

Mateusz Kania ¹⁾, Mirosław Ferdynus ²⁾

WIRTUALNE PROTOTYPOWANIE UKŁADU STEROWANIA POCHYLANIA I PRZECHYLANIA ŚMIGŁOWCA JEDNOWIR- NIKOWEGO W UKŁADZIE KLASYCZNYM

Streszczenie: W publikacji przedstawiono wirtualny prototyp układu sterowania śmigłowcem w aspekcie jego pochylenia i przechylenia. Model daje możliwość wszechstronnych badań bez konieczności budowy rzeczywistego prototypu.

Słowa kluczowe: Sterowanie, śmigłowiec, układ sterownia, CatiaV5, wirtualne prototypowanie.

WSTĘP

W śmigłowcu występuje szereg układów, których zadaniem jest udział w realizacji funkcji sterowania. Śmigłowiec jako obiekt techniczny podczas lotu posiada sześć stopni swobody, co sprawia, że sterowanie jego ruchem jest niezwykle skomplikowane. Podstawowym układem sterowania jest układ sterownia lotem. Opracowanie mechanizmu sterowania skokiem cyklicznym jest związane z nazwiskiem B.N. Juriewa - rosyjskiego inżyniera, który w znacznym stopniu przyczynił się do rozwoju techniki i teorii śmigłowca [2]. Układ sterowania analizowany w tej publikacji przeznaczony jest dla śmigłowców jednowirnikowych w układzie klasycznym dla wirnika przegubowego.

Celem publikacji jest przedstawienie analizy wirtualnego prototypu układu sterownia śmigłowca z możliwością analizy odpowiedzi układu łopat wirnika na cykliczną zmianę kąta nastawienia.

Sterowanie lotem śmigłowca jednowirnikowego realizuje się poprzez zmianę sił i momentów działających na statek podczas lotu względem trzech osi. W prezentowanym modelu badany jest układ sterowania tylko dla dwóch osi to jest podłużnej i poprzecznej [1, 2]. Sterowanie podłużne realizowane jest poprzez przemieszczanie sterownicy ręcznej w tym samym kierunku. Skutkuje to zmianą skoku cyklicznego, powodując zmianę kąta nachylenia siły wypadkowej na wirniku nośnym w kierunku podłużnym. Zmianę składowej siły wirnika nośnego w opisywanym kierunku określa wzór:

$$F_{hx} = a_1 \cdot T \quad (1)$$

¹ Politechnika Lubelska, Koło Naukowe Komputerowego Wspomagania Prac Projektowych oraz Instytut Lotnictwa w Warszawie, Engineering Design Center, Customer Support Engineering

² Politechnika Lubelska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

gdzie: F_{hx} -składowa ciągu wirnika w opisywanej płaszczyźnie, a_1 - kąt pochylenia stożka wirnika nośnego, T - całkowity ciąg wirnika.

Zadanie tych wymuszeń skutkuje również powstaniem momentu pochyłającego na wirniku nośnym oraz zmianą momentu wypadkowego względem osi poprzecznej. Sterowanie podłużne zmienia kąt pochylenia i zadarcia śmigłowca. Sterowanie poprzeczne realizowane jest poprzez przemieszczanie drążka pilota na boki. Skutkuje to zmianą skoku cyklicznego powodując zmianę kąta nachylenia siły wypadkowej na wirniku nośnym w kierunku poprzecznym. Składowa siły ciągu wirnika nośnego w kierunku poprzecznym wyraża się wzorem:

$$F_{hy} = b_1 \cdot T \quad (2)$$

gdzie b_1 - kąt pochylenia stożka wirnika nośnego.

Powstanie momentu przechylającego na wirniku nośnym wywołuje zmianę momentu wypadkowego względem osi podłużnej. Sterowanie poprzeczne zmienia kąt przechylenia śmigłowca.

Głównym zadaniem układu sterownia jest jak najdokładniejsze przeniesienie kinematyki ruchu pomiędzy sterownicami pilota a dźwigniami sterującymi na łopatach wirnika nośnego. Bardzo ważną funkcją jest również wspomaganie pilota w sterowaniu trajektorią lotu oraz utrzymaniu stabilizacji śmigłowca w przestrzeni [2, 3].

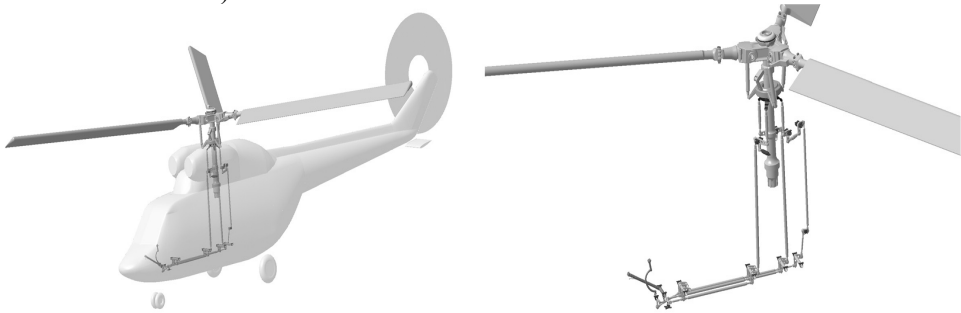
Sterowanie śmigłowcem może być realizowane za pomocą sztywnego układu popychaczy, układu elastycznego z wykorzystaniem linek, sterowania elektrycznego za pomocą siłowników, nazywanego układem Fly-by-Wire lub światłowodów nazywanego Fly-by-Light [4]. W opracowanym modelu został utworzony klasyczny układ sterowania składający się z drążka sterowania umieszczonego w kabinie pilota, popychaczy i tarczy sterującej. Głównym elementem układu jest mechanizm tarczy sterującej, składający się m.in. z dwóch pierścieni. Dolny pierścień nie obraca się, lecz może przechylać się w dowolnym kierunku zadawanym przez pilota za pomocą drążka sterowania cyklicznego. Górny pierścień obraca się wraz z wałem wirnika w taki sposób, że jest on zawsze równoległy do pierścienia dolnego. Pierścień górny jest połączony z łopatami za pomocą popychaczy i dźwigni przekręceń łopat. Przechylenie tarczy sterującej powoduje zmianę kąta nastawienia łopaty, co daje ruch łopaty względem przegubu osiowego. Przy obrocie wirnika, łopaty zmieniają kąt nastawienia cyklicznie raz na obrót, co daje możliwość zmiany wartości siły nośnej na profilu łopaty. Zmiana ta wpływa na kierunek wektora ciągu całego wirnika nośnego, co umożliwia sterowanie kierunkowe statku powietrznego w locie. Oś prostopadła do płaszczyzny pierścieni tarczy sterującej i przechodząca przez środek piasty nazywa się osią sterowania.

Podczas prototypowania jednym z głównych problemów wpływających na konstrukcję układu sterownia jest masa startowa śmigłowca. Wzrost ciężaru startowego śmigłowca powoduje wzrost obciążeń w układzie sterowania, w tym na sterownicach pilota. W śmigłowcach o masie startowej około 2000kg pilot nie

jest w stanie sterować śmigłowcem bez nadmiernego wysiłku, zaś w powyżej 5000 kg nie istnieje możliwość sterowania wyłącznie przez pilota. Sytuacja taka zmusza do zastosowania w układzie sterowania wspomaganie hydraulicznego bądź elektrycznego na poziomie niezawodności 10^{-9} . Zastosowanie systemów wspomaganie komplikuje i rozbudowuje układ sterowania. Układ hydrauliczny wymaga zastosowania wielu dodatkowych elementów, co wpływa na masę startową oraz komplikuje konstrukcję układu sterowania. Używanie systemów wspomaganie pociąga za sobą wprowadzenie do układu sterowania urządzeń symulujących obciążenie na sterownicach skoku cyklicznego, gdzie obciążenia te powinny narastać ze wzrostem wielkości przemieszczenia sterownicy.

Kolejnym czynnikiem utrudniającym konstrukcję takiego układu jest wzrost wielkości gabarytowej śmigłowca, która rośnie ze wzrostem ciężaru startowego i powoduje zwiększenie odległości między sterownicami pilota, a dźwigniami wykonawczymi. Wzrost ten wpływa na znaczną rozbudowę ciągów sterowania, zwiększenie tarcia, pogorszenie dokładności odtwarzania ruchu sterownic pilota na dźwigniach wykonawczych. Dzieje się tak na skutek odkształceń sprężystych w ciągach sterowania [2, 4].

Ostatnim i najważniejszym czynnikiem jest brak stateczności dynamicznej opisywanego statku powietrznego. Śmigłowiec jednowirnikowy z wirnikiem głównym konstrukcji przegubowej jest obiektem niestatecznym dynamicznie. Ta właściwość wymaga od pilota włożenia znacznego wysiłku fizycznego i psychicznego w sterowanie śmigłowcem. Dla odciążenia pilota od wysiłku związanego z utrzymaniem stabilizacji śmigłowca w układach sterowania stosuje się system autostabilizacji lub system autopilota. Zastosowanie układów sztucznej stabilizacji jest konieczne w śmigłowcach użytkowanych według IFR (loty bez widoczności ziemi).



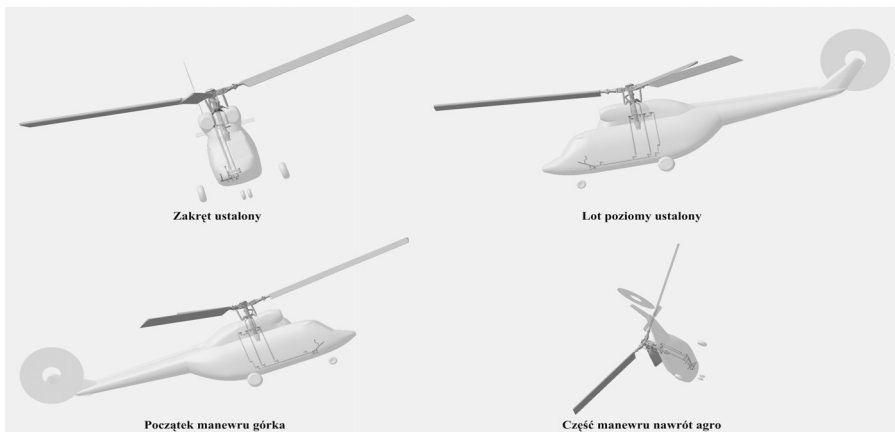
Rys. 1. Wirtualny model układu sterowania śmigłowca jednowirnikowego
Fig. 1. Virtual model of helicopter steering system

Przedstawiony model umożliwia sterowanie śmigłowcem w płaszczyźnie przechyleń i odchyleń za pomocą wymuszeń pochodzących z drążka pilota. Jest to układ klasyczny z możliwością rozszerzenia o różne warianty sterowania. Utworzony prototyp pozwala na zbadanie odpowiedzi łopaty w postaci kąta nastawie-

nia i wpływu tego kąta na cykliczną zmianę kąta wahań względem przegubu poziomego, pionowego i przekreśień. Pozwala na analizę maksymalnych wartości przemieszczeń łopat prototypu w płaszczyźnie ciągu. Daje również możliwość zaobserwowania odpowiedzi kadłuba projektowanego śmigłowca na zmianę siły nośnej na poszczególnych łopatach wywołanych sterowaniem.

OPIS MODELU

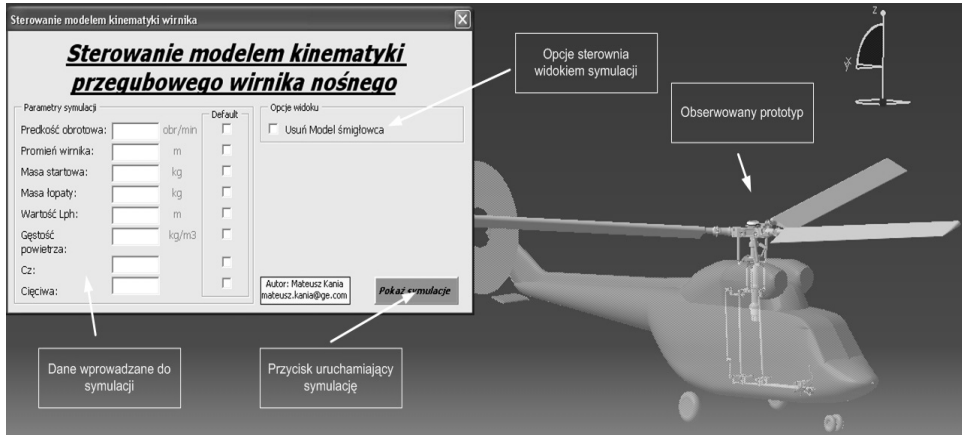
Wirtualny prototyp układu sterownia przedstawiony w pracy realizowany jest za pomocą układu popychaczy, których rozmieszczenie, długość i punkty mocowania zostały narzucone podczas tworzenia projektu wstępnego. Mechanizm zespołu popychaczy oraz tarczy sterującej został utworzony w module DMU Kinematics systemu Catia V5. Stworzony model umożliwia realizację dziewięciu wymuszeń wpływających na jego kinematykę. Dwa z nich są to wymuszenia pochodzące od drążka pilota i są zadawane w sposób dowolny poprzez podanie parametrów zmiany położenia, zaś pozostałe siedem jest sterowne za pomocą zależności utworzonych w module Knowledge Advisor. Są to równania kinematyki ruchu łopat, prędkość obrotowa wirnika nośnego oraz zależności pomiędzy wartością sterowań, a kątami przechylenia lub pochylenia całego śmigłowca. Istnieje możliwość analizy sterownia kierunkowego śmigłowca poprzez zadanie parametru kąta odchylenia śmigłowca w rozpatrywanym manewrze.



Rys. 2. Analizowany prototyp śmigłowca w różnych stanach lotu
Fig. 2. Different cases of virtual helicopter flight

Niezbędne jest podanie danych wejściowych do modelu takich jak: masa startowa prototypowanego śmigłowca, masa łopaty wraz ze współczynnikiem C_z charakteryzującym jej profil, nominalna prędkość obrotowa wirnika nośnego, promień wirnika, odległości przegubu poziomego od osi obrotu wirnika nośnego L_{ph} , wysokość lotu według atmosfery wzorcowej, czas rozpędzania i czas hamo-

wania wirnika nośnego [2, 4]. Wszystkie te parametry można wprowadzić w prosty sposób dzięki użyciu dodatkowego programu sterującego modelem, którego główne okno widoczne jest na rysunku 3.



Rys. 3. Okno sterowania analizą prototypu śmigłowca
Fig. 3. Main window of virtual prototype steering application

Zależności używane do obliczania wartości amplitud drgań łopaty w płaszczyźnie obrotów przedstawiają odzwierciedlenie wpływu ośrodka gazowego jakim jest powietrze, w którym porusza się śmigłowiec, na ruch łopaty, poprzez zmianę wartości siły nośnej. Zakłada się, że wielkość momentu aerodynamicznego będącego odzwierciedleniem ciągu wirnika na poszczególnych łopatach, jest stała wzdłuż długości łopaty. Moment ten przedstawia zależność:

$$M_a = T \cdot \frac{R_{blade}}{N_b} \quad (3)$$

gdzie: T - całkowity ciąg wirnika nośnego dla wykonywanego manewru, R_{blade} - długość łopaty zaś N_b - liczba łopaty.

Wartości kąta stożka tworzonego przez odchylone łopaty wirnika nośnego od płaszczyzny prostopadłej a_0 do osi wału wirnika są uzależnione od wartości kąta nastawienia i można je określić za pomocą równania:

$$a_0 = \frac{\gamma}{4} \theta_0 \quad (4)$$

gdzie: I_{ph} - masowy moment bezwładności łopaty, ω - prędkość obrotową, θ_0 - kąt nastawienia łopaty dla skoku ogólnego, γ - liczba Locka, którą można przedstawić wzorem:

$$\gamma = \frac{\rho a c R^4}{2 I_{ph}} \quad (5)$$

Wszelkie analizy manewrów są przeprowadzane dla atmosfery wzorcowej na wysokości 0 m n.p.m. jednakże istnieje możliwość zadania dowolnej wartości wysokości lotu. Parametry związane z profilem łopaty pobierane są z utworzonego wirtualnego modelu łopaty.

Wahania łopat uzależnione są od wartości azymutu na jakiej znajduje się łopata i można je wyrazić równaniem:

$$\beta = a_0 - a_1 \sin(\psi) - b_1 \sin(\psi) \quad (6)$$

gdzie: a_1 i b_1 - kąty nachylenia dysku wirnika do tyłu i w bok w kierunku 90° , co jest tożsame z kierunkiem łopaty nacierającej zaś ψ - kąt azymutu.

W modelu użyty został również współczynnik wahań i przekręceń nazywany również kompensatorem wahań i oznaczany, przez k_H :

$$\Delta\theta = -k_H \cdot \Delta\beta \quad (7)$$

Działanie kompensatora wahań jest takie, że jeśli łopata zwiększa kąt β , to równocześnie zmniejsza się jej kąt nastawienia.

Wynikiem wymuszeń zadanych przez drążek sterownia pilota jest zmiana kąta wahań łopat w przegubie poziomym oraz wartości kątów pochylenia i przechylenia śmigłowca.

ANALIZA WYNIKÓW FUNKCJONOWANIA PROTOTYPU UKŁADU STEROWNIA ŚMIGŁOWCA

Wirtualny prototyp powstał dla sprawdzenia wielu przypadków sterownia śmigłowcem podczas lotu, startu czy lądowania. Analiza funkcjonowania prototypu obejmuje: obserwacje poprawności działania układu przeniesienia wymuszeń z drążka pilota na tarczę sterującą, zbadanie maksymalnych amplitud wahań dla projektowanego układu wirnika nośnego oraz ocenę skuteczności zespołu sterowania podczas wykonywania manewrów. Analizę przeprowadzono dla kilku stanów lotu takich jak na przykład: lot poziomy ustalony, zakręt ustalony, manewr górka, nawrót agro, zwrot bojowy oraz startu i lądowania śmigłowca.

Podczas projektowania śmigłowca niezbędna jest weryfikacja stworzonego układu sterowania lotem jeszcze we wstępnej fazie projektu pozwalająca ocenić jego poprawność. Opracowany model daje możliwość zbadania wpływu modyfikacji niektórych węzłów konstrukcyjnych na polepszenie zakresu sterowania śmigłowcem. Analiza takiego prototypu pozwala ocenić, czy funkcja jaką powinien on spełniać jest realizowana w sposób poprawny i czy założenia projektowe były trafne czy należałoby je zmienić. Prototyp ten daje również możliwość sprawdzenia układu pod kątem norm EASA.

Dzięki zastosowaniu modułu Knowledge Advisor, możliwa jest również weryfikacja konstrukcji ograniczników zwisu łopat oraz analiza możliwości kolizji łopaty z kadłubem śmigłowca podczas rozruchu bądź hamowania wirnika nośnego. Badanie amplitud drań łopat daje możliwość sprawdzenia pod względem ki-

nematycznym możliwości oraz zakresu takich wahań co ma bezpośredni wpływ na sposób rozmieszczenia ograniczników [5].

Możliwość zastosowania równań opisujących wymuszenia powodowane przez siły aerodynamiczne daje okazję do szerszego badania prototypu oraz jego weryfikacji. Badanie reakcji śmigłowca na wartości wymuszeń, pozwala jeszcze na poziomie prototypowania, na wirtualnym obiekcie, ocenić poprawność przeprowadzonych obliczeń wstępnych.

WNIOSKI

Wirtualny prototyp układu sterowania śmigłowcem wydaje się być prawidłowy. Analiza poprawności funkcjonowania układu wskazuje, że śmigłowiec prawidłowo reaguje na zadane sterowania. Utworzony prototyp daje możliwość szerokiego badania tego układu bez konieczności budowy rzeczywistego modelu. Zależności opisujące oddziaływania aerodynamiczne umożliwiają szerokie badania modelu. Moduł odpowiedzialny za powiązanie wymuszeń z odpowiedzią całego badanego obiektu daje możliwość analizy sterowności śmigłowca we wczesnej fazie projektu, co umożliwi konstruktorom jego zmianę bez konieczności wykonywania kosztownych badań w locie na gotowym obiekcie.

Analiza realizowana poprzez możliwość zadania wartości wymuszeń pochodzącego od układu drążka pilota w kierunku porzecznym i podłużnym oraz obserwowanie odpowiedzi kąta nastawienia i kąta wahań łopat daje wirtualny obraz zakresu amplitud drań tych obiektów. Wirtualne prototypowanie pozwala na analizę poprawności konstrukcji popychaczy, przegubów, układu tarczy sterującej oraz umieszczenia przegubów w zależności od założeń projektowych co do osiągnięć bądź konstrukcji tego zespołu.

Przedstawiony model jest perspektywiczny i jest ciągle rozwijamy. Istnieje możliwość dodania sterowania wirtualnym śmigłowcem za pomocą joysticka komputerowego poprzez język programowania Visual Basic. Daje to możliwość we wczesnej fazie projektu weryfikacji śmigłowca przez pilotów i oceny jego sterowności według skali Coopera – Harpera.

Istnieje możliwość dodanie kolejnych podukładów sterownia takich jak: sterownie skokiem ogólnym, sterowanie zespołem napędowym, prędkością wirnika nośnego, hamulca wirnika nośnego, podwoziem oraz systemem sterowania opcjonalnym bądź specjalistycznym (np uzbrojenia). Taka rozbudowa modelu pozwala na analizę śmigłowca w zakresie funkcji jakie powinien on spełniać (ocenę jego własności lotnych i dodatkowych w pełnym zakresie).

PIŚMIENNICTWO

1. Bramwell A. R. S.: Helicopter Dynamics. Butterworth-Heinemann. Oxford 2001.
2. Juriew B.N.: Aerodinamiceskij raszczet wiertoletow. Obarangiz. Moskwa 1956.

3. Mil M.L.: Helicopters. Calculation and design. Volume II. NASA Technical Translation, NASA TT F-519. Washington, D. C. 1968
4. Szumański K.: Badania symulacyjne procesów projektowania i eksploatacji śmigłowców w celu zwiększenia ich trwałości, Instytut Lotnictwa, Opracowanie nr BL-727, wydanie wewnętrzne, Warszawa, 1990.
5. Wełyczko A.: Catia v5. Przykłady efektywnego zastosowania systemu w projektowaniu mechanicznym. Helion. Gliwice 2005.

VIRTUAL PROTOTYPING OF CONTROL SYSTEM IN TERMS OF ANGLING AND TILTING OF CLASSIC TYPE SINGLE-ENGINE HELICOPTER

Summary

The paper presents a virtual prototype of a helicopter control system in terms of angling and tilting. The model allows comprehensive tests without having to build an actual prototype.

Keywords: Control system, steering, helicopter, CatiaV5, virtual prototyping.