej przez "śrubę powietrzną", czyli śmigło, przedstawił na szkicu Leonardo da Vinci już w 1475 roku. Upłynęło jednak kilka stuleci zanim ta wizja została urzeczywistniona. To opóźnienie jest skutkiem wielu przyczyn, ale jedną z ostatnich, najtrudniejszą do pokonania, okazały się kłopoty ze sterowaniem wiropłatów.

Obrót wirnika względem kadłuba stwarza problemy niespotykane w innych statkach powietrznych, np.:

- potrzebę równoważenia momentu oporowego wirnika nośnego (w większości istniejących rozwiązań konstrukcyjnych wiropłatów),
- okresową zmianę: sił na łopatach i całkowitych obciążeń wirnika,
- opływ wirującego płata (łopaty wirnika) w szerokim zakresie kątów natarcia (0 - 360deg) i prędkości (od ujemnej na części łopaty *powracającej* do przydźwiękowej na końcu łopaty *nacierającej*).

2. STEROWANIE WIRNIKA NOŚNEGO ŚMIGŁOWCA

Wirnik nośny ma wytworzyć ciąg, którego wielkość, a także kierunek w stosunku do osi wału napędowego, mogą być sterowane. W pierwszych konstrukcjach lekkich wiropłatów, zwłaszcza wiroszybowców, wirnik nośny był śmigłem o stałym skoku zamocowanym do wału poprzez przegub Cardana. Wielkość ciągu zależała od prędkości kątowej wału, a kierunek od sterowanego przez pilota nachylenia płaszczyzny obrotu śmigła do osi wału. Współczesne wirniki są śmigłami o stałych obrotach, a kąt ustawienia łopat (skok) może być zmieniany dla wszystkich łopat równocześnie o tę samą wartość (skok ogólny) lub w zależności od położenia (azymutu) łopaty względem kadłuba (skok okresowy) To ostatnie sterowanie umożliwia zmianę kierunku ciągu w stosunku do osi wału i jest realizowane w ten sposób, że azymuty łopaty odpowiadające największemu i najmniejszemu skokowi różnią się o 180 deg. Sterowania: ogólne i okresowe są wystarczające do lotu wiropłatu, ale nie są optymalne z punktu widzenia wielkości powstających na łopatach sił aerodynamicznych, drgań wirnika i poziomu hałasu. Obecnie trwają prace nad sterowaniem okresowym wyższymi harmonicznymi, tzn. z częstością będącą wielokrotnością prędkości kątowej wału oraz nad indywidualnym sterowaniem skokiem każdej łopaty.

3. MODELOWANIE STEROWANIA WIRNIKA NOŚNEGO ŚMIGŁOWCA

Zbiór fizycznych modeli wirników jest liczny, obejmuje bowiem opis konstrukcji, a więc piasty z układem sterowania oraz łopat, a także opływu.

Najprostszym, a jednocześnie podstawowym modelem wirnika jest koło, w płaszczyźnie którego następuje skok ciśnienia. Model ten umożliwia oszacowanie wytworzonego przez wirnik ciągu osiowego i części potrzebnej mocy (indukowanej). W modelach bardziej złożonych jest uwzględniane istnienie łopat, ich liczby i wymiarów, co umożliwia wyznaczenie mocy (profilowej) potrzebnej do obracania wirnika. Obliczenie naprężeń oraz analiza statecznosci ruchu wymagają oddzielnego modelowania piasty i łopat. Współczesne piasty wirników nośnych można podzielić na:

- przegubowe, w których łopaty są mocowane do wału za pośrednictwem przegubów walcowych umożliwiających wychylanie łopat w płaszczyźnie ciągu (przegub poziomy) i w płaszczyźnie obrotów (przegub pionowy) oraz obrót wokół osi podłużnej (przegub osiowy umożliwiający sterowanie skokiem),
- bezprzegubowe, w których istnieje tylko przegub osiowy, a dwa pozostałe są zastąpione łącznikiem sprężystym lub przegubem elastomerowym,
- bezłożyskowe, w których role wszystkich trzech przegubów spełniają elementy sprężyste.

W ramach każdego z wymienionych typów piast istnieje rozmaitość rozwiązań konstrukcyjnych, a więc i modeli fizycznych.

Ze względu na wielkość i zmienność w czasie sił potrzebnych do sterowania skokiem łopat wirnika nośnego, nawet w lekkich wiropłatach stosuje się układy ze wspomaganiem.

Przy wyznaczaniu chwilowych wartości ciągu wirnika przeważnie pomija się podatność łopat, jednak do analizy statecznosci ich ruchu niezbędne jest uwzględnienie przynajmniej kilku postaci odkształceń.

Powstaniu ciągu towarzyszy przyspieszenie przepływu osiowego w płaszczyźnie wirnika. Ta dodatkowa (indukowana) składowa prędkości ma znaczenie przy wyznaczaniu opływu w przekroju łopaty. Istnieje kilka modeli prędkości indukowanej: od równomiernej w całej płaszczyźnie wirnika do zróżnicowanej w zależności od azymutu łopaty i położenia jej przekroju. Uwzględnienie trójwymiarowego opływu łopat, ich wzajemnej

interferencji aerodynamicznej oraz niestacjonarności opływu prowadzi do dalszej rozbudowy modeli.

Zarówno opis ruchu elementow wirnika jak i opływu ma formę równań różniczkowych. W zależności od zagadnienia, jego złożoności oraz wymaganej dokładności, mogą to być równania zwyczajne, liniowe o współczynnikach stałych lub okresowych, mające rozwiązania analityczne lub układy nieliniowych równań cząstkowych. Rozwój metod i sprzętu do obliczeń numerycznych pozwala na analizę teoretyczną coraz większej liczby problemów.

4. STEROWANIE WIROPŁATÓW

Wirnik nośny umożliwia równowagę sił i sterowność przemieszczeń wzdłuż trzech wzajemnie prostopadłych osi oraz równowagę momentów i sterowność obrotów wokół osi podłużnej i poprzecznej, natomiast wprowadza, jeżeli jest napędzany silnikiem umieszczonym w kadłubie, moment oporowy zakłócający równowagę momentów odchylających. W wiropłatach jednowirnikowych do równoważenia momentu oporowego i umożliwienia sterowności kierunkowej stosuje się różne metody, z których dotychczas najpopularniejszą jest zastosowanie śmigła ogonowego. W wiropłatach wielowirnikowych ten sam skutek osiąga się przez przeciwne kierunki obrotów oraz różnicowanie skoków ogólnych i okresowych poszczególnych wirników. Schematy sterowania śmigłowców różnych konfiguracji są pokazane w tablicy 1 [1].

Wytworzenie ciągu wirnika wymaga wirowania łopat, których końce są w zawisie opływane z prędkością około 2/3 prędkości dźwięku, a więc niewiele pozostaje na prędkość lotu. Poza tym sterowanie ruchu wiropłata za pomocą wirnika nie jest sprawne. Np. napęd śmigła ogonowego pochłania w zawisie około 15% mocy niezbędnej, a stosunek mocy niezbędnej do ciężaru jest w śmigłowcach trzykrotnie większy niż w samolotach o porównywalnych osiągach. Niewątpliwym atutem wiropłatów jest jednak możliwość pionowego startu i lądowania, dlatego trwają prace badawcze i konstrukcyjne nad pionowzlotami, które wznosiłyby się w powietrze i utrzymywały w zawisie jak śmigłowce, po czym przechodziły do lotu poziomego w konfiguracji samolotowej.

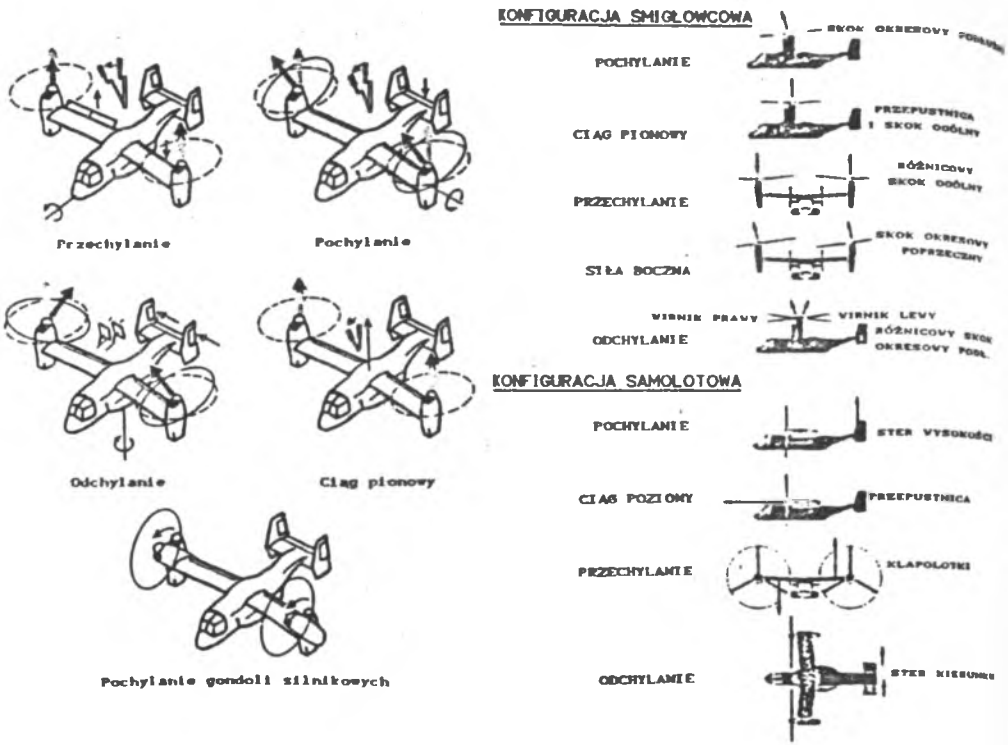
Tablica 1

Schematy sterowań śmigłowców różnych konfiguracji

KONFIGURACJA / STEROWANIE	JEDNOWIRNIKOWA	PODŁUŻNA	WSPÓŁOSIOWA	POPRZECZNA
PIONOWE	L. R. OGÓLNE	L. R. OGÓLNE	L. R. OGÓLNE	L. R. OGÓLNE
PODŁUŻNE	L. R. OKRESOWE	L. R. RÓŻNICOWE OGÓLNE I OKRESOWE	L. R. OKRESOWE	L. R. OKRESOWE
POPRZECZNE	L. R. OKRESOWE	L. R. OKRESOWE	L. R. OKRESOWE	L. R. RÓŻNICOWE OGÓLNE I OKRESOWE
KIERUNKOWE	T. R. OGÓLNE	L. R. RÓŻN. OKR.	$Q_U \neq Q_{LO}$	L. R. RÓŻN. OKR.
RÓWNOWAŻENIE MOMENTU OPOROWEGO	$Q_{L.R.} = f\eta_{T.R.}$	$Q_F = Q_R$	$Q_U = Q_{LO}$	$Q_{RI} = Q_L$

Oznaczenia: F-przedni, L-lewy, LO-niższy, L.R.-wirnik nośny, Q-moment, R-tylny, RI-prawy, T-ciąg, T.R.-śmigło ogonowe, U-wyższy.

Istnieje kilka projektów takich statków latających. Najbardziej zaawansowany jest pionowzlot z pochylanymi wirnikami. Kilka prototypów przechodzi próby fabryczne i u przyszłych użytkowników. Sterowanie takim obiektem stwarza problemy, zwłaszcza przy zmianie konfiguracji ze śmigłowcowej na samolotową i odwrotnie. Praktycznie może być realizowane za pomocą autopilotów i komputerów pokładowych, które wspomagają, a gdy potrzeba, także korygują akcje pilotów. Schematy sterowania statku powietrznego tego typu są pokazane na rys. 1 [2,3].



Rys. 1. Schemat sterowań pionowzlotu z pochylanymi wirnikami

Fig. 1. Scheme of tilt-rotor controls

Celowość, a czasami nawet konieczność stosowania sterowania automatycznego umożliwia odejście od tradycyjnych układów mechanicznych, których funkcje można połączyć, a liczbę ograniczyć. Coraz częściej klasyczna sterownica (skok okresowy) jest zastępowana przez krótki drążek umieszczony na bocznej burcie kabiny (joystick), a trwają prace nad sprzężeniem ruchów takiego drążka, aby mógł spełniać zadania także dźwigni skoku ogólnego i pedałów służących do sterowania kierunkowego.

W przeglądzie sterowania wiropłatów nie można pominąć najnowszych prac nad sterowaniem głosem lub ruchami głowy pilota. Nie można też jednak opisać wszystkich modeli stosowanych do analizy sterowania.

LITERATURA

[1] Stepniewski W.Z.: Rotary-Wing Aerodynamics. Volume I - Basic Theories of Rotor Aerodynamics (With Application to Helicopters). NASA Contractor Report 3082, 1979.

[2] Dabundo C., Kimball D.: Initial Flight Test Assessment of V-22 Flying Quantites. AHS 46th Annual Forum Proceedings, Washington, D.C., May 21-21, 1990.

[3] Dunford P., Lunn K., Magnuson R., Marr R.: The V-22 Osprey - a Significant Flight Test Challenge. Sixteenth European Rotorcraft Forum, 18th-20th September 1990, Glasgow, paper II.7.3.

MODELLING OF CONTROL SYSTEMS OF ROTORCRAFTS
(Survey lecture)

The idea of rotorcraft was proposed as early as in 1475 by Leonardo da Vinci, who drew a sketch of flying vehicle with lifting airscrew. However, practical realization of the idea began only in third decade of present century, mostly because of problems created by control of such aircraft.

Since main rotor has to produce lift, propulsion force and balancing/controlling moments, it is necessary to control the value as well as the direction of the rotor thrust. Schemes of controls for helicopters of different configurations are shown in Table 1 [1].

The idea of rotorcraft has been applied to some types of vertical take-off and landing (VTOL) vehicles. In Fig. 1 are shown schemes of tilt-rotor controls and mechanisms used in helicopter and airplane mode flight [2,3].

The new approaches to rotorcraft control, like higher harmonic control (HHC) and individual blade control (IBC), flight-by-wire, side-stick as well as voice and pilot-head movement controls, are mentioned.