

Wiesław Łuczjanek

Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej
Politechniki Warszawskiej

PROBLEMY MODELOWANIA RUCHU ŚMIGŁOWCA

Streszczenie. Przedstawiono przegląd modeli fizycznych i matematycznych stosowanych do opisu ruchu śmigłowca.

1. WSTĘP

Na dotychczasowych Sympozjonach "MODELOWANIE W MECHANICE" większość przedstawianych prac z dziedziny lotnictwa dotyczyła modelowania ślabopłatów, tj. obiektów latających, które wznoszą się w powietrze dzięki sile nośnej powstałej w wyniku opływu skrzydeł nieruchomych względem kadłuba (jak w samolotach, szybowcach itp.). Wspólną cechą tych obiektów jest konieczność rozbiegu przy starcie i dobiegu przy lądowaniu, co wyklucza pionowy tor tych faz lotu. Tymczasem znaczny udział ilościowy w światowej flocie powietrznej, zarówno cywilnej jak i wojskowej, mają obiekty pionowego startu i lądowania (ang. VTOL - Vertical Take-Off and Landing). Współcześnie zrealizowano kilka koncepcji takich obiektów, przy czym niemal we wszystkich pionowa siła nośna większa od ich ciężaru jest wytwarzana na postoju metodą wirujących płatów (śmigieł).

Zastąpienie lub dopełnienie płatów przymocowanych na stałe do kadłuba wirującymi (wirnikami nośnymi) było historycznie pierwszym, a obecnie jest dominującym rozwiązaniem technicznym umożliwiającym praktyczną realizację pionowego startu i lądowania oraz zawisu obiektów latających cięższych od powietrza (aerodyn). Z rozwiązaniem tym wiąże się jednak wiele problemów modelowania, które są przedstawione na przykładach modelowania ruchu śmigłowca.

2. PRZYKŁADY MODELOWANIA RUCHU ŚMIGŁOWCA

Najprostszym modelem fizycznym śmigłowca jest punkt materialny, np. jego środek ciężkości. Tak opisuje się śmigłowiec, a także inne obiekty

latające, gdy określa się ich położenie do celów nawigacji. Układem odniesienia jest Ziemia, a równania ruchu, zwykle zdyskretyzowane dla określonych chwil czasu, są typu kinematycznego.

Ten sam model może być zastosowany w obliczeniach osiągow. Zakładając, że śmigłowiec jest wyważony, można ograniczyć się do dwóch stopni swobody opisujących ruch w płaszczyźnie pionowej i do trzech składowych wektora stanu: wysokości lotu i jej pochodnej względem czasu, czyli prędkości wznoszenia oraz prędkości lotu poziomego.

Bardziej złożony model jest potrzebny do opisu ruchu względem Ziemi śmigłowca traktowanego jako ciało sztywne. W przypadku ogólnym uwzględnia się 6 stopni swobody opisujących ruch postępowy środka ciężkości śmigłowca i ruch kulisty względem tego środka. Gdy ruch jest opisany w układzie współrzędnych związanym z Ziemią, modelem matematycznym jest układ dwunastu nieliniowych równań różniczkowych pierwszego rzędu o stałych współczynnikach, a składowymi wektora stanu są przemieszczenia i prędkości liniowe środka ciężkości śmigłowca oraz kąty obrotu i prędkości kąto- we kadłuba.

Jeżeli ruch jest opisany w układzie ruchomym, związanym ze śmigłowcem lub z opływem, to model matematyczny można zredukować do ośmiu nieliniowych równań różniczkowych pierwszego rzędu, bo działające na śmigłowiec siły nie zależą bezpośrednio od współrzędnych liniowych i od kąta odchylenia (kursu).

Gdy taki model jest wykorzystywany do określenia parametrów lotu ustalonego, to ulega uproszczeniu do układu nieliniowych równań algebraicznych (trygonometrycznych), a gdy ma służyć do analizy stateczności ruchu, to równania różniczkowe są zazwyczaj linearyzowane.

W celu otrzymania analitycznych rozwiązań równań ruchu, w literaturze podręcznikowej wprowadza się daleko idące uproszczenia, polegające na rozdzieleniu ruchu śmigłowca na część symetryczną (przemieszczenia wzdłuż osi podłużnej i kierunkowej oraz pochylanie) i asymetryczną (ślizg oraz przechylenie i odchylenie). W rezultacie tego uproszczenia układ ośmiu równań można rozdzielić na dwa układy po cztery równania.

W opisanych dotychczas modelach lewe strony równań ruchu oraz siły ciężkości nie zależą od typu obiektu; są takie same dla stało- i wiroplątów. Różnice pojawiają się przy wyznaczaniu obciążeń aerodynamicznych i pochodzących od układu napędowego oraz gdy uwzględnia się więcej stopni swobody niż 6 opisujących ruch sztywnego kadłuba.

Podobnie jak skrzydła samolotu, wirnik nośny śmigłowca wytwarza siłę nośną, a ponadto siły do sterowania i ciąg umożliwiający lot poziomy. Te dodatkowe zadania wirnika nośnego wymagają specjalnego mocowania łopat do piasty, np. umożliwiającego ustawianie ich skoku w zależności od położenia łopaty względem kadłuba, od prędkości kąto- we wału napędowego,

od kierunku i prędkości lotu, od gęstości i temperatury otaczającego powietrza, od bliskości ziemi, a także od innych wielkości, np. częstości drgań własnych łopaty. Nawet w ustalonym locie kadłuba, obciążenia, a więc i ruchy łopat, są zmienne w czasie. Aby ograniczyć przenoszenie tych zmiennych obciążeń na kadłub, łopaty są mocowane do piasty za pośrednictwem przegubów lub elastycznych łączników, co wydatnie zwiększa liczbę stopni swobody układu (podobnie jak uwzględnienie wychyleń sterów w stałopłatach), nawet w przypadku, gdy jego elementy są uważane za sztywne. Mechanizmy mocowania łopat i sterowania ich skokiem są w głowicach wirników przegubowych bardzo złożone, a same głowice są bardzo skomplikowane konstrukcyjnie.

Jednym z zastosowań śmigłowców jest transport ładunków podwieszanych pod kadłubem, co dodatkowo powiększa liczbę stopni swobody układu.

Możliwość ruchu o wielu składowych dużej liczby elementów prowadzi do sprzężeń kinematycznych i dynamicznych, co przy szerokim paśmie częstości sił wzbudzających stwarza groźbę niepożądanych rezonansów, zarówno w powietrzu, jak i na ziemi.

W śmigłowcu, w większym niż w innych obiektach latających stopniu, istotny jest więc problem tłumienia i izolacji drgań. Stosuje się w tym celu rozmaite metody, od najprostszych, jak elastyczne zawieszenie zespołu napędowego w kadłubie, poprzez dodatkowe tłumiki, np. wahadełka na łopatach, aż po układy sterowania czynnego. Zabiegi te prowadzą do dalszej rozbudowy modeli opisujących konstrukcję śmigłowców.

Lot śmigłowca jest możliwy dzięki siłom aerodynamicznym działającym na łopaty wirnika nośnego. Najprostsza, impulsowo-strumieniowa teoria tłumaczy powstanie ciągu wirnika zmianą pędu strumienia powietrza przepływającego przez wirnik. Istnienie prędkości indukowanej w płaszczyźnie obrotu wirnika jest faktem doświadczalnym, jednakże ewolucja modelowania pola tej prędkości trwa już ponad 60 lat. Oddzielne problemy stwarza modelowanie obciążeń aerodynamicznych z uwzględnieniem nieliniowości, np. oderwania opływu, ściśniętości powietrza itp.

Celem referatu, przedstawionego tu w skrócie, jest przegląd modeli fizycznych i matematycznych służących do opisu ruchu śmigłowca.

3. PODSUMOWANIE

Modelowanie śmigłowca w celu opisu jego ruchu jest zagadnieniem złożonym: od punktu materialnego stosowanego w nawigacji do modelu złożonego układu mechanicznego, dodatkowo wzbogaconego modelami obciążeń aerodynamicznych, pracy układu napędowego oraz automatycznego sterowania,

stosowanymi przy numerycznej symulacji lotu w symulatorach treningowych i badawczych.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЕРТОЛЕТА

Р з ю м е

Представлен обзор физических и математических модели применяемых для описания движения вертолетов.

HELICOPTER MOTION MODELING PROBLEMS

S u m m a r y

A survey of physical and mathematical models applied for description of helicopter motion is presented.