

Mateusz Kania ¹⁾

MODELOWANIE PIONOWYCH DRGAŃ ŁOPAT ŚMIGŁOWCA W SYSTEMIE CATIA V5

Streszczenie: Zjawisko drgań układów mechanicznych jest istotnym problemem w projektowaniu części maszyn i mechanizmów. Szczególnie ważne jest to w urządzeniach takich jak śmigłowce, w których nie można sobie pozwolić na awarię. Za pomocą modułów DMU Kinematics oraz Knowledge Advisor w systemie Catia V5 został stworzony model drgań łopaty wirnika nośnego śmigłowca w układzie klasycznym. W tym modelu zostały odtworzone więzy kinematyczne występujące na rzeczywistym obiekcie oraz dodany opis równań ruchu łopaty w trzech kierunkach, to jest w płaszczyźnie ciągu, obrotów i przekreśień. Model ten pozwala na analizę zachowania się łopat przy różnych wymuszeniach, analizę maksymalnych wychyleń od położenia neutralnego oraz zbadanie zachowania się układu przy różnych wymiarach części składowych mechanizmu.

Słowa kluczowe: drgania, śmigłowiec, wirnik nośny, CatiaV5, DMU Kinematics, Knowledge Advisor, kinematyka.

WSTĘP

Zachowanie się układów mechanicznych w trakcie drgań jest wciąż przedmiotem wielu rozważań prowadzonych zarówno przez biura konstrukcyjne jak i zespoły naukowo-badawcze. Z reguły chodzi tutaj o ich szkodliwość, a więc niekorzystny wpływ na wytrzymałość i żywotność elementów maszyn. W wyniku drgań elementów maszyn pojawiają się szkodliwe zakłócenia w prawidłowym funkcjonowaniu całych maszyn, zmniejszenie ich trwałości, zły wpływ drgań na operatora oraz powstający nadmierny hałas. Często podczas badań analizowana jest maksymalna amplituda drgań w określonych warunkach pracy oraz częstość tych ruchów. W projektowaniu śmigłowców zjawisko drgań ma kluczowe znaczenie. W przedstawionym artykule opisano sposób modelowania drgań łopat podczas pracy dla trójłopatowego przegubowego wirnika nośnego śmigłowca w układzie klasycznym. Pomysł wprowadzenie równań ruchu łopaty do modelu sterowania śmigłowcem jest nowatorski i daje możliwość generowania symulacji i prowadzenia analiz kinematycznych w oparciu o warunki zbliżone do rzeczywistych występujących w śmigłowcu podczas lotu.

¹ Instytut Lotnictwa w Warszawie, Engineering Design Center.



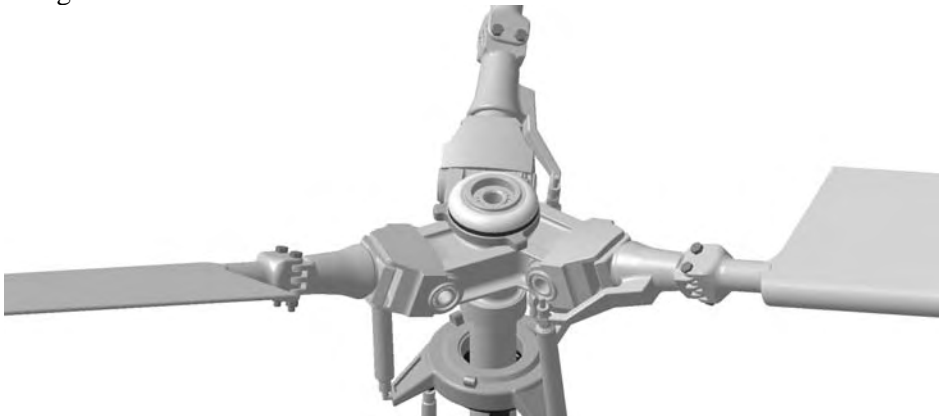
Rys. 1. Trójłopatowy śmigłowiec z przegubowym wirnikiem nośnym w układzie klasycznym

Fig. 1. The helicopter with articulated hub

DRGANIA ŁOPAT WIRNIKA NOŚNEGO ŚMIGŁOWCA

W czasie lotu statku powietrznego, jakim jest śmigłowiec, wskutek działania sił aerodynamicznych i masowych łopaty wykonują znaczne ruchy oraz ulegają deformacjom giętnym i skrętnym, które z kolei mogą spowodować duże naprężenia oraz duże momenty gnące, zwłaszcza w nasadzie łopaty. Momenty te poprzez piastę i wał wirnika są przekazywane na śmigłowiec.

Najbardziej rozpowszechnionym rozwiązaniem konstrukcyjnym zamocowania łopaty do piasty jest zamocowanie przegubowe. Takie rozwiązanie pozwala łopacie na ruch swobodny w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika i w płaszczyźnie do niej normalnej. Na rysunku 2 przedstawiono omawianą piastę wirnika nośnego.

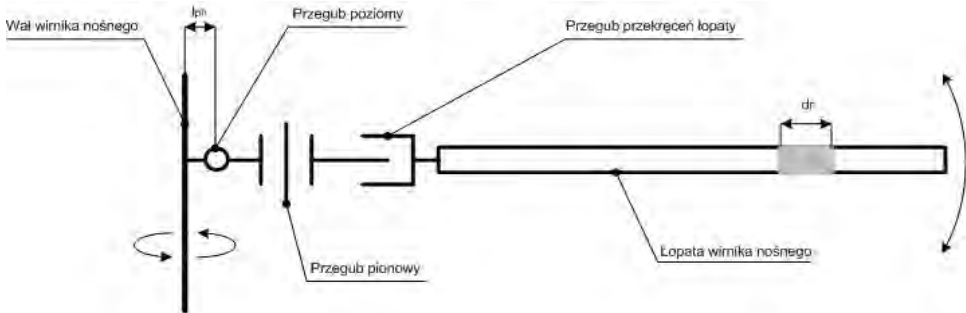


Rys. 2. Przegubowa piasta wirnika nośnego śmigłowca

Fig. 2. Articulated hub of main rotor

Momenty zginające w nasadowej części łopaty dzięki zastosowaniu przegubów są małe (w przegubach moment jest równy zero) i nie powinny przekazywać się poprzez głowicę na śmigłowiec. Ruchy łopat związane z zastosowaniem przegubów wywierają zasadniczy wpływ na charakterystyki wirnika.

W przedstawianym modelu rozpatrywać będą wahania pionowe łopaty względem przegubu poziomego. Łopatę traktować będą jako nieodkształcalną, sztywną belkę, zaś kąt β oznaczać będzie kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną konstrukcyjną wirnika, a osią przegubu przekreślenia.



Rys. 3. Schemat analizowanego układu
Fig. 3. Scheme of analyzed system

Na łopatę wirnika nośnego śmigłowca działają siły aerodynamiczne oraz siły bezwładności. Moment od tych sił względem przegubu poziomego jest równy zero. Rozpatrywany element łopaty o długości dr , którego masa wynosi m zaznaczono na rysunku 3. Na ten element działają następujące siły :

- siła bezwładności:

$$F_b = m \cdot (r - l_{ph}) \cdot \ddot{\beta} \cdot dr \quad (1)$$

- siła odśrodkowa:

$$m \cdot [l_{ph} + (r - l_{ph}) \cdot \cos \beta] \cdot \Omega^2 \cdot dr \quad (2)$$

gdzie jej składowa jest skierowana prostopadle do osi łopaty i wyraża się wzorem:

$$m \cdot [l_{ph} + (r - l_{ph}) \cdot \cos \beta] \cdot \Omega^2 \cdot \sin \beta \cdot dr \quad (3)$$

- siła aerodynamiczna:

$$dT = T \cdot dr \quad (4)$$

Przyrównując do zera sumę momentów względem przegubu poziomego od powyższych sił otrzymamy równanie wahań pionowych łopaty:

$$\begin{aligned}
 & - \int_{l_{ph}}^R [m \cdot (r - l_{ph}) \cdot \ddot{\beta} \cdot (r - l_{ph})] \cdot dr - \int_{l_{ph}}^R m \cdot [l_{ph} + (r - l_{ph}) \cdot \cos \beta] \cdot \Omega^2 \cdot (r - l_{ph}) \cdot \sin \beta \cdot dr + \\
 & \int_{l_{ph}}^R T(r - l_{ph}) \cdot dr = 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Po wykonaniu całkowania otrzymamy:

$$- I_{ph} \cdot \ddot{\beta} - \Omega^2 \cdot [I_{ph} \cdot \cos \beta + l_{ph} \cdot S_{ph}] \cdot \sin \beta + M_a = 0
 \tag{6}$$

gdzie I_{ph} oznacza masowy moment bezwładności, M_a jest to moment pochodzący od sił aerodynamicznych, zaś S_{ph} to moment statyczny łopaty.

Przyjęto, że drgania wykonywane są dla małych kątów wahań co oznacza, że $\sin \beta = \beta$, zaś $\cos \beta = 1$. Wygodnie jest również zastąpić różniczkowanie po czasie t , różniczkowaniem po azymucie ψ . Wówczas równanie wahań pionowych przyjmie następującą postać:

$$\beta'' + (1 + \varepsilon) \beta = \frac{M_a}{\Omega^2 I_{ph}}
 \tag{7}$$

gdzie:

$$\varepsilon = \frac{l_{ph} \cdot S_{ph}}{I_{ph}}
 \tag{8}$$

Ruch łopaty względem przegubu poziomego zależy od wartości momentu aerodynamicznego M_a . Jeżeli kąt nastawienia łopat jest stały, tak jak to jest w przypadku zawisu lub lotu ustalonego w kierunku poziomym, to siła nośna utworzy stały moment dookoła przegubu poziomego, który z momentem od sił ciężkości i odśrodkowych spowoduje wychylenie łopaty o stały kąt β_0 między płaszczyzną obrotu wirnika i tworzącymi stożka opisywanego przez wirujące łopaty.

Podczas lotu śmigłowca z poziomą składową prędkości, a także w trakcie wykonywania wymienionego już zawisu i lotu pionowego, gdy środek ciężkości nie leży w osi wału wirnika, następuje cykliczna zmiana kąta nastawienia łopat w funkcji azymutu ψ . Przy sterowaniu skokiem łopat za pomocą tarczy sterującej, kąt θ nastawienia łopaty opisany jest równaniem:

$$\theta = \theta_0 - \theta_c \cos \psi - \theta_s \sin \psi
 \tag{9}$$

gdzie: θ_0 – kąt skoku ogólnego,
 θ_c, θ_s – kąty skoku okresowego.

Traktując zmiany kąta nastawienia jako zmianę kąta natarcia i pomijając rozstaw przegubów poziomych, który ma niewielki wpływ na wahania łopaty otrzymujemy następujące wyrażenie:

$$\frac{M_a}{\Omega^2 I_{ph}} = \frac{\gamma}{4} (\theta_0 - \theta_c \cos \psi - \theta_s \sin \psi) \quad (10)$$

gdzie γ oznacza liczbę Locka i wyraża się wzorem:

$$\gamma = \frac{\rho a c R^4}{2 I_{ph}} \quad (11)$$

ρ oznacza gęstość ośrodka, w którym porusza się łopata, a określa doskonałość aerodynamiczną profilu. Po podstawieniu (10) do (7) otrzymuje się równie ustalonych wahań łopat względem przegubu poziomego:

$$\beta = \frac{\gamma}{4} \beta_0 - a_1 \cos \psi - b_1 \sin \psi \quad (12)$$

gdzie parametry a_1 i b_1 oznaczają kąty pochylenia stożka w kierunku podłużnym i poprzecznym.

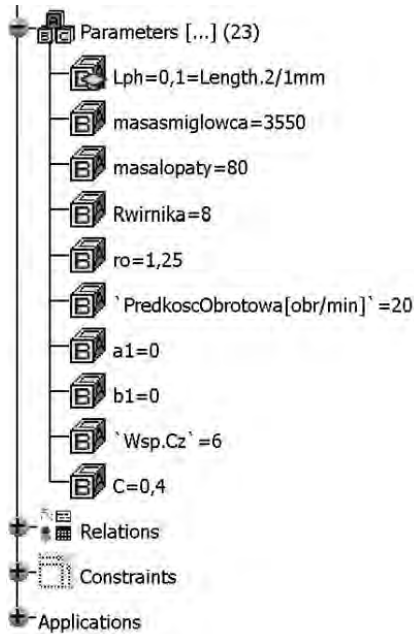
OPIS MODELU

Model drgań łopaty wirnika nośnego śmigłowca został utworzony w oprogramowaniu Dessault CatiaV5 przy użyciu modułów Part Design, Assembly Design, DMU Kinematics oraz modułu Knowledge Advisor. Komponenty wchodzące w skład modelu są to bryłowe modele części, których wzajemne położenie zostało zdeterminowane za pomocą modułu Assembly. Więzy kinematyczne Revolue (rotacja) i Rigid (sztywne połączenie), występujące w tym modelu, zostały utworzone za pomocą modułu kinematyki. Zależności omówione w rozdziale drugim, zostały wprowadzone do modelu za pomocą narzędzia Knowledge Advisor.

Parametry, które należy podać w celu rozpoczęcia analizy kinematyki ruchu drgającego łopat wirnika nośnego śmigłowca w systemie CatiaV5 przedstawione zostały poniżej:

- - masa startowa śmigłowca M_s [kg],
- - masa łopaty M_b [kg],
- - promień wirnika R [m],
- - odległość przegubu poziomego od osi wirnika l_{ph} [m],
- - gęstość powietrza ρ [kg/m³],
- - współczynnik C_z ,
- - prędkość obrotowa wirnika nośnego Ω [Obr/min],

- - cięciwa C [m],
- - kąt pochylenia śmigłowca a_1 [rad],
- - kąt przechylenia śmigłowca b_1 [rad].



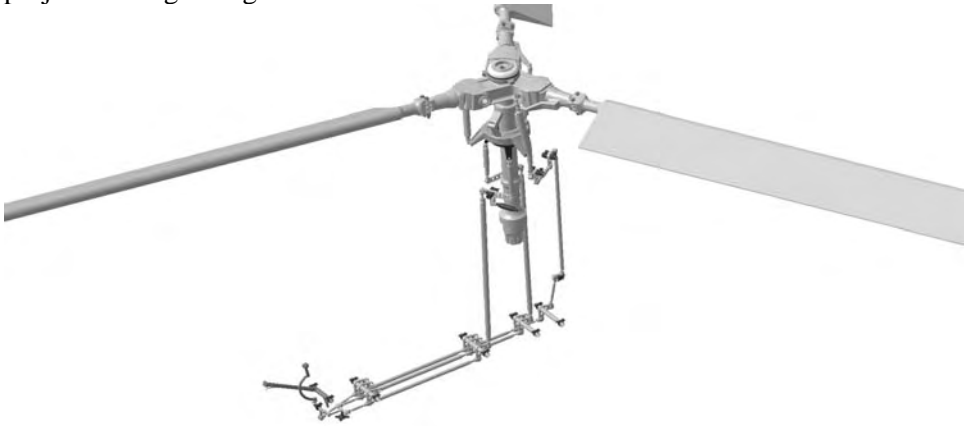
Rys. 4. Parametry wprowadzane do modelu
Fig. 4. Parameters which should be include to model

Są to parametry używane do przeliczania przedstawionych zależności na wartość kąta wahań łopaty oraz wartości zmiany kąta położenia wału wirnika nośnego w odniesieniu do kadłuba śmigłowca, uzależniona od czasu, co odpowiada wartości azymutu łopaty. Symulacja dzięki uaktywnieniu funkcji Simulation with Laws daje możliwość obserwacji amplitud wahań łopat w zależności od wartości zadanych parametrów.

Wymuszenia jakie są wprowadzane do projektowanego modelu mogą mieć każdą postać, jak na przykład sinusoidy czy wymuszenia cyklicznego impulsowego, lecz również postać każdego innego sygnału niestacjonarnego, który da się opisać równaniami oraz prawami.

Zastosowanie podczas modelowania modułów DMU Kinematics oraz Knowledge Advisor umożliwiło uzyskanie ruchu drgającego dla jednego przegubu. Zastosowanie podobnych komend dla pozostałych przegubów pozwala na pełną analizę ruchu łopaty śmigłowca. Taki sposób modelowania daje możliwość dodawania innych interesujących badacza parametrów wpływających bezpośrednio na ruch. Dzięki użyciu funkcji Rule z modułu Knowledge Advisor istnieje możliwość wprowadzenia pewnych ograniczeń, praw lub automatyczną zmianę już zadanych parametrów w zależności od zachowania się analizowanego układu.

Przedstawiony model drgań znalazł zastosowanie w tworzeniu wirtualnego modelu układu sterowania przechylania i pochylania śmigłowca przedstawionym na rysunku 5. Powstały w ten sposób wirtualny prototyp umożliwia, między innymi, na analizę i modyfikację rozmieszczenia ograniczników wahań na piaście projektowanego śmigłowca.



Rys. 5. Model układu sterowania śmigłowca
Fig. 5. Model of helicopter steering system

WNIOSKI

Przedstawiony model wahań łopaty śmigłowca w płaszczyźnie ciągu, po porównaniu go z obliczeniami analitycznymi oraz wynikami badań na stanowiskach badawczych, wydaje się w poprawny sposób odwzorowywać ruch drgający rzeczywistego obiektu.

Badaniu w takich analizach oprócz amplitud wahań, może również zostać poddana wartość prędkości i przyspieszeń łopaty, bądź innego modelowanego w ten sposób mechanizmu.

Zastosowanie narzędzia, jakim jest system CAD/CAM/CAE CatiaV5 daje możliwość jeszcze na etapie prototypowania, dokonania testów zakresu ruchów łopaty wirnika nośnego i eliminacja kolizji jeszcze we wstępnej fazie projektu co znacząco zmniejsza koszty i czas konstruowania takiego elementu.

PIŚMIENNICTWO

1. Bramwell A. R. S.: Helicopter Dynamics. Butterworth-Heinemann. Oxford 2001.
2. Juriew B.N.: Aerodinamiczeskij 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. Szücs E.: Modelowanie matematyczne w fizyce i technice. WNT. Warszawa 1977.

MODELING OF HELICOPTER BLADES FLAPPING IN CATIA V5

Summary:

In this publication presents virtual vibration model of helicopter main rotor blade, created in modules DMU Kinematics and Knowledge Advisor in Catia V5 system. In this model create all kinematic joints based on real object. This method of modeling allow to analyzing blade vibration with parameters of motion defined by user.

Keywords: Vibration, helicopter, helicopter rotor, CatiaV5, DMU Kinematics, Knowledge Advisor, kinematic